

## فصلنامه علمی

# فیزیک کاربردی ایران

سال چهاردهم / پیاپی ۳۸ / فصلنامه / پاییز ۱۴۰۳

- ۷-۲۰ تولید سطوح ناهموار گاوسی و غیر گاوسی همسانگرد/ناهمسانگرد  
ژاله ابراهیمی نژاد
- ۲۱-۴۰ تعیین عناصر کممقدار در محصولات کشاورزی روستای چقای اراک، ایران  
رضا پورایمانی، محمدحسین چوپان دستجردی، سعید قاهانی و مرضیه مشایخی
- ۴۱-۵۲ طراحی و ساخت دستگاه تولید پلاسما به روش تخلیه سد دی الکتریک سطحی (SDBD) در مقیاس آزمایشگاهی  
آمنه کارگریان، سولماز جمالی و مهدی بخش‌زاد محمودی
- ۵۳-۶۴ بررسی اثر تونل زنی بین حالت‌های لبه‌ای نانو نوار فسفرین با لبه‌های زیگزاگ  
مهدیه حسین نخعی، محسن دایی محمد، مرتضی سلطانی، مینا نقابی و غلامرضا راشدی
- ۶۵-۷۴ افزایش بازده سلول خورشیدی سیلیکونی با تبدیل طیف فرابنفش به مرئی با استفاده از نانوذرات سفر قرمز  
سعید صالح‌پور
- ۷۵-۹۰ آنالیز دوبعدی سرعت نقاط درخشان ناحیه انتقالی خورشید با روش ردیابی همبستگی موضعی  
احسان توایی، معصومه تاره و سیما ضیغمی
- ۹۱-۱۰۵ طراحی موجبرهای نور کُند متشکل از بلورهای فوتونی دوبعدی و بررسی کوک‌پذیری آن  
تایماز فتح‌الهی خلخالی، مازیار امرائی و علی آقامحمدی
- ۱۰۶-۱۲۱ گذار فاز توپولوژیکی InBi و InSb تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه  
صبا احمدوند و شیرین نامجو
- ۱۲۲-۱۳۴ تأثیر تلاطم غلاف پلاسمایی بر حالت‌های تکانه‌ای زاویه‌ای مداری باریکه‌های بسل - گوسین و لاگر - گوسین  
داود نوبهار و سیروس خرم
- IX-XVII چکیده مقالات به انگلیسی

به نام خدا



فصلنامه علمی

# فنزیک کاربردی ایران

سال چهاردهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳



فصلنامه علمی

## فیزیک کاربردی ایران

سال سیزدهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳

صاحب امتیاز: معاونت پژوهشی دانشگاه الزهرا

مدیر مسئول: سعیده شعاری نژاد، دانشیار دانشگاه الزهرا

سردبیر: عزیزاله شفیع‌خانی، استاد دانشگاه الزهرا

### اعضای هیأت تحریریه:

داود درانیان، فیزیک پلاسما، استاد دانشگاه آزاد اسلامی

محمودرضا روحانی، فیزیک پلاسما، دانشیار دانشگاه الزهرا

فاطمه شجاعی باغبینی، فیزیک گرانش، استاد دانشگاه تهران

عزیزاله شفیع‌خانی، نانوفیزیک، استاد دانشگاه الزهرا

فاطمه شهشهانی، فیزیک لیزر، دانشیار دانشگاه الزهرا

مرتضی فتاحی، ژئوفیزیک، دانشیار دانشگاه تهران

طیب کاکاوند، فیزیک هسته‌ای، استاد دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین

عبداله مرتضی‌علی، فیزیک ماده چگال، استاد دانشگاه الزهرا

عزالدین مهاجرانی، فیزیک فوتونیک، استاد دانشگاه شهید بهشتی

ترانه وظیفه‌شناس، فیزیک ماده چگال، دانشیار دانشگاه شهید بهشتی

ناشر: معاونت پژوهشی دانشگاه الزهرا

دبیر اجرایی: مریم امیری‌خواه

ویراستار: فاطمه رستمیان

صفحه‌آرا: مریم امیری‌خواه

ترتیب انتشار: فصلنامه

این نشریه به موجب نامه شماره ۱۳۹۲۰۳ مورخ ۱۳۹۰/۰۷/۲۵ از وزارت علوم، تحقیقات و فناوری مجوز انتشار دارد.

نشانی: تهران، ونک، ده ونک، دانشگاه الزهرا، معاونت پژوهشی، کدپستی ۱۹۹۳۸۹۳۹۷۳

Email: [aujap@alzahra.ac.ir](mailto:aujap@alzahra.ac.ir)

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳-۱۰۵۱

## راهنمای نویسندگان

مجله فیزیک کاربردی ایران، مجله‌ای با داوری همتاست، که بستری برای انتشار دستاوردهای پژوهشی محققان در حوزه فیزیک کاربردی به زبان فارسی ایجاد می‌کند. این مجله از تحقیقات و پژوهش‌های اصیل استقبال می‌کند. مقالات ممکن است از حوزه‌های نظری گرفته تا آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های سامانه‌های فیزیکی با رهیافت‌های متنوع، یا مشاهدات جدید را گزارش کند.

### قبل از تحویل به مجله اطمینان حاصل کنید که:

- (۱) یک نفر نویسنده مسئول معرفی شود.
- (۲) رایانامه و وابستگی سازمانی افراد به صورت دقیق آماده شده باشد.
- (۳) مقاله در نرم‌افزار ورد تایپ شده باشد و حتماً فایل مقاله در قالب ورد ارسال شود.
- (۴) مشخصات نویسندگان و وابستگی سازمانی آنان هم به فارسی و هم به انگلیسی در فایل جداگانه در قالب ورد ارسال شود.

### اصول اخلاقی

- (۱) مقاله قبلاً در نشریه دیگری چاپ نشده باشد (مگر به صورت چکیده یا بخشی از سخنرانی یا رساله دانشگاهی) و همزمان با این مجله به مجله دیگری ارسال نشده باشد.
- (۲) نویسندگان تعهد می‌کنند که بعد از چاپ نیز مقاله را به مجله دیگری که فارسی باشد ارسال نکنند.
- (۳) تمامی نویسندگان باید هر رابطه مالی و شخصی را با افراد و سازمان‌های دیگر، که به مقاله ایشان مربوط می‌شود، در نامه همراه به صورت شفاف شرح دهند.
- (۴) تمامی نویسندگان باید در مقاله سهم اساسی داشته باشند و همگی باید از ترتیب و فهرست نویسندگان آگاه باشند.
- (۵) دقت کنید که حذف و اضافه یا تغییر دادن ترتیب نویسندگان و نیز تغییر نویسنده مسئول پس از پذیرش نهایی مجاز نیست.

### تدوین مقاله

#### زبان مقاله

- (۱) متن مقاله به زبان فارسی نوشته می‌شود.
- (۲) چکیده و نام نویسندگان و نشانی ایشان و کلیدواژه‌ها به فارسی و انگلیسی تهیه شود.

#### حروف چینی و نگارش مقاله

- (۳) مقاله به زبان فارسی و در نرم‌افزار مایکروسافت ورد در صفحه A4 تایپ شود. عنوان مقاله با قلم زر پررنگ ۱۶، چکیده انگلیسی با قلم تایمز ۱۲، اسامی نگارندگان با قلم زر ۱۲ تایپ شود. قلم زر معمولی ۱۲ برای

- متن مقاله به کار برده شود. فواصل خطوط در متن فارسی و انگلیسی ۱ باشد و تمام صفحات شماره گذاری شود. حاشیه‌ها از هر طرف ۲.۵ سانتی متر باشد.
- (۴) کل مقاله بیش از بیست صفحه نباشد.
- (۵) حتماً فایل word مقاله ارسال شود.
- (۶) مشخصات نویسندگان و وابستگی سازمان کامل آنان باید به زبان فارسی و انگلیسی در یک فایل word جداگانه ارسال شود.
- (۷) عنوان مقاله باید کوتاه و رسا باشد.
- (۸) چنانچه ارائه کننده مقاله دانشجو باشد، نام استاد راهنمای دانشجو نیز باید ذکر شود.
- (۹) چکیده فارسی و انگلیسی مقاله باید شامل مطالب مهم یافته‌های تحقیق باشد و از ۲۵۰ کلمه تجاوز نکند. ضروری است نویسندگان واژگان کلیدی (سه تا پنج واژه) را در انتهای چکیده فارسی و انگلیسی درج نمایند.
- (۱۰) متن مقاله به ترتیب باید شامل بخش‌های مقدمه، روش کار (مواد، دستگاه‌ها و روش‌ها)، نتایج، بحث و نتیجه‌گیری، منابع و تقدیر و تشکر باشد.
- (۱۱) بهتر است برای بیان اوزان از سیستم متریک استفاده شود. در غیر این صورت واحدها در آغاز مقاله بیاید و با حروف نوشته شود.
- (۱۲) استفاده از جدول وقتی مجاز است که درج اطلاعات به دست آمده در متن به راحتی میسر نباشد. عنوان جدول در بالای جدول نوشته شده و گویا باشد، به نحوی که نیاز به مراجعه به متن مقاله نباشد، اختصارات و علائم متن جدول باید در زیرنویس مشخص شود.
- (۱۳) عکس‌ها باید اصل و ترجیحاً سیاه و سفید باشد. توصیه می‌شود عکس‌های میکروسکوپ الکترونی به طور مجزا به صورت JPG تهیه و ارسال گردد. تمام شکل‌ها باید دارای عنوان باشند و به ترتیب شماره گذاری در متن ذکر شوند.
- (۱۴) کلیه جدول‌ها و نمودارها باید رسم شود و عکس نباشد.
- (۱۵) بخش تقدیر و تشکر به انتهای مقاله اضافه شود، تقدیر لزوماً از حامی مالی نیست.

## منابع:

- (۱۶) منابع در انتهای مقاله با قلم تایمز ۹ مطابق دستور کار زیر به روش APA آورده شوند:
- **کتاب:** چگونگی آوردن کتاب‌ها در بخش مراجع به ترتیب زیر است:  
نام خانوادگی و نام نویسنده، عنوان کتاب و ناشر آن، محل نشر، نوبت چاپ، شماره صفحه و سال انتشار
  - Crano J.C. and Guglielmetti R.J., *Organic Photochromic and Thermochromic Compounds: Main Photochromic Families*, 1st ed. Kluwer Academic, Boston, **1**, 1-9, 2002.
  - *Industrial Biofouling: Detection, Prevention and Control*, Walker J., Surman S. and Jass J. (Eds.), John Wiley and Sons, New York, 57-63, 2000.

• **مقاله‌ها:** نحوه آمدن مقاله‌ها به ترتیب زیر است:

نام خانوادگی و نام نویسنده، عنوان مقاله، نام مجله، شماره جلد، صفحه‌های ابتدایی و انتهایی مقاله، سال انتشار و

کد DOI.

- Keyvan Rad J., Mahdavian A.R., Salehi-Mobarakeh H., and Abdollahi A., FRET Phenomenon in Photoreversible Dual-Color Fluorescent Polymeric Nanoparticles Based on Azocarbazole/Spiropyran Derivatives, *Macromolecules*, **49**, 141-152, 2016, <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.5b02401>.

• **مجموعه مقالات**

- Khoubi-Arani Z. and Mohammadi N., Thermodynamically Controlled Assemblies of Hard/Soft Polymeric Nanoparticles for Mechanical Waves and Shock Absorption, *Proceeding of 12<sup>th</sup> International Seminar on Polymer Science and Technology*, Islamic Azad University, Tehran, 2-5 November, 2016.

• **پایان نامه‌ها**

- Doddapaneni V., The Polymer-Based Nanocomposites for Electrical Switching Applications, PhD Thesis, School of Engineering Sciences, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2017.

• **ثبت اختراع**

- Chin D.A. and Irvin D.J., Actuator Device Utilizing a Conductive Polymer Gel, US Pat.6,685,442, 2004.

• **تارنما**

- Mauritz K., Sol-gel , <http://www.psrc.usm.edu/mauritz/solgel.htm>, Available in 13 February 2005.

• **استانداردها**

- Standard Test Method for Solidification Point of BPA, Annual Book of ASTM Standard, **06.04**, D 4493-94, 2000.

منابع غیرانگلیسی نیز باید به انگلیسی ترجمه شود و زبان اصلی منبع در پایان هر منبع داخل پرانتز ذکر شود؛ برای مثال برای منابع فارسی ترجمه شده به انگلیسی در پایان عبارت (in Persian) در پرانتز درج شود.

## فهرست مطالب

۷-۲۰	تولید سطوح ناهموار گاوسی و غیر گاوسی همسانگرد/ناهمسانگرد ژاله ابراهیمی نژاد
۲۱-۴۰	تعیین عناصر کم‌مقدار در محصولات کشاورزی روستای چقای اراک، ایران رضا پورایمانی، محمدحسین چوپان دستجردی، سعید قاهانی و مرضیه مشایخی
۴۱-۵۲	طراحی و ساخت دستگاه تولید پلازما به روش تخلیه سد دی الکتریک سطحی (SDBD) در مقیاس آزمایشگاهی آمنه کارگریان، سولماز جمالی و مهدی بخش‌زاد محمودی
۵۳-۶۴	بررسی اثر تونل‌زنی بین حالت‌های لبه‌ای نانو نوار فسفرین با لبه‌های زیگزاگ مهدیه حسین نخعی، محسن دایی محمد، مرتضی سلطانی، مینا نقابی و غلامرضا راشدی
۶۵-۷۴	افزایش بازده سلول خورشیدی سیلیکونی با تبدیل طیف فرابنفش به مرئی با استفاده از نانوذرات فسفر قرمز سعید صالح‌پور
۷۵-۹۰	آنالیز دوبعدی سرعت نقاط درخشان ناحیه انتقالی خورشید با روش ردیابی همبستگی موضعی احسان توایی، معصومه تاره و سیما ضیغمی
۹۱-۱۰۵	طراحی موجبرهای نور‌کند متشکل از بلورهای فوتونی دوبعدی و بررسی کوک‌پذیری آن تایماز فتح‌اللهی خلخالی، مازیار امرائی و علی آقامحمدی
۱۰۶-۱۲۱	گذار فاز توپولوژیکی InBi و InSb تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه صبا احمدوند و شیرین نامجو
۱۲۲-۱۳۴	تأثیر تلاطم غلاف پلاسمایی بر حالت‌های تکانه‌ی زاویه‌ای مداری باریکه‌های بسل - گوسین و لاگر - گوسین داود نوبهار و سیروس خرم
IX-XVII	چکیده مقالات به انگلیسی





## تولید سطوح ناهموار گاوسی و غیر گاوسی

### همسانگرد/ناهمسانگرد<sup>۱</sup>

ژاله ابراهیمی نژاد<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۰۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۰۶

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳

صص ۷ - ۲۰

#### چکیده:

در پژوهش حاضر از شبیه‌سازی رایانه‌ای برای تولید سطوح  $(1+1)$  و  $(1+2)$  بعدی با دو نوع تابع همبستگی گاوسی و تابع همبستگی نمایی استفاده شده است. برای این منظور از یک مولد اعداد تصادفی برای تولید سطوح با توزیع ارتفاع گاوسی با میانگین صفر استفاده شد که توابع همبستگی آن‌ها دارای فرمول گاوسی و نمایی فرض شده است. محاسبات برای سطوح همسانگرد و همچنین سطوح ناهمسانگرد انجام شد. به منظور بررسی مونوفراکتالی سطوح ناهموار تولید شده، مقادیر چولگی و کشیدگی برای این سطوح  $(1+1)$  و  $(1+2)$  بعدی محاسبه شد. همچنین، مقادیر این کمیت‌ها با رفتار توزیع احتمال ارتفاع تطبیق داده و نتایج بررسی شد. سپس، برای بررسی بی‌نظمی و ناهمواری سطوح تولید شده، نماهای ناهمواری سطوح، مورد ارزیابی قرار گرفت. افزون بر این، برای این سطوح ناهموار، بعد فراکتال برای توصیف پیچیدگی سطوح فراکتال نامنظم بدست آمد.

**واژگان کلیدی:** تابع همبستگی، نمایی، گاوسی، چولگی، کشیدگی.

<sup>۱</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46054.1383>

<sup>۲</sup> استادیار، گروه فیزیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. Email: zhl.ebrahimi@gmail.com



## ۱. مقدمه

ناهمواری سطح نقش اساسی در پدیده‌های فیزیکی مختلف از جمله رسانایی الکتریکی، پراکندگی، اصطکاک، انتقال حرارت، چسبندگی، سایش و ظرفیت دارد [۴-۱]. در حقیقت، وجود ناهمواری در سطوح در مقایسه با ایده آل در نظر گرفتن سطوح، واقعی تر است، بنابراین در بسیاری از مطالعات تجربی و نظری تأثیر ناهمواری سطوح بررسی شده است. از طرف دیگر، مقدار بیان کمیت‌های ناهمواری کاملاً به ریخت‌شناسی سطوح بستگی دارد. ایجاد تغییرات کوچک در کمیت‌هایی چون توزیع ارتفاع و طول همبستگی ممکن است تأثیر قابل توجهی بر ریخت‌شناسی سطح داشته باشد [۵-۱۰]. در پژوهش‌های تجربی، در نظر گرفتن شرایط مختلف تولید سطح چون مواد زیرلايه، مدل رسوب سطح، دما و غیره در ویژگی‌های ریخت‌شناسی سطوح ناصاف تولید شده بسیار مؤثر است [۲-۸، ۱۱].

در شبیه‌سازی‌های عددی ناهمواری سطح، ورودی‌های سطوح ناهموار با ارتفاع‌ها و ویژگی‌های آماری مختلف مشخص می‌شوند و این روشی بهینه برای پیش‌بینی رفتار دستگاه‌های الکترونیکی است. ویژگی‌های آماری سطوح ناهموار را می‌توان از اطلاعات ریشه میانگین مربع (RMS)، طول همبستگی و نمای ناهمواری بدست آورد. توصیف توزیع آماری سطحی از راه دانش تابع همبستگی امکان‌پذیر است. بنابراین، یک الگوریتم خوب قادر به تولید سطوح ناهموار با پارامترهای مشخص شده است [۶-۱۰]. در دهه‌های کنونی، مطالعه در مورد ویژگی‌های تماس سطوح ناصاف به ویژه از نظر سه بعدی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. با بررسی عملکرد سامانه‌های مختلف ثابت شده است که شبیه‌سازی عددی از سطوح ناهموار برای تولید سطوح ناهموار روشی کارآمد بوده که در آن ورودی‌ها با استفاده از کمیت‌های آماری ارتفاعی و مکانی متفاوت مشخص می‌شوند. در حقیقت، ساختار و ریخت‌شناسی سطوح ناهموار تولید شده به روش‌های مختلف، بر ویژگی‌های مکانیکی، نوری و الکتریکی مواد تأثیر گذارند و بیان دقیق این ساختارها را به یک هدف مهم تبدیل می‌کنند [۱۴-۱۲].

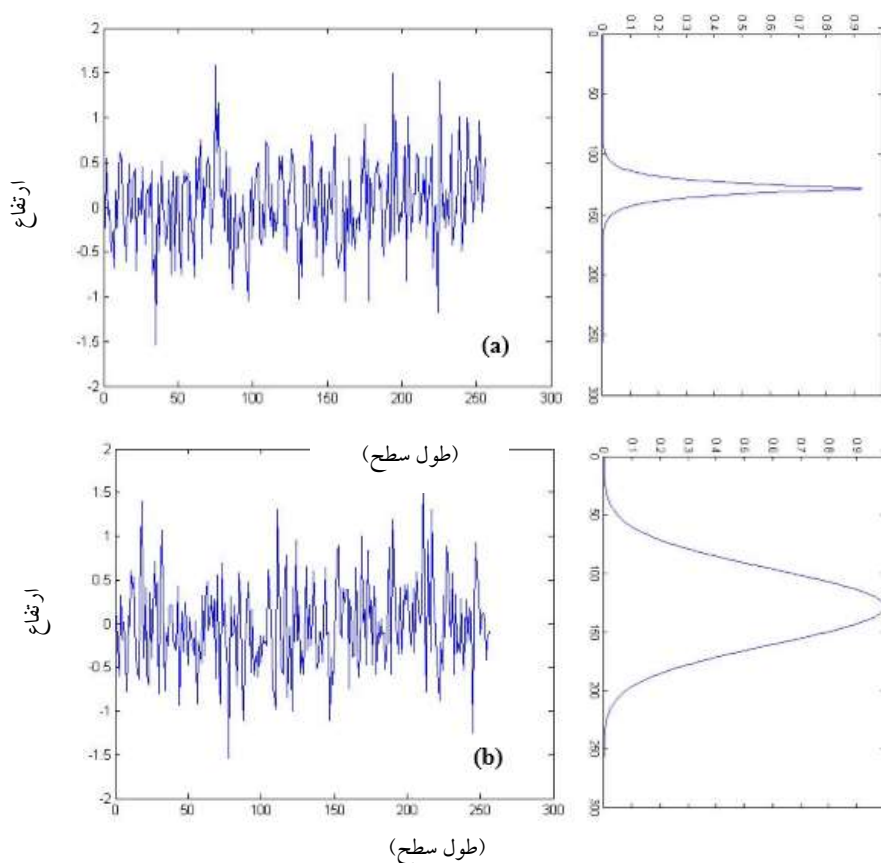
در کار حاضر، روشی ساده برای تولید توپوگرافی سطح ارائه شده است. مزیت اصلی این روش تولید توپوگرافی‌های سطحی با دو تابع همبستگی متفاوت است. در این کار، از کد فرترن و متلب برای شبیه‌سازی عددی مبتنی بر توصیف مناسب سطوح ناهموار به ویژه از نقطه نظر سه بعدی که می‌تواند اهمیت زیادی داشته باشد، استفاده شده است. در این مقاله، یک طرح عملی و ساده برای تولید سطوح ناهموار سه بعدی و تجزیه و تحلیل ویژگی‌های تماس توسعه داده شده است. به این ترتیب که الگوریتمی برای شبیه‌سازی رایانه‌ای برای تولید سطوح ناهموار (۱+۱) و (۱+۲) بعدی با



استفاده از یک مولد اعداد تصادفی ارائه شده است. سطوح رشد یافته دارای توزیع ارتفاع گاوسی با میانگین صفر هستند. توابع همبستگی در نظر گرفته شده برای سطوح دارای اشکال گاوسی و نمایی هستند. یک روش تبدیل فوریه سریع معکوس (FFT) برای ترکیب تابع همبستگی به داده‌های سطوح نمایی و گاوسی تولید شده استفاده شده است. در حالت کلی یک سطح ناهموار با استفاده از سه کمیت اصلی عرض ناهمواری، نمای ناهمواری و طول همبستگی مشخصه‌بندی می‌شوند. در کار حاضر، مقادیر ریشه میانگین مربع، طول همبستگی و نمای ناهمواری برای ارزیابی توابع همبستگی و توابع چگالی طیفی توان بررسی شده‌اند. همچنین، کلیه محاسبات برای سطوح همسانگرد و ناهمسانگرد انجام شده و مقادیر چولگی و کشیدگی سطوح ناهموار تولید شده گاوسی و نمایی محاسبه شده‌اند.

## ۲. شبیه‌سازی عددی سطوح ناهموار

توپوگرافی سطوح، نامنظم است و می‌توان آن را به خوبی با ویژگی‌های آماری سطوح مشخص کرد. برای تولید سطح ناهموار تصادفی یک بعدی با ۲۵۶ نقطه سطحی، در مرحله اول، توزیع سطح ناهموار تصادفی گاوسی ناهمبسته با میانگین صفر و مربع میانگین ریشه مشخص ( $\sigma$ ) تولید شد. شکل (۱)، نمایه‌های سطح نمایی و سطح گاوسی را نشان می‌دهد. شکل (۱- $a$ )، نمایه یک سطح ناهموار نمایی تولید شده با طول ۲۵۶ واحد (تعداد نقاط  $N=256$ )، که مقدار RMS آن معادل ۰.۵ واحد در نظر گرفته شده است، را نشان می‌دهد. در سمت راست نیز، تابع توزیع ارتفاع برای سطح نمایی بر حسب ارتفاع ترسیم شده است. شکل (۱- $b$ )، با داده‌های مشابه برای یک سطح ناهموار گاوسی تولید شده رسم شده است.

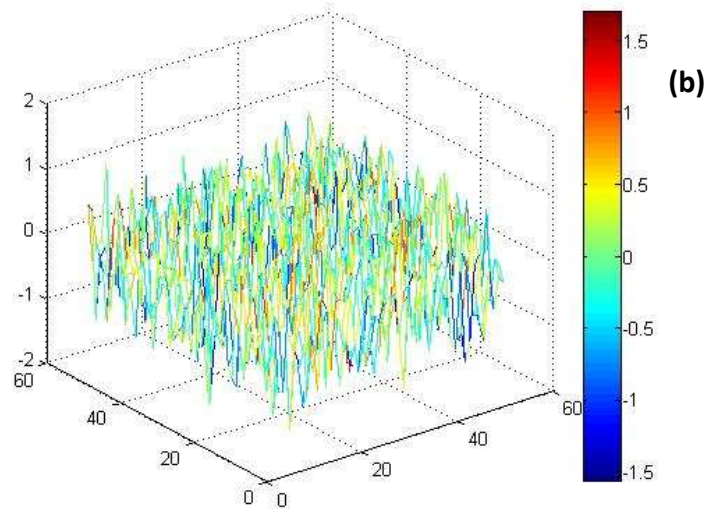
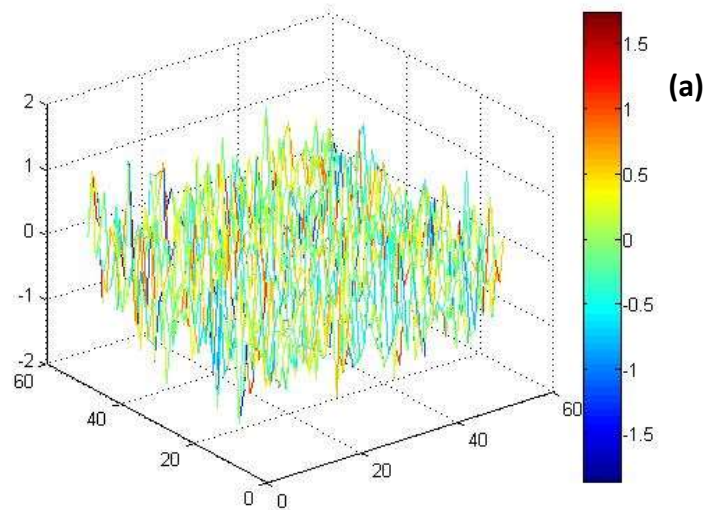


شکل ۱ پروفایل‌های سطوح ناهموار (الف) نمایی و (ب) گاوسی برای  $\sigma=0.5$ .

سپس پیش فاکتورهای عادی و یک FFT معکوس برای تولید سطح همبسته اعمال شد. همین مراحل برای تولید سطوح ناهموار تصادفی دو بعدی انجام شد. کمیت‌های  $\xi_x$  و  $\xi_y$ ، طول‌های همبستگی در جهت‌های X و Y هستند. مقادیر متفاوت و یکسان آن‌ها به ترتیب سطوح ناهموار غیرهمسانگرد و همسانگرد را نشان می‌دهد. ویژگی همسانگردی (ایزوتروپ) در شرایطی برقرار است که اندازه‌گیری در هر جهت فضایی، نتیجه‌ای یکسان داشته باشد. به عبارت دیگر، اگر آن کمیت در یک جهت از فضا اندازه‌گیری شود، همان مقدار برای آن در جهت دیگر نیز لحاظ گردد یا بدست آید. این امر در مورد ویژگی ناهمسانگردی برقرار نیست. سطوح ناهموار تصادفی یک بعدی و دو بعدی دارای توزیع ارتفاع گاوسی هستند، اما می‌توانند توابع همبستگی گاوسی یا نمایی داشته باشند. شکل‌های (۲) و (۳)، سطوح تصادفی (۱+۲) بعدی را نشان می‌دهند. تعداد نقاط روی

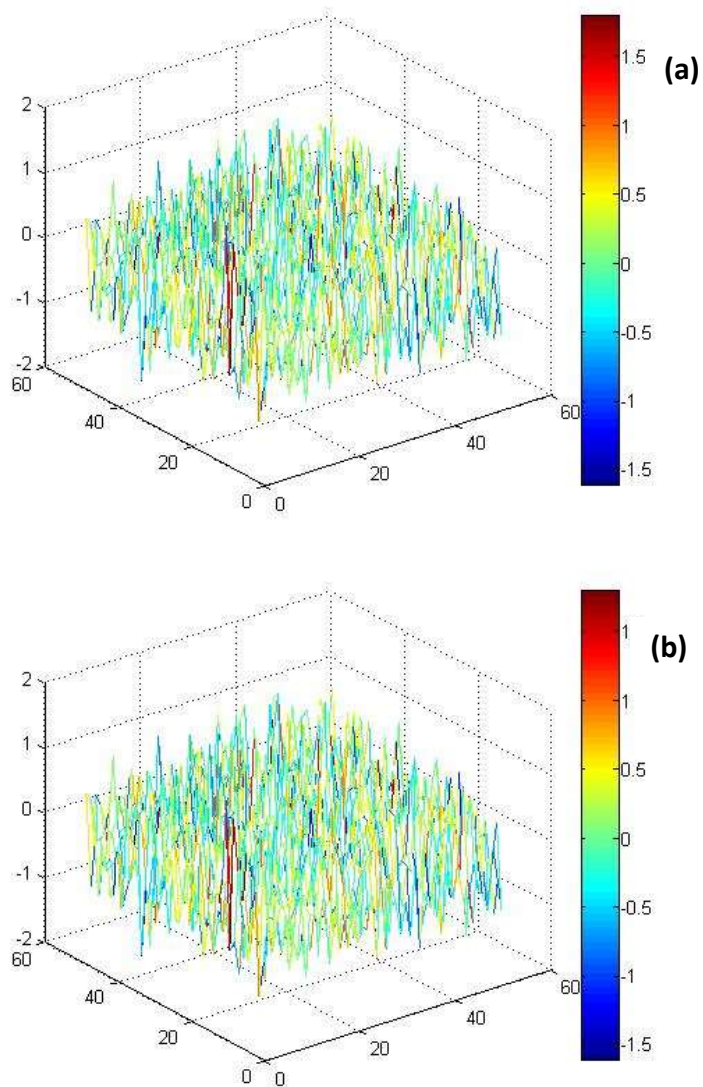


سطوح دوبعدی نشان داده شده ( $N=50$ ) است. همچنین، همانطور که در محور عمودی مشخص است، مقدار  $\sigma=0.5$  در نظر گرفته شده است تا تصادفی و ناهموار بودن سطوح تولید شده را برای (به عنوان مثال یک حالت) مقادیر طول همبستگی  $\xi=5\text{nm}$  نشان دهد.



شکل ۲ سطوح ناهموار همسانگرد (الف) گاوسی و (ب) نمایی.

در شکل (۳)، تمامی مقادیر ناهمواری مشابه شکل (۲) در نظر گرفته شده است. اما در این جا، به منظور تولید سطوح ناهمسانگرد، مقادیر طول های همبستگی در محاسبات، متفاوت ( $\xi_x = 5\text{nm}$  و  $\xi_y = 7/5\text{nm}$ ) در نظر گرفته شده اند.



شکل ۳ سطوح ناهموار ناهمسانگرد (الف) گاوسی و (ب) نمایی.



توزیع ارتفاع به عنوان انحراف یا ارتفاع گسترش از سطح صفحه مرجع (صاف) شناخته می‌شود. برخی از داده‌های تغییرات ارتفاع را می‌توان با دانستن متوسط ناهمواری سطح یافت، اما RMS شامل دانش همه‌جانبه از سطوح ناهموار نمی‌شود. از این رو، برای داشتن داده‌های جامعی در مورد ناهمواری سطوح، تابع همبستگی  $C(R)$  ارائه شده است. تابع  $C(R)$  نحوه تغییر ارتفاع نقطه در طول سطح را بیان می‌کند. بر این اساس،  $C(R)$  تغییرات و محدوده ارتفاع را در هر نقطه از سطح با ارتفاع در نقطه دیگر دورتر  $R$  تعریف می‌کند [۱۵]:

$$C(R) = \langle h(\chi_1)h(\chi_2) \rangle / \sigma^2, \quad (1)$$

که در آن،  $R = |\chi_1 - \chi_2|$  است. افزون بر ارتفاع RMS، تابع همبستگی برای بیان ریخت‌شناسی سطح استفاده می‌شود، زیرا سطوح با مقادیر  $\sigma$  یکسان، ریخت‌شناسی‌های متفاوتی دارند. این تابع روش تغییرات ارتفاع از ویژگی همبستگی ارتفاعات سطح را در دو موقعیتی که نقطه  $R$  در امتداد سطوح ناهموار قرار دارند، تعریف می‌کند. بر اساس معادله (۱)، برای  $(R \rightarrow \infty)$ ،  $C(R) = 0$  خواهد بود.

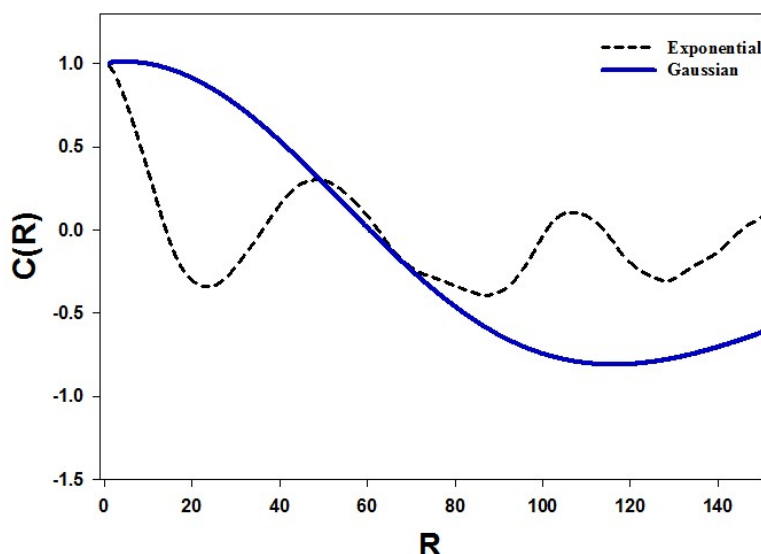
طول همبستگی ( $\xi$ ) کمیت مهمی است که روش همبستگی در امتداد سطح ناهموار را مشخص می‌کند. همچنین در تعریفی دیگر، طول همبستگی فاصله‌ای است که تابع همبستگی  $1/e$  از مقدار پیشینه خود را نشان می‌دهد [۱۵، ۱۶]. در ادامه تولید سطوح ناهموار با تابع همبستگی نمایی:

$$C(R) = e^{-|R|/\xi} \quad (2)$$

و تولید سطوح ناهموار با تابع همبستگی گاوسی نمایش داده می‌شود:

$$C(R) = e^{-R^2/\xi^2} \quad (3)$$

شکل (۴)، توابع همبستگی سطوح ناهموار نمایی و گاوسی بر حسب فاصله  $R$  را نشان می‌دهد.



شکل ۴ تابع همبستگی بر حسب فاصله R برای سطوح ناهموار گاوسی و نمایی تولید شده.

تابع  $C(R)$ ، با افزایش فاصله جداسازی در هر دو مورد گاوسی و نمایی کاهش می‌یابد. همچنین، مطابق شکل (۴)، تصادفی بودن اما همبسته بودن سطوح در هر دو مدل مشخص است.

## ۱.۲ تجزیه و تحلیل توزیع ارتفاع

بر اساس بررسی مونوفرنکتال، توزیع ارتفاع و گشتاورهای مرتبه ۳ و ۴ بالاتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند که به ترتیب چولگی<sup>۱</sup> و کشیدگی<sup>۲</sup> نامیده می‌شوند. ممان سوم توزیع ارتفاع (رابطه (۴)) چولگی نام دارد. این کمیت برای اندازه‌گیری توزیع تقارن ارتفاع سطح بوده و می‌تواند مقادیر مثبت یا منفی داشته باشد. مقادیر مثبت (منفی) به ترتیب توصیف می‌کنند که نقاط داده به سمت راست (چپ) میانگین داده‌ها انحراف دارند [۱۷].

$$Skewness = \frac{\langle (h-\bar{h})^3 \rangle}{\langle (h-\bar{h})^2 \rangle^{3/2}} \quad (4)$$

ممان مرتبه ۴ ارتفاع سطح به نام کشیدگی شناخته می‌شود. این پارامتر معیاری است که وضوح تابع توزیع ارتفاع را مشخص نموده و همچنین معیاری است برای چاقی  $(K < 3)$ ، یا تیزی  $(K > 3)$  قلّه احتمال و مقدار آن برای توزیع گاوسی معادل ۳ است [۱۷]:

<sup>1</sup> Skewness

<sup>2</sup> Kurtosis





$$Kurtosis = \frac{\langle (h-\bar{h})^4 \rangle}{\langle (h-\bar{h})^2 \rangle^2} \quad (5)$$

در جدول‌های ۱، ۲ و ۳، مقادیر اندازه‌گیری شده چولگی و کشیدگی ارائه شده است. نتایج برای حالت نمایی، وضوح و تیزی احتمال ( $K > 3$ ) را نشان می‌دهد و برای توزیع گاوسی معادل ۳ است.

**جدول ۱** مقادیر محاسبه شده کمیت‌های چولگی و کشیدگی سطوح گاوسی و نمایی (۱+۱) بُعدی.

	Kurtosis	Skewness
مقدار محاسبه شده برای سطح ناهموار (گاوسی)	۳/۰۰	-۰/۰۱۲
مقدار محاسبه شده برای سطح ناهموار (نمایی)	۳/۰۲	۰/۲۳

**جدول ۲** مقادیر محاسبه شده کمیت‌های چولگی و کشیدگی سطوح همسانگرد گاوسی و نمایی (۱+۲) بُعدی.

	Kurtosis	Skewness
مقدار محاسبه شده برای سطح ناهموار (گاوسی)	۲/۹۹	۰/۰۰۲
مقدار محاسبه شده برای سطح ناهموار (نمایی)	۲/۹۸	-۰/۰۰۹

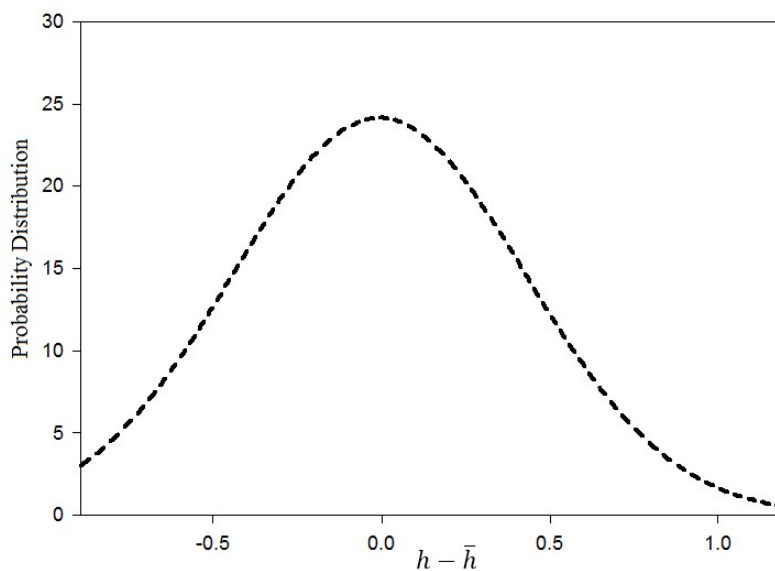
**جدول ۳** مقادیر محاسبه شده کمیت‌های چولگی و کشیدگی سطوح ناهمسانگرد گاوسی و نمایی (۱+۲) بُعدی.

	Kurtosis	Skewness
مقدار محاسبه شده برای سطح ناهموار (گاوسی)	۲/۹۹	۰/۰۰۹
مقدار محاسبه شده برای سطح ناهموار (نمایی)	۲/۹۸	-۰/۰۱۸

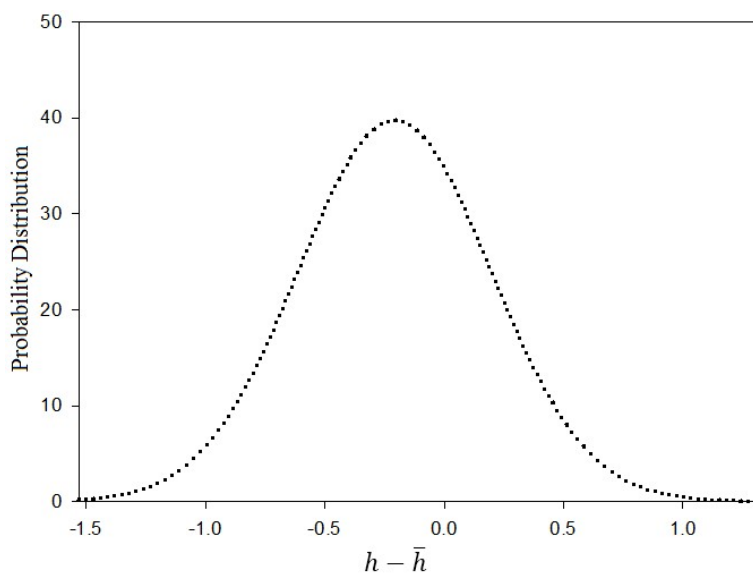
پروفایل‌هایی با قله‌های بلند (دره‌های کم عمق) و پروفایل‌هایی با دره‌های بزرگتر (نسبت به قله‌ها)، به ترتیب دارای مقادیر چولگی مثبت و منفی هستند [۱۰]. با تبدیل فوریه معادله (۱)، توزیع احتمال به صورت زیر نشان داده می‌شود [۹]:

$$P(k) = \frac{1}{2\pi} \int C(\ell) e^{ik \cdot \ell} d\ell \quad (6)$$

توزیع احتمال اندازه‌گیری است که نوع ارتفاع در امتداد سطح و گسترش ارتفاعات بالاتر از سطح متوسط را توصیف می‌کند. شکل طیف توان می‌تواند اطلاعات مفیدی در مورد ناهمواری پروفایل ارائه دهد (شکل‌های (۵) و (۶)). توزیع احتمال سطوح ناهموار با چولگی مثبت/منفی به ترتیب به سمت مثبت/منفی (ارتفاع نرمال شده) منحرف می‌شود [۹، ۱۶، ۱۷].



شکل ۵ توزیع احتمال ارتفاع سطح ناهموار نمایی (۱+۱) بُعدی.



شکل ۶ توزیع احتمال ارتفاع سطح ناهموار گاوسی (۱+۱) بُعدی.

نمایش ریاضی این شکل با گشتاوهای طیف توان در مورد سطح میانگین بدست می آید. بنابراین، توزیع ارتفاع نرمال شده  $P(h)$  ارائه می شود [۹].



## ۲.۲ نمای ناهمواری<sup>۱</sup>

سطوح رشد یافته ناصاف هستند و عرض سطوح زبری به صورت زیر بدست می آید:

$$w(L, t) = \sqrt{\langle (h(i, t) - \bar{h}(t))^2 \rangle} \quad (7)$$

در اینجا،  $h(i, t)$  ارتفاع سطح در محل  $(i)$  و در زمان  $(t)$  و  $\bar{h}(t)$  میانگین ارتفاع در زمان  $t$  است. در مدت زمان کافی طولانی، این سطوح اشباع می‌شوند، و سپس عرض زبری به اندازه زیرلایه به اندازه زیر وابسته خواهد بود [۱۱]:

$$w_L = L^H \quad (8)$$

$L$ ، نشان‌دهنده طول زیرلایه و نمای ناهمواری  $H$  است که برای تجزیه و تحلیل رفتار (صافی یا نامنظمی) سطوح ناهموار اشباع شده استفاده می‌شود [۱۱]. مقادیر بدست آمده برای این نما در جدول (۴) آمده است.

**جدول ۴** نماهای ناهمواری ( $H$ ) اندازه‌گیری شده برای سطوح ناهموار  $(1+1)$  بُعدی.

سطح ناهموار گاوسی	۰/۹۷
سطح ناهموار نمایی	۰/۹۱

مقدار این نما بیانگر میزان بی‌نظمی سطوح است. برای یک نمایه خود متشابه، یک قسمت بزرگ‌نمایی شده از سطح از نظر آماری معادل کل نمایه است. برای سطوح ناهموار سطوح خود متشابه، این نما در محدوده  $0 \leq H \leq 1$  است. همان‌طور که سطوح ناهموارتر و نامنظم‌تر می‌شوند، این نما مقدار کمتری دارد و برعکس [۱۶]. بر اساس نتایج جدول (۴)، سطوح دارای توابع همبستگی نمایی نامنظم‌تر (زبرتر) نسبت به سطوح گاوسی هستند.

## ۳.۲ بُعد فراکتال

توزیع بی‌نظمی سطوح فراکتال مشخصه مهمی است که می‌توان آن را با بُعد فراکتال سطح ( $df$ ) نشان داد. نمای ناهمواری با بُعد فراکتال رابطه مستقیم دارد و همان‌طور که پیش از این بیان شد، از ویژگی‌های پیچیدگی سطح است. روش‌های مختلفی برای یافتن  $df$  وجود دارد [۱۱، ۱۷]. در اینجا

<sup>۱</sup> Hurst Exponent

از  $df=D+1-H$  برای اندازه گیری بُعد فراکتال استفاده شده است [۱۷]. مقدار  $D$  به ترتیب برای پروفایل‌ها و سطوح ۱ و ۲ است. مقادیر  $df$  نمونه‌ها در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول ۵ بُعد فراکتال ( $df$ ) محاسبه شده برای سطوح ناهموار (۱+۱) بعدی.

سطح ناهموار گاوسی	۰/۲۳
سطح ناهموار نمایی	۰/۲۹

ویژگی‌ها یا رفتارهای مکانیکی، الکتریکی، نوری و سایر سطوح که در سطح تماس / سطح تماس ایجاد می‌شوند، زمانی که صحبت از ناهمواری باشد بیشتر به ریخت شناسی سطح بستگی دارند. بنابراین، مدل شبیه‌سازی عددی و توصیف سطوح ناهموار از اهمیت زیادی در کاربرد آنها برخوردار است [۲۰-۱۸].

### ۳. نتیجه‌گیری

در این مقاله، تولید عددی سطوح ناهموار گاوسی و غیرگاوسی با بافت سطحی همسانگرد و ناهمسانگرد پیشنهاد شده است. توابع همبستگی سطوح رشد یافته دارای شکل‌های گاوسی و نمایی است. برای سطوح (۱+۲) بُعدی، طول همبستگی یکسان (متفاوت) بوده است تا سطوح همسانگرد (ناهمسانگرد) تولید شوند. دو نوع تابع همبستگی با مقادیر مشخصی از طول همبستگی و RMS ترسیم شده‌اند. تابع همبستگی در هر دو مدل برابر انتظار، با افزایش فاصله جداسازی کاهش می‌یابد. همچنین، بر اساس رفتار این توابع، تصادفی بودن اما همبسته بودن سطوح در هر دو مدل مشخص است. مقادیر محاسبه شده برای کمیت‌های چولگی و کشیدگی این سطوح ناهموار تولید شده، با رفتار تابع توزیع احتمال هماهنگی کامل دارد. بر اساس نمای ناهمواری و بُعد فراکتال محاسبه شده، ناهمواری سطوح تولید شده بررسی شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، سطوح ناهموار با شکل‌های توابع همبستگی نمایی، بی‌نظمی و زبری بیشتری را نشان می‌دهند.



## منابع

- [1] Podulka P., "Resolving Selected Problems in Surface Topography Analysis by Application of the Autocorrelation Function.", *Coatings*, 13(1), 74, 2023. <https://doi.org/10.3390/coatings13010074>.
- [2] Bussea A., and Jelly T. O., "Effect of high skewness and kurtosis on turbulent channel flow over irregular rough walls.", *Journal of Turbulence*, 24, 2023. <https://doi.org/10.1080/14685248.2023.2173761>.
- [3] Panjan P., Drnovše K., "Special Issue: Surface Topography Effects on the Functional Properties of PVD Coatings", *Coatings*, 12, 1796, 2022. <https://doi.org/10.3390/coatings12121796>.
- [4] Song X-F., Tang H., Zhang Y., and Zheng S-X., "Special Issue: Surface Topography Effects on the Functional Properties of PVD Coatings.", *Measurement*, 203, 111972, 2022, <https://doi.org/10.3390/coatings12121796>.
- [5] Yang D., Tang J., F., and Zhou W., "Rough Surface Characterization Parameter Set and Redundant Parameter Set for Surface Modeling and Performance Research.", *Materials (Basel)*, 15(17), 5971, 2022. <https://doi.org/10.3390/ma15175971>.
- [6] Pérez-Ràfols F., Almqvist A., "Generating randomly rough surfaces with given height probability distribution and power spectrum.", *Tribology International* 131, 591, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.11.020>.
- [7] Gong Y., Misture S. T., Gao P., and Mellott N. P., "Surface Roughness Measurements Using Power Spectrum Density Analysis with Enhanced Spatial Correlation Length.", *J. Phys. Chem. C*, 120, 39, 22358, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.6b06635>.
- [8] Sedlaček M., Podgornik B., Vižintin J., "Correlation between standard roughness parameters skewness and kurtosis and tribological behaviour of contact surfaces.", *Tribology International*, 48, 102-112, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.11.008>.
- [9] Yang G., Li B., Wang Y. and Hong J., "Numerical Simulation of 3D Rough Surfaces and Analysis of Interfacial Contact Characteristics", *CMES*, 103, 251-279, 2014. <https://doi.org/10.3970/cmcs.2014.103.251>.
- [10] Urzica A. and Cretu S., "Simulation of the non-gaussian roughness with specified values for the high order moments", *J. Balk. Tribol. Assoc.*, 19, 91-400, 2013.
- [11] Barabasi A. L., and Stanley H. E., "Fractal Concepts in Surface Growth.", *Cambridge University Press*, New York, 1995.
- [12] Persson B. N. J., "Surface Roughness-Induced Stress Concentration.", *Tribology Letters*, 71, 29, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11249-023-01741-4>.
- [13] Dalvi S., Gujrati A., Khanal S.R., Pastewka L., Dhinojwala A., "Linking energy loss in soft adhesion to surface roughness.", *Jacobs T.D. B., PNAS*, 116, 25484, 2019. <https://doi.org/10.1073/pnas.1913126116>.
- [14] Persson B.N.J., Biele J., "Heat transfer in granular media consisting of particles in humid air at low confining pressure.", *AIP Adv.*, 12, 105307, 2022. <https://doi.org/10.1140/epjb/s10051-023-00483-5>.
- [15] Ogilvy J. A., and Foster J. R., "Rough surfaces: gaussian or exponential statistics? ", *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 22, 1243, 1989. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/22/9/001>.
- [16] Palasantzas G., Barnaś J., "Surface-roughness fractality effects in electrical conductivity of single metallic and semiconducting films.", *Phys. Rev. B*, 56, 7726-7731, 1997. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.56.7726>.
- [17] Zhao Y., Wang G-Ch., and Lu T-M., "Characterization of Amorphous and Crystalline Rough Surface: Principles and Applications", *Elsevier*, 2000.



- [18] Sanner A., N`ohring W. G., Thimons L. A., Jacobs T. D.B., Pastewka L., "Scale-dependent roughness parameters for topography analysis.", *Applied Surface Science Advances*, 7, 100190, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2021.100190>.
- [19] Gujrati A., et.al, "Comprehensive topography characterization of polycrystalline diamond coatings.", *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.*, 9, 014003, 2021. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/abe71f>.
- [20] Khanal S.R.,et.al, "Characterization of small-scale surface topography using transmission electron microscopy.", *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.*, 6, 045004, 2018. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/aae5b3>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



## تعیین عناصر کم‌مقدار در محصولات کشاورزی

### روستای چقای اراک، ایران<sup>۱</sup>

رضا پورایمانی<sup>۲\*</sup>، محمدحسین چوپان دستجردی<sup>۳</sup>، سعید قاهانی<sup>۴</sup> و مرضیه

مشایخی<sup>۵</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳

صص ۲۱ - ۴۰

#### چکیده:

همه انسان‌ها برای رشد به تغذیه سالم احتیاج دارند، به صورتی که کمبود یا فزونی عناصر کم‌مقدار سبب ایجاد بیماری‌هایی در انسان می‌شود. به همین دلیل آگاهی از وجود عناصر در مواد غذایی بسیار مهم است. به این دلیل که کارخانه تولید آلومینیوم اراک در جنب اراضی روستای چقا قرار دارد، مطالعه تأثیرات این کارخانه و سایر صنایع موجود در منطقه بر محصولات کشاورزی آن ضروری است. در این پژوهش غلظت ۱۱ عنصر آلومینیوم، برم، کلسیم، کلر، آهن، منیزیم، منگنز، پتاسیم، سدیم، اسکاندیم و روی در محصولات زراعی گندم، جو، نخود، لوبیا و یونجه تهیه شده از روستای چقای اراک با استفاده از روش آنالیز فعال‌سازی نوترونی و ۳ عنصر دیگر شامل آرسنیک، سرب و کادمیوم با استفاده از آنالیز پلاسمای جفت‌شده القایی مشخص شده‌اند. غلظت منیزیم از ۱۳۱۰ تا ۳۹۷۰، منگنز ۱۵٫۲ تا ۶۶٫۳، سدیم از ۱۴٫۲۰ تا ۱۴۹۰، آلومینیوم از ۵٫۷۲ تا ۹۱۴، کلر از ۳۶۴ تا ۱۲۰۰، کلسیم از ۴۱۳ تا ۲۹۶۰۰، برم از ۰٫۲۳ تا ۱۴٫۵۰، پتاسیم از ۴۷۴۰ تا ۱۴۷۰۰، آهن از ۱۰٫۱ تا ۱۳۱۰، اسکاندیم ۰٫۳۳ تا ۴٫۰۲۰، روی از ۲۷٫۷ تا ۹۷٫۶، آرسنیک از ۰٫۰۰۰ تا ۰٫۰۲۱، سرب از ۰٫۰۰۰ تا ۰٫۰۰۳ و کادمیوم از ۰٫۰۰ تا ۰٫۰۲ برحسب میلی‌گرم بر کیلوگرم بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که غلظت کلر، منگنز، منیزیم، آهن، سدیم، آلومینیوم، برم، کلسیم، اسکاندیم، روی و سرب در یونجه، غلظت پتاسیم در لوبیا چیتی، غلظت کادمیوم در جو و غلظت آرسنیک در گندم نسبت به سایر نمونه‌های آنالیز شده بیشتر است.

**واژگان کلیدی:** محصولات زراعی، عناصر کم‌مقدار، روش فعال‌سازی نوترونی، پلاسمای جفت‌شده القایی.

<sup>۱</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45958.1380>

<sup>۲</sup> استاد، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اراک، اراک، ایران. (نویسنده مسئول) Email: r-pourimani@araku.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار، پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشکده علوم و فنون هسته‌ای، اصفهان، ایران. Email: mdastjerdi@acoj.org.ir

<sup>۴</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اراک، اراک، ایران. Email: saeed.ghahani@gmail.com

<sup>۵</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه اراک، اراک، ایران. Email: marziyemashayekhi1@gmail.com



## ۱. مقدمه

عناصر کم مقدار در قالب ترکیبات شیمیایی هستند که به صورت طبیعی در پوسته زمین و موجودات زنده در غلظت‌های پایین وجود دارند. فعالیت‌های انسانی می‌تواند سطح عناصر کم مقدار را به صورت قابل توجهی در محیط افزایش دهد و در نهایت وارد زنجیره غذایی شود. این عناصر به عناصر ضروری، کم‌تاثیر و سمی تقسیم می‌شوند. عناصر کم مقدار سمی مانند کادمیوم، سرب، آرسنیک و جیوه هیچ نقش مثبتی در سیستم زیست‌شناختی ندارند و می‌توانند اثرات مضر بر سلامت انسان داشته باشند. از این رو، عناصر کم مقدار نقش بسیار مهمی در سلامت افراد جامعه دارد [۱]. خوردن غذا یک مسیر معمولی برای دریافت عناصر کم مقدار توسط انسان است و همان طور که می‌دانیم بیشتر منبع تامین این عناصر مصرف محصولات کشاورزی است که از راه خاک به عنوان بستر گیاه به گیاه و از گیاه به دام و انسان منتقل می‌گردد. امروزه لزوم توسعه صنعت و فناوری سبب شده تا صنایع به محل تولید محصولات کشاورزی نزدیک گردند. به صورتی که آلاینده‌های صنعتی سبب آلودگی خاک‌های کشاورزی و محیط اطراف آن‌ها شده و بر روی محصولات کشاورزی تاثیر می‌گذارد. بنابراین کشاورزی در مناطق شهری یا نزدیک به مناطق شهری نیاز به آزمایش‌های شیمیایی و سم شناسی مداوم برای جلوگیری از ورود خوراک آلوده به بدن انسان دارد [۲-۳]. عناصر کم مقدار مفید در صورتی که از مقدار معینی در بدن انسان کم تر باشد، موجب بروز بیماری و اگر از مقدار مشخصی بیشتر باشد، سبب مسمومیت افراد می‌گردد. بدن انسان برای عناصر سمی دارای آستانه تحمل معینی است و در صورتی که از آن مقدار تجاوز کند، سبب مسمویت و اثرات مضر در افراد می‌گردد. در سال‌های کنونی، مطالعات گسترده‌ای در زمینه اندازه‌گیری عناصر کم مقدار در مواد غذایی انجام شده است و سطح دانش بشری نسبت به کیفیت مواد غذایی به مراتب بهبود پیدا کرده است [۴-۷]. هدف پژوهش حاضر، مشخص کردن غلظت عناصر کم مقدار در برخی از محصولات کشاورزی روستای چقا می‌باشد که این روستا در نزدیکی کلان شهر صنعتی اراک قرار دارد.

## ۲. روش انجام کار

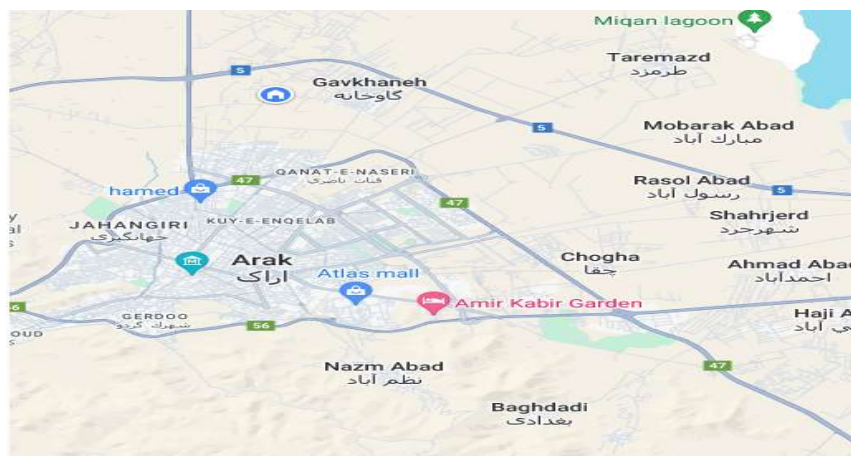
### ۱.۲ منطقه مورد مطالعه

"چقا" نام روستایی در ضلع جنوبی و همجوار اراک و جنب اداره برق باختر است. اصل اسم این روستا "چاه آقا" بوده است. این روستا در گذشته‌ها دارای اراضی بسیاری بوده به صورتی که از شمال غربی به اراک، از جنوب به روستای حسین آباد و بغدادی (که الان کارخانجات و مراکز





تجاری و تولیدات بسیاری مابین آن‌ها قرار گرفته) و از غرب به اراک و روستاهای قنات (که اکنون منطقه‌ای از اراک است) و مابین قنات تا چقا، سازمان تره بار اراک، مرکز تولید بذر چقا، و حوزه علمیه خاتم الانبیاء و دانشگاه پیام نور و برق باختر در هم‌جوار چقا قرار گرفته است. اطراف روستای چقا کارخانه‌های آلومینیوم ایران، ماشین‌سازی اراک، آذرباب، هپکو، شهرک صنعتی شماره ۱، قطب صنعتی اراک، شهرک صنعتی خیرآباد و شهرک صنعتی ایبک آباد بالغ بر ۲۵۰۰ واحد کارگاهی وجود دارند. شکل (۱) موقعیت جغرافیای روستای چقا در نزدیکی شهر اراک را نشان می‌دهد. چقا در گذشته دارای باغات انگور بسیاری بوده و محصولات کشاورزی آن گندم، جو، یونجه، هندوانه، پنبه و دام‌پروری بوده است اما امروزه در گندم و جو و یونجه و هندوانه محدود می‌باشد. صنایع ایجاد شده در اراک آسیب بسیار جدی به کشاورزی این روستا وارد کرده، به صورتی که باغات آن از بین رفته است. آب کشاورزی این روستا از ابتدا با قناتی که بیان شد، تأمین شده و همچنان به همان میزان دارای آب است و چاهی که به وسیله موتور استخراج و پس از سال‌های طولانی و بازسازی در سال‌های کنونی مجدداً مورد بهره‌برداری قرار گرفته است اما به خاطر وجود شهرنشینی و کارخانجات در اطراف چاه‌های آب قنات آب غیرقابل شرب است [۸-۹]. در این پژوهش عناصر کم‌مقدار موجود در ۵ نوع محصول کشاورزی شامل گندم، جو، نخود، لوبیاچیتی و یونجه تولیدی در روستای چقا تهیه گردید. در این مطالعه غلظت ۱۱ عنصر آلومینیوم، برم، کلسیم، کلر، آهن، منیزیم، منگنز، پتاسیم، سدیم، اسکاندیم و روی با استفاده از روش فعال-سازی نوترونی و ۳ عنصر دیگر شامل آرسنیک، سرب و کادمیوم با استفاده از آنالیز پلاسمای جفت‌شده القایی مشخص شدند.



شکل ۱ محل نمونه‌برداری و موقعیت روستای چقا.

## ۲.۲ نمونه برداری و آنالیز به روش پلاسمای القایی

در این مطالعه، ۵ نوع محصول کشاورزی شامل گندم، جو، نخود، لوبیاجیتی و یونجه از روستای چقای اراک تهیه گردید. نمونه‌ها با استفاده از آون ۸۰ درجه به مدت ۶ ساعت خشک شدند تا رطوبت موجود در آن‌ها از بین رود. سپس، با استفاده از هاون عقیق پودر گردیدند. یک سری نمونه برای بررسی از روش پلاسمای جفت شده القایی تهیه شد، که از هر نمونه مقدار ۲ گرم با ۲ سی سی هیدروکلریک اسید (با غلظت ۳۷ درصد) و ۲ سی سی نیتریک اسید (با غلظت ۶۵ درصد) در ظرف مخصوص ترکیب شد. نمونه‌ها برای هضم شدن به مدت یک ساعت در دستگاه هضم ماکروویو در دمای ۱۴۰ درجه سانتی گراد و فشار ۴۰ بار و قدرت ۹۰ وات قرار گرفتند. پس از آماده شدن نمونه‌ها، با استفاده از دستگاه مکنده وارد مه پاش شدند و به داخل دستگاه طیف سنجی انتشار اتمی پلاسمای جفت شده القایی تزریق گردیدند [۱۰]. دستگاه طیف سنج نوری (اسپکتروفوتومتر) پلاسمای جفت شده القایی AES-ICP مدل ۹۱۰۰ Quant Plasma، ساخت شرکت Jena Analytik کشور آلمان می‌باشد. در این دستگاه از جدیدترین آشکارساز CCD استفاده شده است که امکان دسترسی به هر خط انتشار در محدوده طیفی ۱۶۰ تا ۹۰۰ نانومتر را فراهم می‌کند. به دلیل قابل دستیابی بودن خطوط انتشار بدون تداخل با حساسیت بسیار بالا در دستگاه ICP-AES، امکان تجزیه و تحلیل عناصر کم مقدار در نمونه‌ها با اطمینان بالا وجود دارد. نرم افزار Aspect PQ تولید همین شرکت کل فرآیند ICP-AES در مدل ۹۱۰۰ Plasma Quant هدایت، نظارت و مستند می‌کند. این روش از جمله روش‌های طیف سنجی گسیلی اتمی است که در آن از راه جریان الکتریکی برای تغییر میدان مغناطیسی متغیر با زمان برای ایجاد القای الکترومغناطیسی و پدید آوردن محیط گرم پلاسمای استفاده می‌شود. تحریک اتم‌ها در این روش به کمک پلاسمای تولید شده توسط یک گاز نجیب (بیشتر آرگون و در موارد محدودی گاز هلیوم) صورت می‌گیرد [۵]. حساسیت این روش نسبت به روش‌های دیگر بسیار بیشتر است و از نظر حد تشخیص و تکرار پذیری به دلیل دارا بودن دمای ثابت خیلی بهتر است. با استفاده از این روش می‌توان غلظت بیشتر عناصر را در مقدار  $mg/kg$  و  $\mu g/kg$  اندازه گیری کرد [۱۰]. در این روش الکترودها کاملاً خارج از منطقه تحریک اتم‌ها هستند، بنابراین احتمال مزاحمت‌های شیمیایی در آن بسیار پایین است. چرا که، محیط شیمیایی خنثی و بدون اکسیداسیون است. در نتیجه، زمان ماندگاری پلاسمای بیشتر و حساسیت اندازه گیری نیز به مراتب بهتر است.



## ۳.۲ بررسی به روش فعال‌سازی نوترونی

روش بررسی فعال‌سازی نوترونی روشی قدرتمند برای بررسی نمونه و مشخص کردن کیفی و کمی عناصر موجود در نمونه است. اساس این روش بر پایه تبدیل عناصر پایدار موجود در نمونه به هسته‌های پرتوزا با استفاده از تابش‌دهی نمونه با نوترون‌ها در یک راکتور هسته‌ای است. این هسته‌های پرتوزا، متناسب با مشخصه نیمه‌عمرشان شروع به واپاشی می‌کنند و پرتوهای گاما با انرژی‌های مشخص و منحصر به فرد گسیل می‌کنند.

با مشخص کردن شمارش فوتون‌های گاما در قله‌های تمام انرژی، مقدار عنصر پایدار در نمونه محاسبه می‌گردد [۱۱]. برای این نوع بررسی به مقدار خیلی کمی از ماده در حد چند میلی‌گرم نیاز است و به صورت هم‌زمان می‌توان غلظت تعداد زیادی از عناصر را مشخص کرد [۶]. برای انجام این کار نمونه‌های پودر شده و از چهار نوع الک که آخرین شماره مش در حد میکرو بوده عبور داده شدند. نمونه‌های پودر به بخش راکتور مینیاتوری - پژوهشکده راکتور - مرکز اصفهان جهت پرتودهی و بررسی انتقال داده شدند. در مجموعه راکتور مینیاتوری اصفهان برای مشخص کردن مقدار عناصر از روش نسبی یا مقایسه‌ای استفاده می‌شود. در روش نسبی، نمونه مورد نظر با نمونه مرجع مقایسه می‌شود. نمونه مرجع نمونه‌ای است که غلظت عناصر موجود در آن، توسط سازمان بین‌المللی انرژی اتمی مشخص و گزارش شده است و با نمونه مجهول به صورت یکسان پرتودهی و شمارش می‌شوند.

جهت بسته‌بندی نمونه‌های مجهول و استاندارد از نایلون استفاده می‌شود، این نایلون‌ها به شکل مربعی با اضلاع ۶ سانتی‌متر هستند. با استفاده از یک ترازوی بسیار دقیق با دقت ۰/۵ میلی‌گرم میزان ۱۲۲ میلی‌گرم از نمونه‌ها در داخل نایلون قرار داده می‌شود. تعداد چهار و یا پنج نوع نمونه و نمونه استاندارد به عنوان نمونه شاهد به ترتیب برای تابش‌دهی طولانی مدت و کوتاه مدت بسته‌بندی و آماده شدند. با توجه به تنوع ایزوتوپ‌های با نیمه‌عمر متفاوت که در یک نمونه وجود دارند، تعداد سه نمونه از یک نوع برای شناسایی ایزوتوپ‌های با نیمه‌عمر کوتاه، متوسط و بلند پرتودهی می‌گردند. با توجه به نوع هسته پرتوزا و نیمه‌عمر آن برنامه‌ریزی برای طیف‌سنجی گاما انجام شد. هسته‌های پرتوزا با نیمه‌عمر کوتاه بلافاصله پس از خارج شدن با سامانه پنوماتیک به محفظه طیف‌سنجی ارسال می‌گردند. اگرچه، برای طیف‌سنجی هسته‌های پرتوزا با نیمه‌عمر متوسط و بلند، طیف‌گیری بعد از مدت مشخص صورت می‌گیرد تا در این مدت هسته‌های با نیم عمر کوتاه واپاشیده شده و مزاحمتی در طیف ایجاد نکنند که به این زمان، "زمان سرد شدن" می‌گویند. در جدول (۱) شرایط آزمایش و ثبت بیناب گاما و انرژی گامای مورد استفاده در مشخص کردن

ایزوتوپ مورد نظر داده شده است. برای محاسبه غلظت عناصر از رابطه (۱) استفاده می‌گردد که در آن  $C_S$  و  $C_R$  به ترتیب غلظت عنصر مورد نظر در نمونه و نمونه مرجع است.

$$C_S = C_R \frac{Act_S(e^{-\lambda t d})_R}{Act_R(e^{-\lambda t d})_S} \quad (1)$$

همچنین در این رابطه،  $Act_S$  و  $Act_R$  فعالیت هسته پرتوزا در نمونه و نمونه مرجع است که بر اساس شمارش تعداد فوتون زیر قله تمام انرژی مربوط به هسته پرتوزای تولیدی محاسبه می‌گردد،  $(e^{-\lambda t d})_R$  و  $(e^{-\lambda t d})_S$  به ترتیب ضریب واپاشی در نمونه مرجع و نمونه مورد مطالعه است و زمان سرد شدن نمونه می‌باشد [۱۱].

### ۱.۳.۲ طیف‌نگاری گاما

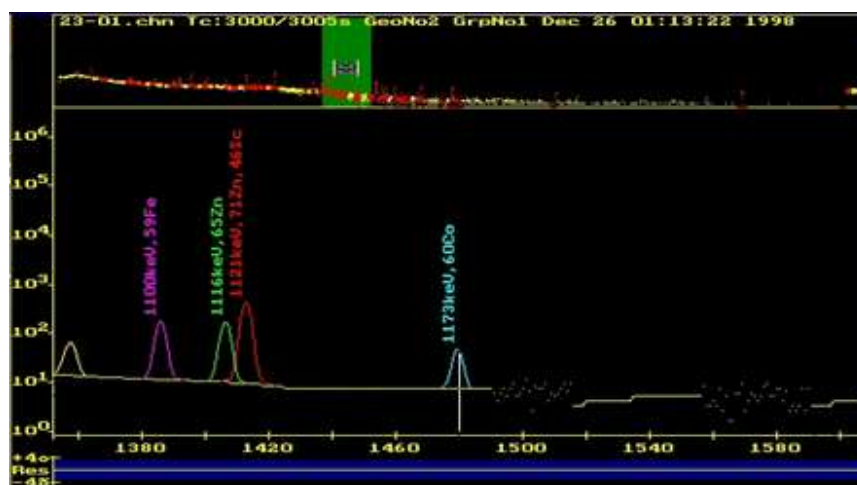
برای طیف‌سنجی گاما در این مطالعه از آشکارساز نیمه‌هادی فوق خالص ژرمانیوم (HPGe) ساخت شرکت EG&G ORTEC، مدل GEM-2180-P نوع POP-TOP استفاده شد. ولتاژ کاری این آشکارساز و نیم‌پهنای قله تمام انرژی گامای ۱۳۳۲ کیلو الکترون ولت متعلق به کبالت ۶۰ به ترتیب برابر ۳۰۰۰ ولت و ۲/۱ کیلو الکترون ولت بود. این آشکارساز به یک تقویت کننده تپ و به یک سامانه تجزیه و تحلیل کننده ۴۰۰۰ کاناله متصل است و طیف‌های ثبت شده با کمک نرم افزار SPAN ذخیره می‌گردد. در شکل‌های (۲) و (۳)، نمونه طیف‌های ثبت شده توسط این آشکارساز نشان داده شده است. طیف‌ها با استفاده از نرم‌افزار Gammavision Mastro II ساخت شرکت EG&G ORTEC تجزیه و تحلیل گردیدند. در این سامانه به کمک چشمه‌های مرجع کالیبراسیون بازدهی و انرژی انجام و غلظت عناصر با استفاده از مواد مرجع محاسبه شد [۱۲].

### ۳. نتایج و بحث

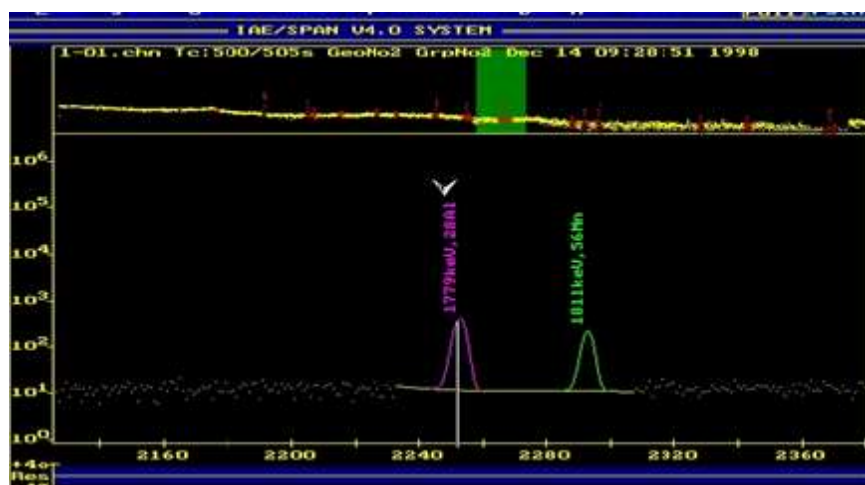
در شکل‌های (۲) و (۳) دو نمونه از طیف‌های ثبت شده نشان داده شده که نشان از کیفیت بالای طیف‌نگاری توسط این دستگاه دارد. در جدول (۱) شرایط پرتودهی و هسته‌های پرتوزای تولیدی مورد استفاده درج شده است. انرژی فوتون‌های گاما و نیمه عمر هسته‌های پرتوزای تولیدی در جدول آمده است [۱۳].



۲۷/ تعیین عناصر کم مقدار در محصولات کشاورزی روستای چقای اراک، ایران؛ رضا پورایمانی، محمدحسین چوپان، سعید قاهانی و ...



شکل ۲ طیف عناصر نمونه یونجه با نیمه عمر بلند.



شکل ۳ طیف عناصر نمونه لویاچیتی با نیمه عمر کوتاه.

جدول ۱ ایزوتوپ پرتوزا، نیمه عمر، انرژی گامای مشخصه، زمان پرتودهی و مدت زمان شمارش.

نماد عنصر	هسته پرتوزای تولید شده	زمان نیمه عمر	قله تمام انرژی پرتو گاما (keV)	شرایط اندازه گیری
Al	$^{28}_{13}\text{Al}$	۲,۲۴(m)	۱۷۷۸,۹۷	زمان تابش: ۱ دقیقه (زمان سرد شدن یک دقیقه) زمان شمارش: ۵۰۰ ثانیه شار نوترون: $۲,۵ \times 10^{11}$ ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
Mg	$^{27}_{12}\text{Mg}$	۹,۴۶(m)	۱۰۱۴/۵۲	
Ca	$^{49}_{20}\text{Ca}$	۸,۷۱۸(m)	۳۰۸۴/۴۰	
Cl	$^{38}_{17}\text{Cl}$	۳۷,۲۴(m)	۱۶۴۲,۶۶	
Mn	$^{56}_{25}\text{Mn}$	۲,۵۸(h)	۱۸۱۰,۷۶	
Na	$^{24}_{11}\text{Na}$	۱۴,۹۹۷(h)	۱۳۶۸,۶۲	
As	$^{76}_{33}\text{As}$	۲۶,۲۴(h)	۵۵۹,۱۰۱	زمان تابش: ۱ دقیقه (زمان سرد شدن دو روز) زمان شمارش: ۱۰۰۰ ثانیه شار نوترون: $۲,۵ \times 10^{11}$ ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
Br	$^{82}_{35}\text{Br}$	۳۵,۴(h)	۶۵۴,۷۵	
Zn	$^{65}_{30}\text{Zn}$	۲۴۴(d)	۱۱۱۵,۵۴۶	زمان تابش: ۵ ساعت (زمان سرد شدن ۸ روز) زمان شمارش: ۳۰۰۰ ثانیه شار نوترون: $۲,۵ \times 10^{11}$ ( $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
Cl	$^{51}_{24}\text{Cl}$	۲۷,۷۰۴(d)	۳۲۰,۰۸۲	
Sc	$^{46}_{21}\text{Sc}$	۸۳,۷۹(d)	۸۸۹,۲۷۱	

در جداول (۲) تا (۶)، غلظت عناصر اندازه گیری شده در نمونه ها بر حسب mg/kg با خطای اندازه گیری درج شده است. غلظت عناصر در نمونه ها، منیزیم از ۱۳۱۰ تا ۳۹۷۰، منگنز ۱۵,۲ تا ۶۶,۳، سدیم از ۱۴,۲ تا ۱۴۹۰، آلومینیوم از ۵,۷۲ تا ۹۱۴، کلر از ۳۶۴ تا ۱۲۰۰۰، کلسیم از ۴۱۳ تا ۲۹۶۰۰، برم از ۰,۲۳۴ تا ۱۴,۵، پتاسیم از ۴۷۴۰ تا ۱۴۷۰۰، آهن از ۱۰,۱ تا ۱۳۱۰، اسکاندیم ۰,۳۲۸ تا ۴,۰۲، روی از ۲۷,۷ تا ۹۷,۶، آرسنیک از ۰/۰۰۰ تا ۰,۰۲۱، سرب از ۰/۰۰۰ تا ۰,۰۰۳ و کادمیوم از ۰/۰۰ تا ۰,۰۲ بر حسب میلی گرم بر کیلوگرم، تغییر می کند.



برای مقایسه بهتر کمی عناصر، به صورت سه شکل متفاوت شامل عناصر میکرومعدنی، سمی و ماکرومعدنی به صورت نمودارهای ستونی فراوانی عناصر در نمونه‌ها در شکل‌های (۴) تا (۶) نشان داده شده است. همانطوری که در شکل‌های (۴) تا (۶) مشاهده می‌گردد، یونجه بیشترین غلظت عناصر را دارد و مقدار آلومینیوم در یونجه به ۹۱۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم می‌رسد که نسبت به غلات مناطق دیگر بیش از چند برابر است [۱۴]. این غلظت نشان می‌دهد که محصولات زراعی اطراف مناطق صنعتی اراک تحت تاثیر آلاینده‌های کارخانه تولید آلومینیوم قرار داشتند. افزایش آلومینیوم در خاک سبب کاهش بازده تولید محصولات کشاورزی می‌گردد [۱۵].

جدول ۲ غلظت عناصر کم‌مقدار در نمونه جو برحسب (mg/kg).

ردیف	نام عنصر	غلظت (mg/kg)	خطا ±
۱	Al	۷۳٫۹	۰٫۵
۲	As	BDL <sup>1</sup>	-
۳	Br	۱۰٫۱	۰٫۹
۴	Ca	۴۱۳	۳۳
۵	Cl	۱۱۸۰	۵۶
۶	Cd	۰٫۰۲۰	-
۷	Sc	۰٫۲۲۰	۰٫۰۲۸
۸	Pb	BDL	-
۹	Fe	۱۱۵	۲۱
۱۰	K	۵۱۱۰	۱۷۶
۱۱	Mg	۱۳۷۰	۴۹
۱۲	Mn	۲۴٫۷	۰٫۳
۱۳	Na	۳۱۰	۲۹
۱۴	Zn	۵۳	۲

<sup>1</sup> کمتر از حد تشخیص (Below Detection Level)

جدول ۳ غلظت عناصر کم مقدار در نمونه یونجه بر حسب (mg/kg).

ردیف	نام عنصر	غلظت (mg/kg)	خطا ±
۱	Al	۹۱۴	۲
۲	As	BDL	-
۳	Br	۱۴,۵	۰,۱
۴	Ca	۲۹۶۰۰	۶۷۸
۵	Cl	۱۲۰۰۰	۴۸۲
۶	Cd	۰,۰۰۲	-
۷	Sc	۴,۰۲	۰,۱۰
۸	Pb	۰,۰۰۳	-
۹	Fe	۱۳۱۰	۶۵
۱۰	K	۱۴۳۰۰	۸۴۵
۱۱	Mg	۳۹۷۰	۴۶۷
۱۲	Mn	۶۶,۳	۰,۵
۱۳	Na	۱۴۹۰	۵۴
۱۴	Zn	۹۷,۶	۴,۲





جدول ۴ غلظت عناصر کم‌مقدار در نمونه نخود برحسب (mg/kg).

ردیف	نام عنصر	غلظت (mg/kg)	خطا ±
۱	Al	۵٫۷۲	۰٫۱۶
۲	As	۰٫۰۱۱	-
۳	Br	۴٫۰۴	۰٫۰۶
۴	Ca	۱۲۸۰	۴۶
۵	Cl	۱۳۵۰	۵۱
۶	Cd	BDL	-
۷	Sc	۰٫۰۴۷۹	۰٫۰۱۰۵
۸	Pb	BDL	-
۹	Fe	۱۰٫۱	۲٫۱
۱۰	K	۹۷۶۰	۶۹۳
۱۱	Mg	۱۳۱۰	۵۵
۱۲	Mn	۲۴	۰
۱۳	Na	۳۵٫۸	۳٫۳
۱۴	Zn	۳۶٫۲	۲٫۴

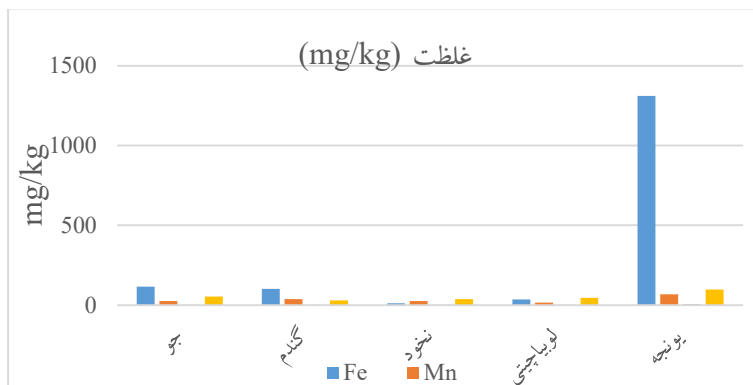
جدول ۵ غلظت عناصر کم مقدار در نمونه گندم بر حسب (mg/kg).

ردیف	نام عنصر	غلظت (mg/kg)	خطا ±
۱	Al	۵۸	۶
۲	As	۰,۰۲۱	-
۳	Br	۱,۱۶	۰,۰۵
۴	Ca	۵۷۳	۴۴
۵	Cl	۱۲۴۰	۵۸
۶	Cd	BDL	-
۷	Sc	۰,۲۲۰	۰,۰۲۹
۸	Pb	BDL	-
۹	Fe	۱۰۱	۱۸
۱۰	K	۴۷۴۰	۳۴۱
۱۱	Mg	۱۵۵۰	۷۷
۱۲	Mn	۳۷,۲	۵,۳
۱۳	Na	۳۲۰	۳۲
۱۴	Zn	۲۷,۷	۲,۱

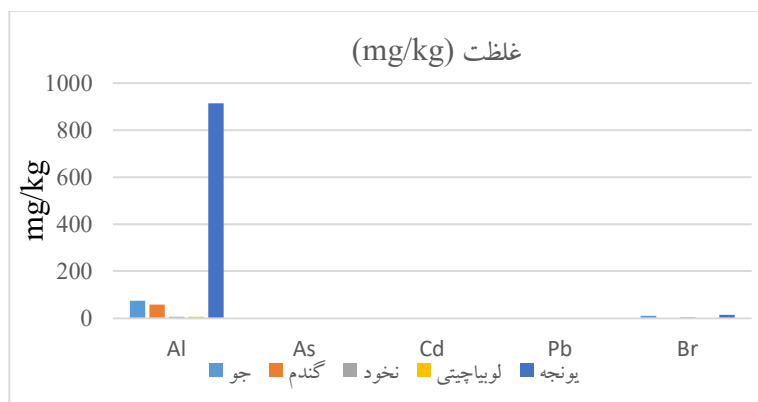


جدول ۶ غلظت عناصر کم‌مقدار در نمونه لوبیا چیتی برحسب (mg/kg).

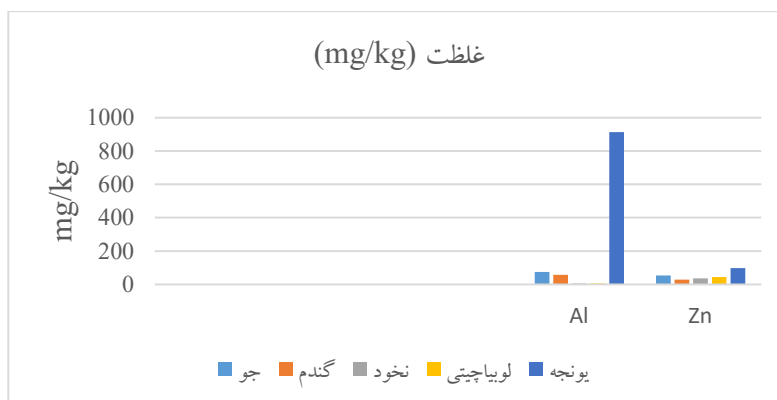
ردیف	نام عنصر	غلظت (mg/kg)	خطا ±
۱	Al	۵٫۹۷	۰٫۱۴
۲	As	BDL	-
۳	Br	۰٫۲۳۴	۰٫۰۲۸
۴	Ca	۱۳۲۰	۴۱
۵	Cl	۳۶۴	۱۰
۶	Cd	BDL	-
۷	Sc	۰٫۰۳۳	۰٫۰۰۷
۸	Pb	BDL	-
۹	Fe	۳۵	۸
۱۰	K	۱۴۷۰۰	۵۴۰
۱۱	Mg	۲۱۱۰	۷۹
۱۲	Mn	۱۵٫۲	۲٫۲
۱۳	Na	۱۴٫۲	۲٫۱
۱۴	Zn	۴۴٫۸	۲٫۷۳



شکل ۴ میکرومعدنی‌ها در نمونه‌ها بر حسب (mg/kg).



شکل ۵ عناصر سمی در نمونه‌ها بر حسب (mg/kg).



شکل ۶ ماکرومعدنی‌ها در نمونه‌ها بر حسب (mg/kg).



### ۱.۳ میانگین و حد مصرف گندم و عناصر کم‌مقدار گندم

طبق اعلام سازمان خوارو بار جهانی (FAO)، مصرف سرانه گندم در ایران ۴۵۸ گرم در روز و میانگین مصرف سالانه آن ۱۶۷/۸ کیلوگرم است که از میانگین جهانی (۵۷ کیلوگرم) به مراتب بالاتر است. از آنجایی که نان قوت غالب ایرانیان است، با محاسبه مقدار عناصر کم‌مقدار در ۴۵۸ گرم گندم به میزان دریافت آن توسط بدن با وزن ۷۰ کیلوگرم بر حسب درصد در جدول (۷) درج شده است. مقدار آستانه تحمل برای عناصر سمی و غیرضروری و مقدار ضروری برای عناصر مفید در کمیته مشترک سازمان بهداشت جهانی (WHO) و سازمان خوار و بار جهانی (FAO) درج شده است [۱۶]. که در این جدول (۷)، مقدار آلومینیوم دریافتی ۳۸ درصد آستانه تحمل و منیزیم ۲۲۱ درصد نیاز بدن می‌باشد. با مقایسه جدول (۷) و مقدار مورد نیاز بدن انسان به صورت روزانه به عناصر کم‌مقدار در فصل اول، نتیجه می‌شود که گندم غنی از مواد ضروری یا عناصر کم‌مقدار ضروری چون منیزیم است. این به این معناست که با مصرف روزانه گندم می‌توان مواد ضروری بدن را تأمین کرد، حتی این جدول (۷) نشان می‌دهد که عنصر کم‌مقدار سمی مانند بُرم به مقدار کمی در گندم وجود دارد.

جدول ۲ مقدار درصد میانگین عناصر کم مقدار در گندم.

مصرف روزانه گندم (g/day)	غلظت (mg/kg)	مقدار تامین میانگین عناصر کم مقدار از طریق مصرف گندم (%)	مقدار مورد نیاز یا آستانه تحمل برای انسان [۱۶] (mg)	نام عنصر
۴۵۸	۵۸	۳۸	۷۰	Al
۴۵۸	۱۶/۱	۱۰/۵	۷۰	Br
۴۵۸	۵۷۳	۱۰/۵	۲۵۰۰	Ca
۴۵۸	۱۲۴۰	۵۷	۱۰۰۰	Cl
۴۵۸	۱۵۵۰	۲۲۱	۳۵۰	Mg
۴۵۸	۲/۳۷	۱۰	۱۱	Mn
۴۵۸	۳۲۰	۶/۴	۲۳۰۰	Na
۴۵۸	۲۷/۷	۳۱/۷	۴۰	Zn

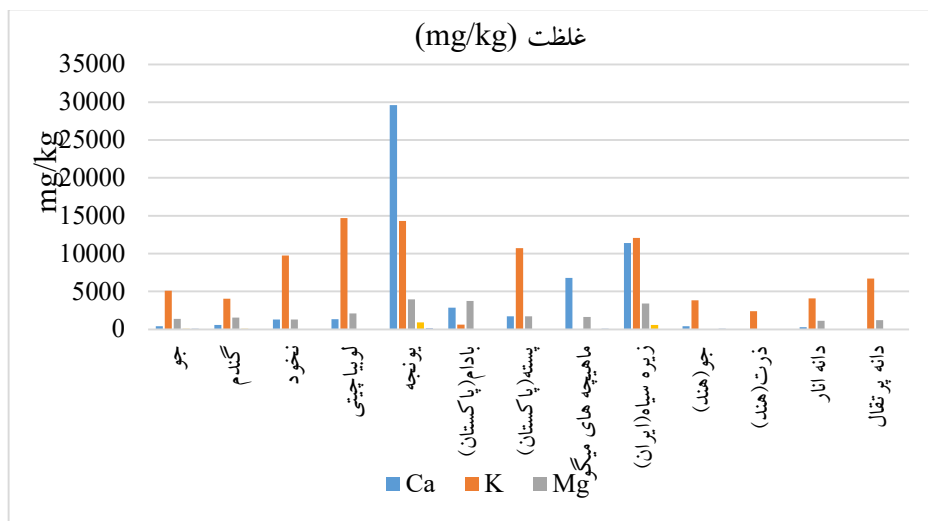
### ۲.۳ مقایسه نتایج بدست آمده از محصولات کشاورزی در این پژوهش با کشورهای مختلف

جدول (۸) و شکل (۷) مقایسه محصولات کشاورزی مورد پژوهش با برخی محصولات غذایی کشورهای مختلف را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، غلظت برخی عناصر مورد مطالعه بیشتر از سایر مواد غذایی در محصولات کشاورزی کشورهای مختلف است. غلظت کلسیم در جو کشت شده کمتر از جو کشت شده در هند است و غلظت آلومینیوم، منیزیم و کلسیم در یونجه و غلظت پتاسیم در لویا چیتی و غلظت روی در یونجه مورد مطالعه بیشتر از سایر محصولات کشورهای دیگر است [۲۰-۱۷].



**جدول ۸** مقایسه بین محصولات مورد مطالعه و برخی محصولات غذایی کشورهای مختلف بر حسب (ppm).

نام نمونه	غلظت (mg/kg)					منابع
	Zn	Mg	K	Ca	Al	
روش اندازه گیری						
بادام (پاکستان)	۱۲٫۴	۲۸۴۱	۶۰۲	۳۷۳۵	-	[۱۷]
جو (لتونی)	۴/۸۳	۷۹۴	۴۰۸۶	۱۴۵۳	۲۹/۶	[۱۸]
یونجه		۲۵۰۰	۲۴۰۰۰	۲۲۶۵	۱۶/۳۲	[۱۹]
جو (هند)	-	۳۹۰	۳۸۴۰	-	۵۴٫۱	[۲۰]
ذرت (هند)	-	۴۸	۲۳۹۰	-	۱۴٫۵	[۲۰]
جو	۷۳٫۹	۳۱۰	۵۱۱۰	۱۳۷۰	۵۳	در این مطالعه فعال سازی نوترونی و ICP-AES
یونجه	۹۱۴	۲۹۶۰۰	۱۴۳۰۰	۳۹۷۰	۹۷٫۶	در این مطالعه فعال سازی نوترونی ICP-AES
نخود	۵٫۷۲	۳۵٫۸	۹۷۶۰	۱۳۱۰	۳۶٫۲	در این مطالعه فعال سازی نوترونی ICP-AES
گندم	۵۸	۳۲۰	۴۷۴۰	۱۵۵۰	۲۷٫۷	در این مطالعه فعال سازی نوترونی ICP-AES
لوبیا چیتی	۵٫۹۷	۱۴٫۲	۱۴۷۰۰	۲۱۱۰	۴۸٫۸	در این مطالعه فعال سازی نوترونی ICP-AES



شکل ۷ نمودار ستونی مقایسه بین محصولات مورد مطالعه و برخی محصولات غذایی کشورهای مختلف برحسب (mg/kg).

#### ۴. نتیجه گیری

نتایج بدست آمده و تجزیه و تحلیل آن‌ها نشان می‌دهد که منطقه تحت تاثیر آلاینده‌های صنعتی به ویژه گازهای متصاعد شده از کارخانه تولید آلومینیوم قرار گرفته است. غلظت کلر، منگنز، منیزیم، آهن، سدیم، آلومینیوم، برم، کلسیم، اسکاندیم در یونجه از سایر نمونه‌ها بیشتر است. غلظت پتاسیم در لوبیا چیتی بیشتر از دیگر نمونه‌هاست. غلظت کادمیم در جو و غلظت آرسنیک در گندم و سرب و روی در یونجه بیشتر از نمونه‌های مورد بررسی است. با توجه به میانگین مصرف مواد غذایی مقدار عناصر سمی از مقدار آستانه تحمل بیشتر نیست و بنابراین خطری سلامتی افراد را تهدید نمی‌کند.

#### ۵. تشکر و قدردانی

این طرح با حمایت مالی شورای پژوهشی دانشگاه اراک و مرکز پژوهشگاه و توسعه راکتورهای هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران واحد اصفهان انجام شده است. بدین وسیله نویسندگان کمال سپاس‌گزاری و امتنان خود را از حامیان مالی این پروژه اعلام می‌دارند.





## منابع

- [1] El Youssfi, M., Sifou, A., Ben Aakame, R., Mahnine, N., Arsalane, S., Halim, M., Laghzizil, A. and Zinedine, A., "Trace elements in Foodstuffs from the Mediterranean Basin- Occurrence, Risk Assessment, Regulations, and Prevention strategies: A review". *Biol Trace Elem Res* 201, 2597-2626, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12011-022-03334-z>
- [2] Abbey, L., Ijenyo, M., Spence, B., Asunni, A.O., Ofoe, R. and Amo-Larbi, V., "Bioaccumulation of trace elements in vegetables grown in various anthropogenic conditions.", *Foods and Raw Materials*, 11(1), 10-16, 2023. <https://doi.org/10.1139/cjps-2020-0291>
- [3] Pecina, V., Brtnický, M., Baltazár, T., Juříčka, D., Kynický, J. and Galiová, M.V., "Human health and ecological risk assessment of trace elements in urban soils of 101 cities in China: a meta-analysis.", *Chemosphere* 267, 129215, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129215>
- [4] Fageria, N.K., Baligar, V.C. and Clark, R.B., "Micronutrients in crop production.", *In Advances in Agronomy*, 77, 185-268, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)77015-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)77015-6)
- [5] Keshavarzi, B., Moore, F., Ansari, M., Rastegari Mehr, M., Kaabi, H. and Kermani, M., "Macronutrients and trace metals in soil and food crops of Isfahan Province, Iran.", *Environ. Monit. Assess.*, 187, 4113, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-4113-y>
- [6] Singh, B.R., Gupta, S.K., Azaizeh, H., Shilev, S., Sudre, D., Song, W.Y., Martinoia, E. and Mench, M., "Safety of food crops on land contaminated with trace elements.", *Journal of the science of food and agriculture*, 91(8), 1349-1366, 2011. <https://doi.org/10.1002/jsfa.4355>
- [7] Kornblith, E.S., Casey, S.L., Lobdell, D.T., Colledge, M.A. and Bowler, R.M., "Environmental exposure to manganese in air: Tremor, motor and cognitive symptom profiles.", *Neurotoxicology*, 64, 152-158, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2017.09.012>
- [8] Amado Lapeña, L., "Análisis del algoritmo PageRank: fundamento algebraico del orden de las búsquedas en Google.", 2021. [https://fa.wikipedia.org/wiki/%DA%86%D9%82%D8%A7\\_\(%D8%A7%D8%B1%D8%A7%DA%A9\)](https://fa.wikipedia.org/wiki/%DA%86%D9%82%D8%A7_(%D8%A7%D8%B1%D8%A7%DA%A9))
- [9] The results of Iran's census in 2005. {National Portal of Statistics: Archived from the original version on 12. November 2013.
- [10] Shunko, E.V., Stevenson, D.E. and Belkin, V.S., "Inductively Coupling Plasma Reactor with Plasma Electron Energy Controllable in the Range from ~6 to ~100 eV.", *IEEE Transactions on Plasma Science*, 42(3), 774-785, 2014.
- [11] Thompson, M., "Recent trends in inter-laboratory precision at ppb and sub-ppb concentrations in relation to fitness for purpose criteria in proficiency testing.", *Analyst* 125(3), 385-386, 2000. <https://doi.org/10.1039/b000282h>
- [12] Gilmore, G., "Practical Gamma-Ray Spectrometry", *John Wiley & Sons*, 2008. <https://doi.org/10.1002/9780470861981>
- [13] Firestone, R.B., Shirley, V.S., Baglin, C.M., Chu, S.Y. and Zipkin, J., "The 8th edition of the Table of Isotopes.", *In Proceedings of the 9th International Symposium on Capture gamma-ray spectroscopy and related topics*, 2, 1997.
- [14] Singh, V. and Garg, A.N., "Availability of essential trace elements in Indian cereals, vegetables and spices using INAA and the contribution of spices to daily dietary intake.", *Food chemistry*, 94(1), 81-89, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.10.053>



- [15] Shetty, R., Vidya, C.S.N., Prakash, N.B., Lux, A. and Vaculík, M., "Aluminum toxicity in plants and its possible mitigation in acid soils by biochar: A review", *Science of The Total Environment*, 765, 142744, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142744>
- [16] Joint, F.A.O., "World Health Organization, and WHO Expert Committee on Food Additives", Evaluation of certain food additives and contaminants: seventy-third [73rd] report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. *World Health Organization*, 2011.
- [17] Waheed, S., Siddique, N. and Rahman, A., "Trace element intake and dietary status of nuts consumed in Pakistan: study using INAA.", *Radiochimica Acta*, 95(4), 239-244, 2007. <https://doi.org/10.1524/ract.2007.95.4.239>
- [18] Jakobsone, I., Zute, S., Bleidere, M., Kantane, I., Ece, L. and Bartkevics, V., "Macro and trace elements in oat cultivars bred in Latvia.", *Zemdirbyste-Agriculture*, 106(1), 21-28, 2019. <https://doi.org/10.13080/z-a.2019.106.003>
- [19] Karayilanli, E. and Ayhan, V., "Investigation of feed value of alfalfa (*Medicago sativa* L.) harvested at different maturity stages.", *Legume Research-An International Journal*, 39(2), 237-247, 2016. <https://doi.org/10.18805/lr.v0i0F.9292>
- [20] Singh, V. and Garg, A.N., "Availability of essential trace elements in Indian cereals, vegetables and spices using INAA and the contribution of spices to daily dietary intake.", *Food chemistry*, 94(1), 81-89, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.10.053>



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



## طراحی و ساخت دستگاه تولید پلاسما به روش تخلیه سد دی الکتریک سطحی (SDBD) در مقیاس آزمایشگاهی<sup>۱</sup>

آمنه کارگریان<sup>۲</sup>، سولماز جمالی<sup>۳\*</sup> و مهدی بخش زاد محمودی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۲  
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۵  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۹

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران  
دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا  
سال چهاردهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳  
صص ۴۱ - ۵۲

### چکیده:

در این مقاله، هدف طراحی و ساخت دستگاه تولید پلاسما به روش تخلیه سد دی الکتریک سطحی (SDBD) در مقیاس آزمایشگاهی به منظور تولید لایه‌ای از پلاسما فشار اتمسفری پایدار و یکنواخت است. بدین منظور الکترود مسی با ضخامت ۱۰۰ میکرون با ساختار شانه‌ای برای این سامانه طراحی و ساخته شد. برای ساخت دی الکتریک نیز از ورقه میکا با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر با ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. با توجه به داده‌های تجربی و محاسبات تحلیلی برای اندازه‌گیری توان مصرفی سامانه SDBD ساخته شده، در شرایط کاری ولتاژ ۷ کیلوولت و فرکانس ۱۲/۵ کیلوهرتز، توان مصرفی این سامانه برابر با ۵۰ وات محاسبه شد. همچنین، با استفاده از طیف‌سنجی نشر نوری، طیف بدست آمده از پلاسما مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به تولید پلاسما پایدار و یکنواخت ایجاد شده بر روی سطح دی الکتریک و توان مصرفی اندازه‌گیری شده‌ی قابل قبول، این سامانه توانایی استفاده در علوم و صنایع مختلف از جمله صنایع پردازش سطوح را خواهد داشت.

**واژگان کلیدی:** پلاسما یکنواخت، تخلیه سد دی الکتریک سطحی، توان مصرفی، ساختار شانه‌ای شکل.

<sup>۱</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45959.1379>

<sup>۲</sup> استادیار، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. Email: kargarian@aeoi.org.ir

<sup>۳</sup> دانش‌آموخته دکترا، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران (نویسنده مسئول).

Email: s.jamali62@yahoo.com

<sup>۴</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران. Email:

bakhshzad@gmail.com



## ۱. مقدمه

ویژگی‌های منحصر به فرد پلاسما امکان استفاده از آن را به صورت گسترده در زمینه‌های گوناگون مهیا ساخته است. از نقطه نظر فشار، پلاسما را می‌توان به دو دسته کلی پلاسما فشار پایین و پلاسما فشار اتمسفری تقسیم‌بندی کرد. در حال حاضر، پلاسما فشار اتمسفری به دلیل سادگی و هزینه کم آن نسبت به پلاسماهای فشار پایین مورد توجه زیادی قرار گرفته است و به دلیل دمای پایین و توانایی تولید گونه‌های فعال می‌تواند در زمینه‌های مختلف صنعتی، پزشکی و زیستی به کار رود [۱].

یکی از روش‌های تولید پلاسما سرد، تخلیه سد دی‌الکتریک (DBD) است. این روش توانایی تولید پلاسما غیرحرارتی حتی در هوای محیط را داراست که برای پردازش صنعتی مواد حساس به حرارت چون فویل‌های پلیمری چند لایه از اهمیت بالایی برخوردار است. به صورت همه‌جانبه، تخلیه سد دی‌الکتریک بین دو الکتروود که حداقل یکی از آن‌ها با یک لایه دی‌الکتریک پوشانده شده است، صورت می‌گیرد. این تخلیه با اعمال ولتاژ بالای متناوب در حد چندین کیلوولت با فرکانس ۵۰ هرتز تا چندین کیلوهرتز بین دو الکتروود انجام می‌گردد. وجود دی‌الکتریک مانع از عبور جریان بالا میان دو الکتروود و شکل‌گیری تخلیه قوسی می‌گردد [۲]. در حقیقت، این نوع تخلیه سبب تولید پلاسما سرد فشار اتمسفری می‌شود. نخستین پژوهش‌ها در این زمینه توسط زیمنس در حدود سال‌های ۱۸۵۷ انجام شد که بیشتر تمرکز آن در جهت تولید ازن بوده است [۳].

تخلیه سد دی‌الکتریک دارای کاربردهای متنوعی می‌باشد. به همین منظور و متناسب با کاربرد دارای پیکربندی و ساختار متفاوتی از جمله تخلیه حجمی<sup>۲</sup> و تخلیه سطحی<sup>۳</sup> است. یک گروه پژوهشی در سال ۲۰۱۷ به مقایسه DBD حجمی و DBD سطحی در تولید ازن پرداختند. آن‌ها ساختارهای مولدهای پلاسمایی مدنظر را طراحی و ساختند. بر اساس نتایج بدست آمده، آن‌ها گزارش کردند که هرچند DBD حجمی در صنعت به صورت گسترده‌ای برای تولید ازن استفاده می‌شود اما بازده DBD سطحی در تولید ازن بسیار بهتر از DBD حجمی می‌باشد. از طرف دیگر بازده انرژی پلاسما تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی به صورت قابل ملاحظه‌ای بالاتر از راکتور حجمی است [۴]. همچنین، در پژوهش دیگری، رابطه عملکردی بین ویژگی‌های مواد، فرکانس اعمالی و میزان

<sup>1</sup> Dielectric Barrier Discharge

<sup>2</sup> Volume Discharge

<sup>3</sup> Surface Discharge



تولید ازن برای تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی در اتمسفر هوا مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، دی‌الکتریک‌های مختلف از جمله آلومینا، سرامیک PTFE، هیدروکربن و پلیمر بلور مایع مورد مطالعه قرار گرفتند [۵].

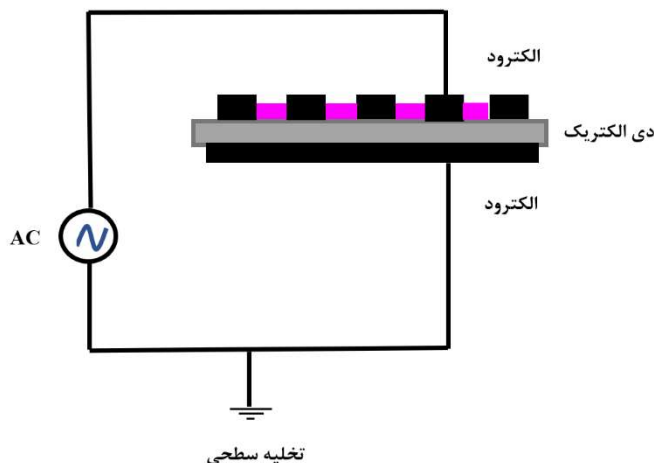
مطالعات سال‌های کنونی نشان دادند، از پلاسما تولید شده به روش تخلیه سطحی (SDBD) می‌توان برای بسیاری از کاربردها از جمله پردازش سطح با لایه‌ای از پلاسما نازک از مرتبه  $0/1$  میلی‌متر استفاده کرد که بسیار مفیدتر از حجم‌های کم‌بیش بزرگ پلاسما تولید شده با استفاده از ساختار تخلیه سد دی‌الکتریک حجمی است. افزون بر یکنواختی، امکان تولید پلاسما پایدار در هوا و سایر گازهای فعال با کمک SDBD وجود دارد. سایر مزایای ذاتی سامانه‌های SDBD شامل سادگی، استحکام و توانایی پردازش در طیف گسترده‌ای از گازهای فعال است. همچنین، SDBDها روشی مؤثر برای کاربردهای مختلف از جمله بهبود ویژگی‌هایی مانند آب‌دوستی سطح در زمان‌های بسیار کوتاه می‌باشند. بنابراین، چنین سامانه‌ای می‌تواند در کاهش زمان پردازش با پلاسما و مصرف انرژی بسیار قابل توجه باشد. افزون بر این، استفاده از پلاسما سرد فشار اتمسفری به روش SDBD بدون تأثیر بر بخش بیشتر زیرلایه به صورت قابل توجهی ویژگی‌های سطحی مختلف چون رطوبت و چسبندگی را تغییر می‌دهد و اغلب ریخت‌شناسی سطح را بهبود می‌بخشد. همچنین، فرآیندهای پردازش با این روش به راحتی قابل کنترل هستند و هزینه پردازش در مقایسه با سایر روش‌های تولید پلاسماهای کم‌فشار پایین است [۶-۸].

در این مقاله، هدف طراحی و ساخت سامانه تولید پلاسما به روش تخلیه سد دی‌الکتریک سطحی (SDBD) با ساختار دی‌الکتریک شانه‌ای - شکل است که از ویژگی مهم این دستگاه تولید لایه‌ای نازک از پلاسما فشار اتمسفری پایدار، یکنواخت و با ابعاد بزرگ به دلیل نوع و ساختار الکترودها و دی‌الکتریک استفاده شده در آن است. به دلیل اهمیت ساخت دستگاه تولید پلاسما با ویژگی‌های بیان شده، در سال‌های کنونی، مطالعاتی بر روی طراحی و ساخت سامانه SDBD صورت گرفته است [۴-۲ و ۹-۱۲]. ساختار الکترودها استفاده شده در این منابع به صورت ساده می‌باشد و پلاسما بدست آمده نسبت به ساختارهایی نظیر آنچه در مقاله حاضر در نظر گرفته شده است دارای ابعاد کم و یکنواختی کمتری بر روی سطح می‌باشد.

در بخش دوم این مقاله، طراحی و ساخت سامانه SDBD شرح داده شده است. در بخش سوم، روابط تحلیلی محاسبه توان مصرفی سامانه بیان شده و انجام آزمایش و داده‌گیری تجربی در بخش چهارم بیان شده است. در نهایت، نتیجه‌گیری در بخش پنجم مقاله بیان شده است.

## ۲. طراحی و ساخت سامانه SDBD

سامانه تخلیه سد دی الکتریک سطحی، از دو الکتروود موازی تشکیل شده است به گونه ای که لایه دی الکتریک فضای بین دو الکتروود (گپ) را کامل می پوشاند. در این پیکربندی، فرآیند تخلیه در طول لایه دی الکتریک صورت گرفته و هیچگونه تخلیه ای در گپ صورت نمی گیرد. در شکل (۱) نمونه ای از ساختار تخلیه الکتریکی سطحی نشان داده شده است.

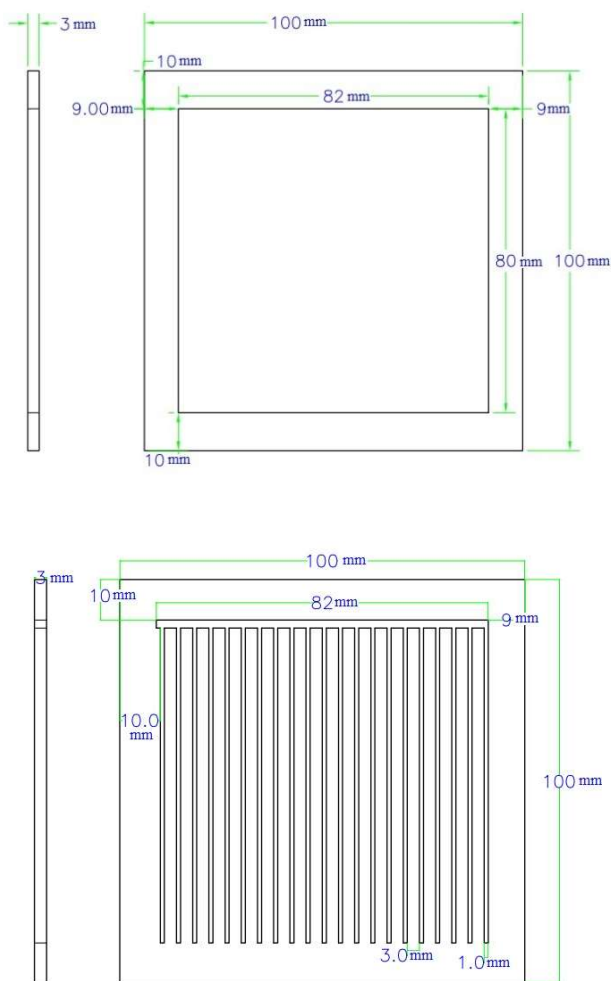


شکل ۱ ساختار تخلیه سد دی الکتریک سطحی.

از جمله مزایای استفاده از این ساختار، تولید لایه ای از پلاسما یکنواخت و پایدار می باشد که برای کاربردهای صنعتی دارای اهمیت بسیاری می باشد. در مقاله حاضر، سامانه تخلیه سد دی الکتریک به گونه ای طراحی شده است که الکتروود بالایی دارای ساختار شانه ای - شکل و الکتروود پایینی تخت می باشد. ضخامت الکتروودها ۱۰۰ میکرون و ابعاد آنها ۸×۸ سانتی متر می باشد. دی الکتریک طراحی شده دارای ابعاد ۱۰×۱۰ سانتی متر و ضخامت ۰/۵ میلی متر است و در وسط الکتروودها قرار می گیرد. شکل (۲)، نمایی از ساختار طراحی شده برای الکتروودهای سامانه SDBD را نشان می دهد. نوع دی الکتریک مورد استفاده در ساختار تخلیه سد دی الکتریک بسیار اهمیت دارد. اغلب در تخلیه سد دی الکتریک از عایق هایی استفاده می شود که دارای استحکام بالا و همچنین ثابت دی الکتریک بالایی هستند. در حقیقت، درجه ای استحکام این مواد از اهمیت بسزایی برخوردار است تا در مقابل برخورد های الکترون - یونی استقامت خوبی داشته و به مرور زمان فرسوده نشوند. در مطالعات انجام شده بر روی این سامانه موادی با جنس هایی نظیر کوارتز [۶]، شیشه [۱۰] و آلومینا [۱۱] به عنوان



دی‌الکتریک مورد استفاده قرار گرفته است. در مقاله حاضر، از عایق میکا به عنوان دی‌الکتریک استفاده شده است که افزون بر دارا بودن استحکام مناسب و ثابت دی‌الکتریک بالا نسبت به شیشه از قیمت مناسبی نسبت به دی‌الکتریک‌های کوارتز و آلومینا برخوردار است.



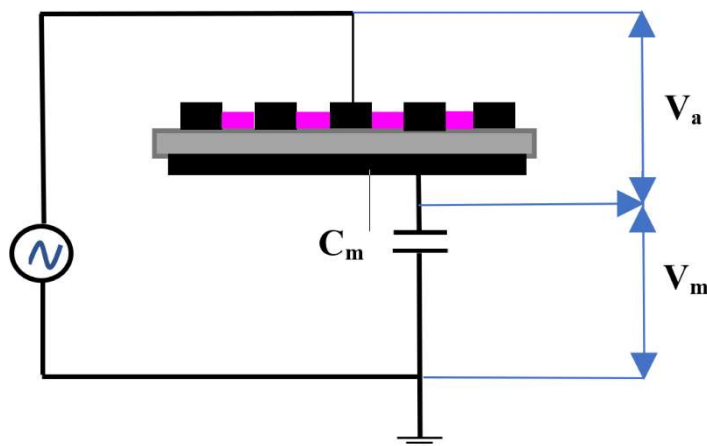
شکل ۲ نمایی از پشت و روی الکترودهای طراحی شده سامانه SDBD.

الکترودهای استفاده شده در ساختار SDBD نیز باید دارای رسانایی الکتریکی بسیار بالا و مقاومت حرارتی بالایی باشد. در این مقاله، از مس که یکی از مناسبترین فلزات با رسانایی بالا و مقاومت

حرارتی بالا می‌باشد، برای ساخت الکترودها استفاده شده است. همانگونه که اشاره شد، الکترودها بالا دارای ساختار شانه‌ای- شکل و الکترودها پایین دارای ساختار تخت می‌باشد که توسط لایه‌ای از کیتون پوشانده می‌شود. در این ساختار، ورقه مسی به عنوان الکترودها با ابعاد مشخص شده بر روی سطح دی‌الکتریک کاملاً چسبانده می‌شود به گونه‌ای که هیچگونه فاصله‌ای در فضای بین الکترودهای بالایی و پایینی و دی‌الکتریک که در بین آنها قرار گرفته است، وجود ندارد. پس از ساخت الکترودها و دی‌الکتریک سامانه SDBD با ساختار مورد نظر، منبع تغذیه با مشخصات ولتاژ ۲۰-۰ کیلوولت و فرکانس ۰-۱۵ کیلوهرتز برای تولید پلاسما با استفاده از این سامانه استفاده شد.

### ۳. محاسبه توان مصرفی

برای محاسبه توان مصرفی سامانه تولید پلاسما به روش تخلیه سد دی‌الکتریک از روش‌های متفاوتی از جمله روش خازن ناظر، اندازه‌گیری جریان القایی با استفاده از پیچچه روگوفسکی و روش مقاومت موازی استفاده می‌شود. در مقاله حاضر، از روش خازن ناظر برای محاسبه توان مصرفی دستگاه SDBD ساخته شده استفاده شده است. در شکل (۳)، نمودار جریان الکتريکی در روش خازن ناظر نشان داده شده است. در این نمودار،  $V_a$  ولتاژ اعمالی،  $V_m$  ولتاژ دو سر خازن و  $C_m$  ظرفیت خازن است.



شکل ۳ نمودار جریان الکتريکی در روش خازن ناظر.





روابط تحلیلی برای محاسبه توان مصرفی،  $P_a$ ، در یک سیکل زمانی  $T$ ، در روش استفاده از خازن ناظر بصورت زیر می باشد:

$$P_a(t) = V_a(t).I_a(t) = V_a(t).C_m \frac{dV_m(t)}{dt} \quad (1)$$

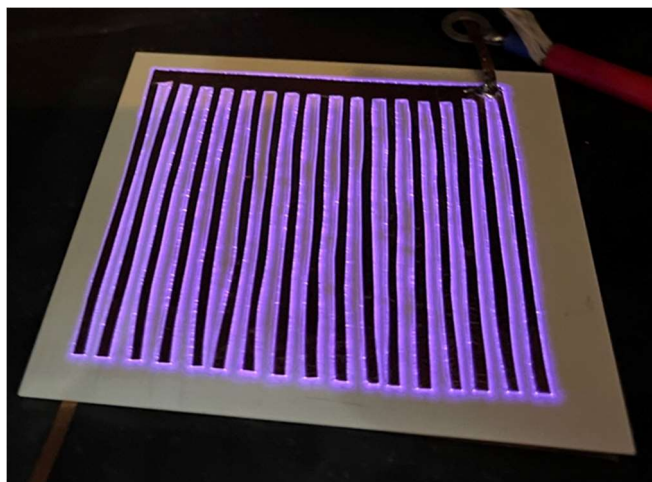
$$\bar{P}_a = \frac{1}{T} \int_0^T V_a(t).C_m \frac{dV_m(t)}{dt} dt = \frac{1}{T} \int V_a.C_m dV_m = \frac{1}{T} \int V_a dQ_m \quad (2)$$

بر اساس روابط بیان شده، با رسم نمودار بار خازنی لحظه ای بر حسب ولتاژ لحظه ای SDBD، در صفحه  $Q_m-V_a$  منحنی لیسازو بدست می آید. رابطه (۲) نشان می دهد که مساحت داخلی منحنی لیسازو تقسیم بر دوره تناوب چرخه  $ac$  یعنی  $T$  برابر با توان مصرفی سامانه SDBD خواهد بود [۱۳].

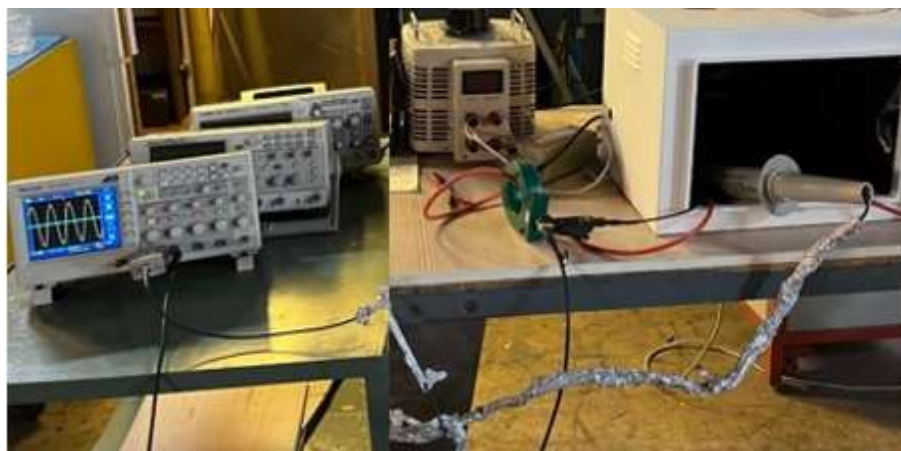
#### ۴. انجام آزمایش و داده گیری

پس از طراحی و ساخت سامانه SDB با ساختار مدنظر، مدار الکتریکی مناسب برای این سامانه ساخته شد و با استفاده از منبع تغذیه با مشخصات ولتاژ ۲۰-۰ کیلوولت و فرکانس ۱۵-۰ کیلوهرتز، پلاسمای تولیدی از دستگاه ساخته شده مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۴) تصویری از پلاسمای پایدار و یکنواخت تشکیل شده بر روی سطح دی الکتریک در شرایط کاری ولتاژ ۷ کیلوولت و فرکانس ۱۲/۵ کیلوهرتز را نشان می دهد.

برای اندازه گیری توان مصرفی سامانه SDBD ساخته شده با استفاده از روش خازن ناظر، بر اساس نمودار الکتریکی نمایش داده شده در شکل (۴)، از چیدمان آزمایشگاهی مشابه با شکل (۵) استفاده شد. همانگونه که مشاهده می شود از پروب ولتاژ و اسیلوسکوپ برای ثبت و نمایش سیگنال های ولتاژ و جریان در این چیدمان استفاده شده است. همچنین، یک خازن ناظر با ظرفیت  $C_m=22 \text{ nF}$  به صورت سری در مدار جریان سامانه قرار گرفته است.



شکل ۴ تصویری از پلاسمای تشکیل شده در سامانه SDBD ساخته شده.



شکل ۵ چیدمان آزمایشگاهی برای اندازه گیری توان مصرفی سامانه SDBD ساخته شده.

پس از ثبت داده‌های تجربی، با استفاده از روابط محاسبه توان مصرفی در بخش (۳)، توان مصرفی سامانه SDBD ساخته شده محاسبه شد. در شرایط کاری ولتاژ ۷ کیلوولت و فرکانس ۱۲/۵ کیلوهرتز، توان مصرفی محاسبه شده برای این سامانه ۵۰ وات است. این میزان توان مصرفی مقدار قابل قبول برای سامانه‌های تولید پلاسما به روش تخلیه سد دی‌الکتریک [۱۴-۲۱] جهت کاربرد آن‌ها در علوم و صنایع مختلف می‌باشد. از این رو سامانه SDBD طراحی و ساخته شده توانایی توسعه جهت استفاده‌های کاربردی را دارد.

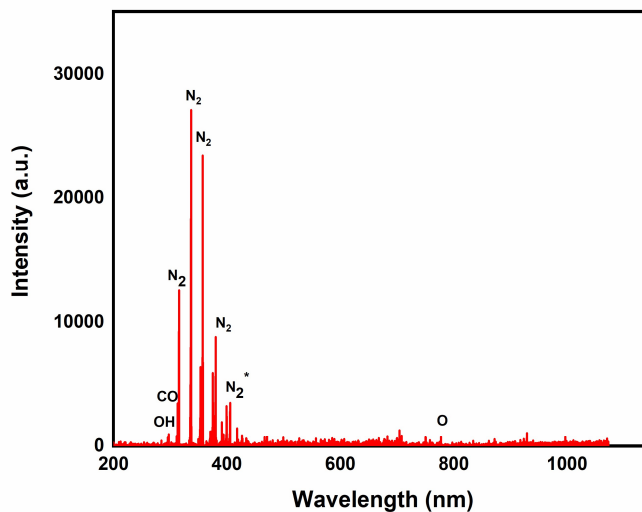


برای بررسی طیفی ویژگی‌های پلاسمای تولید شده توسط سامانه SDBD ساخته شده از روش طیف‌سنجی نشر نوری OES استفاده شد. طیف‌سنج مورد استفاده، متعلق به شرکت AVANTES، چهار کاناله و با جداسازی ۰/۱۹ نانومتر است. برای انجام آزمایش‌های طیف‌سنجی از چیدمانی مشابه با شکل (۶) استفاده شد.



شکل ۶ چیدمان آزمایشگاهی اندازه‌گیری‌های طیف‌سنجی سامانه SDBD ساخته شده.

طیف بدست آمده از پلاسمای تولیدی سامانه ساخته شده در شکل (۷) آمده است. با توجه به طیف بدست آمده از پلاسما، قله‌های مشخصه هوا که شامل قله‌های  $N_2$  در ۳۱۳/۴۶، ۳۳۴/۸۲، ۳۵۵/۳۸ و ۳۸۹/۲۸ نانومتر می‌باشند به روشنی در طیف بدست آمده قابل مشاهده است. همچنین، حضور قله مشخصه OH در طول موج ۲۹۶/۱ نانومتر و O در ۷۷۷/۵ نانومتر مشخص شده است.



شکل ۷ طیف بدست آمده از پلاسمای تولیدی سامانه SDBD ساخته شده.

## ۵. نتیجه گیری

در مقاله حاضر، یک نمونه دستگاه تولید پلاسما به روش تخلیه سد دی الکتریک سطحی (SDBD) با ساختار الکتروود شانه‌ای - شکل در مقیاس آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده است. نتایج بدست آمده، تولید لایه‌ای نازک از پلاسمای فشار اتمسفری پایدار و یکنواخت بر روی سطح دی الکتریک سامانه SDBD ساخته شده را نشان دادند. در این سامانه برای ساخت الکتروود از ورقه نازک مسی با ضخامت ۱۰۰ میکرون با ساختار شانه‌ای - شکل استفاده شد. دی الکتریک نیز ورقه میکا با ضخامت ۰/۵ میلی متر با ابعاد  $10 \times 10$  سانتی متر است. از جمله مزایای این سامانه ضخامت بسیار کم الکتروودها و دی الکتریک و پهنای بسیار باریک نوارهای ساختار شانه‌ای - شکل می باشد که منجر به تشکیل پلاسما بر روی سطح کامل دی الکتریک می گردد. افزون بر این، استفاده از عایق میکا به عنوان دی الکتریک در مقایسه با عایق‌هایی چون آلومینا و کوارتز که در اکثر سامانه‌های SDBD از آن‌ها استفاده می شود، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه می باشد. با استفاده از داده‌های تجربی و محاسبات تحلیلی توان مصرفی سامانه SDBD ساخته شده در شرایط کاری ولتاژ ۳ کیلوولت و فرکانس ۱۲/۵ کیلوهرتز، برابر با ۵۰ وات بدست آمد. افزون بر این، با استفاده از طیف سنجی نشر نوری OES، بررسی طیفی ویژگی‌های پلاسمای تولید شده انجام شد. با بررسی طیف بدست آمده از پلاسما، قله‌های مشخصه هوا به روشنی در طیف حاصل قابل مشاهده بودند. تولید لایه‌ای از پلاسمای پایدار و یکنواخت در این سامانه در مقایسه با سامانه‌های SDBD ساخته شده با ساختار الکتروود ساده و توان مصرفی اندازه گیری شده، نشان می دهد با ارتقای این سامانه می توان از آن در علوم و صنایع مختلف از جمله صنایع پردازش سطوح استفاده کرد.

## ۶. تقدیر و تشکر

نویسندگان لازم می دانند مراتب امتنان و قدردانی خود را از داوران محترم مقاله بابت نظرات و پیشنهادات ارزشمند ایشان که موجب ارتقا سطح علمی و ساختاری مقاله شده است صمیمانه ابراز نمایند. همچنین از همکاران محترم آزمایشگاه پردازش پلاسمایی، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای قدردانی می گردد.



## منابع

- [1] Patil B S, Wang Q, Hessel V, Lang J, "Plasma N<sub>2</sub>-fixation 1900–2014". *Catalysis today* 256, 49-66, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2015.05.005>.
- [2] Ndong A C A, Zouzou N, Benard N, Moreau E., "Effect of Dielectric Aging on the Behavior of a Surface Nanosecond Pulsed Dielectric Barrier Discharge", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 20(5), 2013. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6633683>
- [3] Siemens W V, Annale P, "Ozone production in an atmospheric-pressure dielectric barrier discharge", *Poggendorfs Annalen der Chemie und der Physik* 102, 66-122, 1857. <https://doi.org/10.1002/andp.18571780905>
- [4] Nassour K, Brahami M, Tilmatine A, Nemmich S, Miloua F, Ramdani N, Zouzou N., "Comparative experimental analysis of ozone generation between surface and volume DBD generators", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 25(2), 428-434, 2018. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006600>
- [5] Ngo A, Pai K, Jacob J D., "Investigation of Scaling Effects Due to Varying Dielectric Materials in Asymmetric Surface Dielectric Barrier Discharge", *48th AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference*, 3343, 2017.
- [6] Audier P, Rabat H, Leroy A, Hong D., "Experimental investigation of a surface DBD plasma actuator at atmospheric pressure in different N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> gas mixtures", *Plasma Sources Sci. Technol* 23, 065045, 2014. <https://doi.org/10.1088/0963-0252/23/6/065045>.
- [7] Jolibois J, Zouzou N, Moreau E, Tatibouet J M, "Generation of surface DBD on rough dielectric: Electrical properties, discharge-induced electric wind and generated chemical species", *Journal of Electrostatics* 69, 522-528, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2011.07.001>.
- [8] Jolibois J, Takashima K, Mizuno A., "Application of a non-thermal surface plasma discharge in wet condition for gas exhaust treatment: NO<sub>x</sub> removal", *Journal of Electrostatics* 70, 300-308, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2012.03.011>.
- [9] Jafari M, Safari M, Ahmadizadeh Y, Shokri B., "Air Flow Control at a Boundary Layer Using a Surface Dielectric Barrier Discharge Actuator", *Journal of Aeronautical Engineering* 12(1), 59-67, 2010. 20.1001.1.17359449.1389.12.1.5.7
- [10] Mahdavi H, Sohbatzadeh F., "The effects of applying different bias voltages and phase differences on performance of an asymmetric surface dielectric barrier discharge; an experimental investigation", *Journal of Theoretical and Applied Physics* 13, 165-177, 2019. <https://doi.org/10.1007/s40094-019-0334-3>
- [11] Khajvand salehan M, sohbatzadeh F, hajizadeh I, shafei F, Shakerinasab E, Mohsenpour T, "Comparison of the effect of dielectric barrier discharge plasma in surface and volume mode of treatment on physical and chemical properties of saffron", *FSCT* 18(120), 13-25, 2021. <https://doi.org/10.52547/fsct.18.120.2>
- [12] Sohbatzadeh, F, Yazdanshenas, H., Soltani, A.H. and Shabannejad, A., "An innovative strategy to rapidly inactivate 8.2-log Enterococcus faecalis in fresh pineapple juice using cold atmospheric plasma", *Scientific Reports* 11(1), 16010, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95452-2>.
- [13] Ashpis, D.E., Laun, M.C. and Griebeler, E.L., "Progress Toward Accurate Measurement of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator Power", *AIAA J.* 55(7), 2254–2268, 2017. <https://doi.org/10.2514/1.J055816>.
- [14] Holub, M., "On the measurement of plasma power in atmospheric pressure DBD plasma reactors", *13th European Conference on Power Electronics and Applications EPE 2009*, 8-10 September 2009.



- [15] Kogelschatz, U., "Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications", *Plasma Chemistry and Plasma Processing* 23(1), 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1022470901385>.
- [16] Benard, N. and Moreau, E., "Electrical and mechanical characteristics of surface AC dielectric barrier discharge plasma actuators applied to airflow control", *Exp Fluids* 55, 1846, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00348-014-1846-x>.
- [17] Abdelaziz A A, Abdel-Salam M, Hashim A A, Hammad G A, Kim H., "Development and characterization of surface dielectric barrier discharge-based reactor for ozone generation", *J. of Assiut Univ.* 49(1), 17-34, 2020. <https://doi.org/10.21608/AUNJ.2020.220860>.
- [18] Kriegseis, J., Möller, B., Grundmann, S. and Tropea, C., "Capacitance and power consumption quantification of dielectric barrier discharge (DBD) plasma actuators", *Journal of Electrostatics* 69, 302-312, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2011.04.007>.
- [19] Wilde, N.D., Xu, H., Gomez-Vega, N. and Barrett, S.R., "A model of surface dielectric barrier discharge power", *Appl. Phys. Lett.* 118(15), 154102, 2021. 1721.1/145281.
- [20] Gershman, S., Harreguy, M.B., Yatom, S., Raitzes, Y., Eftimion, P. and Haspel, G., "A low power flexible dielectric barrier discharge disinfects surfaces and improves the action of hydrogen peroxide", *Scientific Reports* 11(1), 4626, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84086-z>.
- [21] Choudhury, B., Portugal, S., Mastanaiah, N., Johnson, J.A. and Roy, S., "Inactivation of *Pseudomonas aeruginosa* and Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* in an open water system with ozone generated by a compact, atmospheric DBD plasma reactor", *Scientific reports* 8(1), 17573, 2018. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36003-0>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



## بررسی اثر تونل‌زنی بین حالت‌های لبه‌ای نانو نوار فسفرین با لبه‌های زیگزاگ<sup>۱</sup> مهدیه حسین نخعی<sup>۲</sup>، محسن دایی محمد<sup>۳\*</sup>، مرتضی سلطانی<sup>۴</sup>، مینا نقابی<sup>۵</sup> و غلامرضا راشدی<sup>۶</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۲

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳

صص ۵۳ - ۶۴

### چکیده:

در این مقاله به بررسی ویژگی‌های ترابردی یک نانونوار فسفرین با لبه‌های زیگزاگ پرداخته شده است. اگر چه فسفرین یک ساختار دو بعدی شکاف‌دار است ولی هر لبه‌ی زیگزاگ از نانونوار فسفرین مانند یک سیم کوانتومی یک بعدی عمل می‌کند. بنابراین یک نانونوار با دو لبه مانند دو سیم کوانتومی موازی یکدیگر هستند. در این مقاله نشان می‌شود که با اضافه کردن یک خط ناخالصی بین لبه‌ی بالا و پایین می‌توان یک نوار ناخالصی ایجاد کرد که می‌تواند لبه‌ی بالا را به لبه‌ی پایین متصل کند. به عبارتی می‌تواند ورودی‌های مختلف به خروجی‌هایی مختلف جفت شوند. برای محاسبه‌ی ضرایب جفت‌شدگی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها از فرمول‌بندی لیپمن- شوئینگر استفاده شده است. نتایج نهایی نشان می‌دهد که بسته به انرژی حالت ورودی و موج ایستاده متناظر با آن در نوار ناخالصی می‌تواند پدیده‌ی تشدید یا پاد تشدید در پراکندگی بین ورودی‌ها و خروجی‌ها ایجاد شود. طرح پیشنهادی در این مقاله می‌تواند افزون بر جنبه‌ی نظری از لحاظ کاربردی برای ساخت نانو سوئیچ‌ها نیز کاربرد داشته باشد.

**واژگان کلیدی:** فسفرین، حالت‌های لبه‌ای، نوار ناخالصی، فرمول‌بندی لیپمن- شوئینگر.

<sup>۱</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45541.1365>

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتر، گروه فیزیک، دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران. Email: mahdiah.hosseinnakhaei1355@gmail.com

<sup>۳</sup> استادیار، گروه فیزیک، دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران (نویسنده مسئول). Email: m.daeimohammad@pco.iaun.ac.ir

<sup>۴</sup> دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. Email: mo.soltani@sci.ui.ac.ir

<sup>۵</sup> استادیار، گروه فیزیک، دانشکده مهندسی کامپیوتر، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، اصفهان، ایران. Email: mphdneghabi@gmail.com

<sup>۶</sup> دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. Email: rashedi@sci.ui.ac.ir



## ۱. مقدمه

پس از ساخت گرافین در سال ۲۰۰۵ توسط گایم و همکاران دریچه جدیدی در تولید ساختارهای دو بعدی گشوده شد. با توجه به کاربردهای گوناگون گرافین و ساخت آن به روش‌های مکانیکی و شیمیایی مختلف فیزیک دانان به سراغ ساخت آزمایشگاهی مواد دو بعدی مختلف مانند سیلیسن و بروفین پرداختند. فسفرین یکی از مواد دو بعدی هست که یک لایه از فسفر سیاه است [۱-۲]. فسفرین مانند گرافین دارای ساختار لانه زنبوری است ولی برخلاف گرافن متقارن نیست. نامتقارن بودن فسفرین سبب می‌شود که این ماده شکاف دار باشد. نکته جالب توجه دیگر در مورد فسفرین آن است که برای یک نانونوار فسفرین با لبه‌های زیگزاگ حالت‌های لبه‌ای ایجاد می‌شود که این حالت‌های لبه‌ای مانند یک سامانه یک بعدی رفتار می‌کند. این حالت لبه‌ای در شکاف سامانه قرار دارد و از این لحاظ می‌توان آن را به عنوان یک سامانه یک بعدی مجزا در نظر گرفت [۱-۴]. نکته جالب توجه دیگر در مورد فسفرین آن است که اگر یک خط ناخالصی در فسفرین ایجاد کنیم آنگاه یک نوار ناخالصی در آن ایجاد می‌شود [۵-۷]. این نوار ناخالصی نیز مانند حالت‌های لبه‌ای شکاف انرژی قرار دارند. در مقالات مختلف حالت‌های لبه‌ای فسفرین و ویژگی‌ها و کاربردهای آن و همچنین به بررسی نوارهای انرژی ناخالصی بررسی شده است [۷]. ساخت فسفرین به شکل نانونوار و بررسی ویژگی‌های ترابرد آن در مقالات [۹-۸] آمده است. افزون بر این، در مقالات [۱۰-۱۳] نیز در مورد ایجاد تهی‌جا در فسفرین به شکل عددی بحث شده است.

امروزه ساخت و بررسی سامانه‌های یک بعدی، که به آن‌ها سیم‌های کوانتومی گفته می‌شود، یکی از مباحث مورد توجه فیزیک دان‌ها می‌باشد. مباحثی چون ساخت ترانزیستورهای تک الکترونی و همچنین ساخت و بررسی بیت‌های کوانتومی و انجام محاسبات کوانتومی بر روی آن‌ها یکی از اهداف فیزیکدانان می‌باشد که برای پیاده‌سازی آن نیاز به سامانه‌های یک بعدی با امکانات برهم‌کنش بین آن‌ها می‌باشد [۱۴]. حالت‌های لبه‌ای در فسفرین ذاتاً یک سامانه یک بعدی است و اگر بتوان به روشی بین انرژی سامانه‌های یک بعدی برهم‌کنش لازم را مهندسی کرد، می‌تواند کاربرد فراوانی در حوزه‌های یاد شده داشته باشد. به همین دلیل در این مقاله سعی شده است که با استفاده از نوارهای انرژی ناخالصی، امکان تونل‌زنی بین حالت‌های لبه‌ای یک نوار فسفرین با لبه‌های زیگزاگ بررسی شود. همان‌گونه که در [۱۵] نشان داده شده است، در اثر عرض محدود می‌توان بین حالت‌های لبه‌ای بالایی و پایینی یک جفت‌شدگی به وجود آورد ولی این جفت‌شدگی



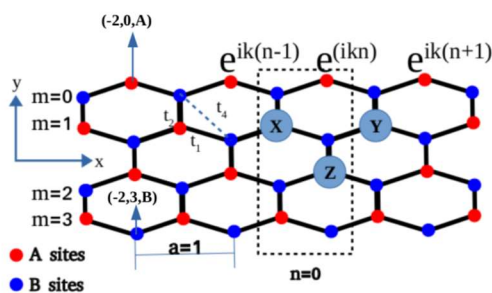


تنها برای عرض های بسیار کوچک است. در این مقاله ما نشان می دهیم که با استفاده از امکان نوار ناخالصی می توان برای عرض های بزرگ نیز یک تونل زنی بین لبه های بالا و پایین ایجاد کرد. بررسی این مساله افزون بر جنبه نظری از دیدگاه کاربردی نیز می تواند مورد توجه باشد. به عنوان مثال در ساخت سوئیچ ها و یا ساخت گیت های کلاسیکی و کوانتومی می تواند کاربرد داشته باشد. برای محاسبه احتمال تونل زنی الکترون از یک لبه به لبه دیگر از روش لیمن- شوئینگر که مبنای آن ماتریس  $\hat{T}$  تابع گرین می باشد، استفاده شده است [۱۶]. در پایان نتایج عددی ارائه شد. در این بررسی نشان داده می شود که تونل زنی بین حالت های بالا و پایین می تواند رفتار تشدید و یا پاد تشدید از خود نشان بدهد.

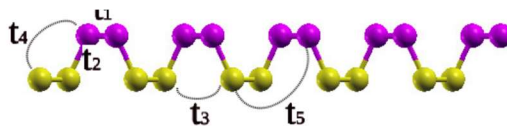
در بخش دوم مقاله مرور مختصری بر ساختار فسفرین و حالت های لبه ای نوار ناخالصی انجام می شود. در بخش سوم از روش لیمن- شوئینگر برای محاسبه تونل زنی بین حالت های لبه ای استفاده و نتایج بررسی می شود. در پایان (بخش چهارم) نتایج جمع بندی می گردد.

## ۲. مروری بر ساختار فسفرین

در این بخش برای مشخص شدن فرمول بندی و نماد گذاری، مرور کوتاهی بر ساختار فسفرین و حالت های لبه ای و نوار ناخالصی انجام شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱ (الف) ساختار لانه زنبوری فسفرین با نوع شماره گذارهای اتم ها نشان داده شده است. (ب) ساختار فسفرین از کنار که نشان می دهد فسفرین دارای یک ساختار چین خورده است [۷].

ساختار فسفرین در شکل (۱) نشان داده شده است. همان گونه که در این شکل دیده می شود ساختار آن مانند گرافن یک ساختار لانه زنبوری است. بنابراین برای بیان این سامانه باید اتم ها را به دو دسته اتم های نوع  $A$  و نوع  $B$  تقسیم کرد. البته ساختار فسفرین بر خلاف ساختار گرافن مسطح نیست و دارای اعوجاج است.  $t_1$  تا  $t_5$  در شکل (۱) مشخص شده است و مقادیر آن عبارتند از [۴]:

$$\begin{aligned} t_1 &= -1.22eV \\ t_2 &= 3.66eV \\ t_3 &= -0.20eV \\ t_4 &= -0.10eV \\ t_5 &= -0.05eV \end{aligned} \quad (1)$$

همان گونه که از معادله (۱) دیده می شود، برهم کنش بین همسایه های اول قویترین برهم کنش است و در مقالات مختلف تنها  $t_1$  و  $t_2$  و  $t_4$  لحاظ می شود و از بقیه جملات صرف نظر می شود. با توجه به شماره گذاری به صورت شماره زنجیر زیگزاگ در راستای  $Y$  و شماره زنجیر دسته صندلی در راستای  $X$  به زبان کوانتس دوم می توان هامیلتونی را به صورت زیر نوشت [۴]:

$$\begin{aligned} H &= H' + H'' \\ H' &= \sum_{m,n} t_1 (a_{n,m}^\dagger + a_{n+1,m}^\dagger) b_{n,m} \\ &\quad + t_2 a_{n,m}^\dagger b_{n,m+1} + H.C \\ H'' &= \sum_{m,n} t_3 (a_{n,m+1}^\dagger + a_{n+1,m+1}^\dagger) a_{n,m} \\ &\quad + \sum_{m,n} t_4 (b_{n,m+1}^\dagger + b_{n+1,m+1}^\dagger) b_{n,m} \\ &\quad + H.C \end{aligned} \quad (2)$$

که در این معادله  $H'$  مربوط به برهم کنش مرتبه اول می باشد و  $H''$  مربوط به برهم کنش مرتبه دوم است.

برای بدست آوردن حالت های لبه ای یک نانونوار فسفرین با لبه زیگزاگ از معادله زیر استفاده می شود.

$$H' |\psi^A\rangle = 0 \quad (3)$$



در این معادله فرض شده است که حالت لبه‌ای تنها بر روی اتم نوع  $A$  که در لبه قرار دارد غیر صفر است. با توجه به رابطه (۳) می‌توان نشان داد که تابع موج حالت لبه ای عبارت است از [۴]:

$$\begin{aligned} |\psi^A(k)\rangle &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{n,m} \alpha^m(k) \gamma(k) e^{ikx_A} |n, m, A\rangle \\ \alpha(k) &= -\gamma \frac{t_1}{t_2} \cos\left(\frac{k}{2}\right) \\ \gamma(k) &= 1 - \alpha^2(k) \end{aligned} \quad (4)$$

و همچنین پاشندگی حالت‌های لبه‌ای با استفاده از نظریه اختلال به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} E(k) &= \langle \psi^A | H'' | \psi^A \rangle = -\gamma \frac{t_1 t_1'}{t_2} (1 + \cos(k)) \\ &= \varepsilon_c - 2t' \cos(k) \end{aligned} \quad (5)$$

همان‌گونه که دیده می‌شود پاشندگی حالت‌های لبه‌ای بدست آمده دقیقاً مشابه یک سامانه بستگی

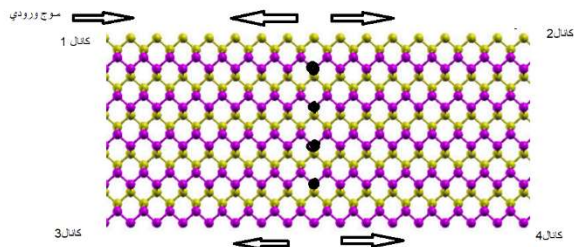
قوی با جمله پرش موثر  $t' = -\gamma \frac{t_1 t_1'}{t_2}$  است.

همان‌گونه که در [۷] نشان داده شده است، حضور تهی‌جا در فسفرین سبب ایجاد یک حالت جایگزیده در اطراف تهی‌جا می‌شود. در مقاله [۴] نیز نشان داده شده است، یک خط ناخالصی به شکل دوره‌ای منجر به یک نوار انرژی ناخالصی می‌شود. بررسی دقیق تحلیلی نوار ناخالصی در منبع [۷] آمده است و در این مقاله، از تکرار محاسبات صرف‌نظر شده است.

البته بیان نوار انرژی ناخالصی از لحاظ فیزیکی جالب است. وجود تهی‌جا منجر به ایجاد حالت‌های جایگزیده در اطراف تهی‌جا می‌شود و اگر آن‌ها به صورت دوره‌ای قرار بگیرند، آنگاه مانند آن است که اتم‌های یک‌ترازه به صورت دوره‌ای در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند که به دلیل همپوشانی تابع موج آن‌ها یک نوار انرژی ناخالصی مشابه یک زنجیر یک بعدی بستگی قوی به وجود می‌آید. نکته جالب توجه در این محاسبات آن است که چون در ناحیه نوار مرکزی ناشی از تهی‌جا موج ایستاده ایجاد می‌شود، به همین دلیل می‌تواند رفتار تشدید و یا پاد تشدید در رسانندگی بوجود آورد که این مساله می‌تواند به عنوان یک فیلتر برای انرژی عمل کند.

### ۳. محاسبه تونل‌زنی با استفاده از رهیافت لیپمن - شوئیتر

مسأله‌ی مورد بررسی این مقاله در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ طرح‌واره مسأله مورد بررسی. تهی جاها به صورت نقاط مشکی نشان داده شده است.

فرض می‌شود که یک نانونوار فسفرین با لبه‌های زیگزاگ داریم و در داخل آن یک خط ناخالصی در راستای دسته‌سندلی قرار داده شده است. انتظار می‌رود در ناحیه‌ای که نوار انرژی ناخالصی و نوار انرژی لبه‌ای هم‌پوشانی دارند، امکان تونل‌زنی از لبه بالا به لبه پایین وجود داشته باشد. به عبارتی انتظار می‌رود که اگر الکترون مطابق شکل (۲) از کانال ۱ وارد شود آنگاه با احتمال‌های مختلف می‌تواند از کانال‌های ۱ تا ۴ خارج شود. هدف اصلی این مقاله محاسبه احتمال‌های مختلف است. به منظور روشن‌تر شدن موضوع، هامیلتونی کل به صورت زیر بازنویسی می‌شود.

$$\begin{aligned}
 H &= H^u + H^d + H^{imp} + H^{int} \\
 H^{u(d)} &= \int_{-\pi}^{\pi} -\tau t' \cos(k^{u(d)}) |k^{u(d)}\rangle \langle k^{u(d)}| dk^{u(d)} \\
 H^{ch} &= \sum_i t'' |i\rangle \langle i+1| + H.C \\
 H^{int} &= \int_{-\pi}^{\pi} V(k^u) |k^u\rangle \langle 1| dk^u \\
 &\quad + \int_{-\pi}^{\pi} V(k^d) |k^d\rangle \langle N| dk^d + H.C
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

در رابطه بالا  $H^u$  و  $H^d$  هامیلتونی حالت‌های لبه‌ای مربوط به لبه بالا و پایین در فضای  $k$  می‌باشد و  $H^{ch}$  مربوط به حالت‌های خط ناخالصی می‌باشد. در این معادله از نتایج مقاله‌های [۵-۷] استفاده شده است. در این مقاله‌ها نشان داده شده است که یک شبکه منظم از تهی جاها را می‌توان با یک



زنجر یک بعدی شبیه سازی کرد. در آخر  $H^{int}$  مربوط به جفت شدگی حالت های لبه ای و حالت های ناخالصی است که فرض شده است لبه بالا با حالت جایگزیده تهی جا در لبه بالا، که شماره آن با ۱ نشان داده شده، جفت شده است و لبه پایین با اولین تهی جا، که آن را با  $N$  نشان داده شده، جفت شده است. قدرت جفت شدگی برای هر  $k^i$  با  $V(k^i)$  نشان داده شده است. همان گونه که در شکل (۲) آمده است، فرض می شود که الکترونی در کانال ۱ از سمت چپ وارد می شود. سوالی که مطرح است آن است که این الکترون با چه احتمالی پس از پراکندگی از خط ناخالصی از کانال های متفاوت پراکنده می گردد. برای محاسبه این احتمالات از فرمول بندی لیپمن - شوئینگر استفاده می شود. در فرمول بندی لیپمن - شوئینگر ارتباط تابع موج خروجی و تابع موج ورودی به صورت رابطه زیر می باشد.

$$|\psi_{out}\rangle = |\psi_{in}\rangle + G, T |\psi_{in}\rangle \quad (7)$$

که در این رابطه،  $G$  تابع گرین سامانه بدون برهمکنش است و  $T$  ماتریس پراکندگی است که از رابطه زیر بدست می آید [۱۶].

$$T = H^{int} (1 + G, H^{int} + G, H^{int} G, H^{int} + \dots) \quad (8)$$

توابع گرین مختلف به صورت زیر بدست می آید.

$$G, (E) = \int dE' \frac{|E'\rangle \langle E'|}{E - E' + i, 0^+} \quad (9)$$

که در این رابطه،  $|E'\rangle$  ویژه حالت انرژی با ویژه مقدار  $E'$  است.

همان گونه که در شکل (۲) آمده است، برای یک ورودی چهار خروجی مختلف وجود دارد، از این رو، بر خلاف محاسبات منبع [۴] که در آن با استفاده از یک عدد قابل نوشتن می باشد، در اینجا باید از فرمول بندی ماتریسی برای بدست آوردن یک شکل بسته استفاده کرد. به دلیل وجود دو کانال و همچنین ردگیری نوار ناخالصی بر روی درجات آزادی، باید از ماتریس های دو در دو برای یافتن شکل بسته استفاده کرد. با استفاده از نمادگذاری ماتریسی، از معادله (۸) نتیجه زیر بدست می آید:



$$\begin{aligned}
 T = & \iint \left[ V^u |k^u\rangle, V^d |k^d\rangle \right] \frac{1}{\sqrt{-\tilde{G}}} \left[ \langle N | \right] dk^u dk^d \\
 & + \iint \left[ V^u |k^u\rangle, V^d |k^d\rangle \right] \\
 & \times \frac{1}{\sqrt{-\tilde{G}}} \begin{bmatrix} G_{\nu\nu}^{imp} & G_{\nu N}^{imp} \\ G_{N\nu}^{imp} & G_{NN}^{imp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle k^u | V^u \\ \langle k^d | V^d \end{bmatrix} dk^u dk^d \\
 & + [ |1\rangle, |N\rangle ] \frac{1}{\sqrt{-\tilde{G}}} \begin{bmatrix} g^u & \cdot \\ \cdot & g^d \end{bmatrix} \left[ \langle N | \right]
 \end{aligned} \tag{10}$$

کمیت‌های معادله (۱۰) عبارتند از:

$$\begin{aligned}
 G_{i,j}^{imp} &= \langle i | G^{imp} | j \rangle = \frac{-ie^{ik|i-j|}}{\gamma t'' \sin(k,)} \\
 g^i &= \int_{-\pi}^{\pi} \frac{|V^i|^2}{E - \gamma t' \cos(k) + i0^+} \\
 \tilde{G} &= \begin{bmatrix} g^u G_{\nu\nu}^{imp} & g^d G_{\nu N}^{imp} \\ g^u G_{N\nu}^{imp} & g^d G_{NN}^{imp} \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{11}$$

که در این عبارت  $k, = \cos^{-1}\left(\frac{E}{\gamma t''}\right)$  است.

با فرض آنکه حالت ورودی مطابق شکل به صورت زیر باشد.

$$|\psi^{in}\rangle = |k,^u\rangle \tag{12}$$

آنگاه به سادگی می‌توان نشان داد که دامنه خروج الکترون از کانال‌های مختلف عبارت است از:

$$\begin{aligned}
 t_{12} &= 1 + \frac{-i}{\gamma t' \sin(k,)} T_{11} \\
 t_{11} &= \frac{-i}{\gamma t' \sin(k,)} T_{11} \\
 t_{13} &= t_{12} = \frac{-i}{\gamma t' \sin(k,)} T_{21}
 \end{aligned} \tag{13}$$



در محاسبه رابطه (۱۳) ماتریس پراکندگی که از معادله (۱۰) بدست آمده بود بین  $|k^i\rangle$  های مختلف ساندویچ شده است. با توجه به شکل معادله (۱۰)،  $T_{ij}$  باید مولفه های ماتریس  $T'$  به صورت زیر باشد.

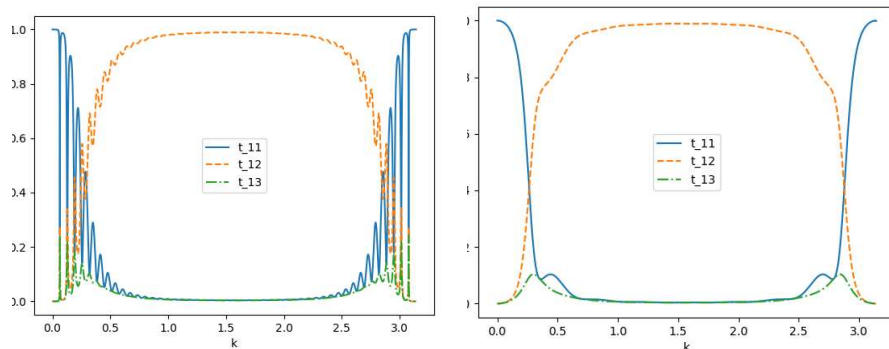
$$T' = \begin{bmatrix} T'_{11} & T'_{12} \\ T'_{21} & T'_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{1-\bar{G}} \begin{bmatrix} G_{11}^{imp} & G_{1N}^{imp} \\ G_{N1}^{imp} & G_{NN}^{imp} \end{bmatrix} \quad (14)$$

البته برای یک سامانه متقارن شکل (۲) انتظار می رود که  $T_{12} = T_{21}, T_{11} = T_{22}$  باشد. در عبارت (۱۳)،  $t_{12}$  دامنه احتمال آن است که الکترون از کانال ۱ وارد شود و از کانال ۲ خارج شود. بقیه دامنه های احتمال نیز به همین صورت است. با استفاده از داده های مقالات مقادیر زیر برای انرژی برهم کنش بدست آمده است.

$$\begin{aligned} t' &= 0.15eV \\ t'' &= 0.13eV \end{aligned} \quad (15)$$

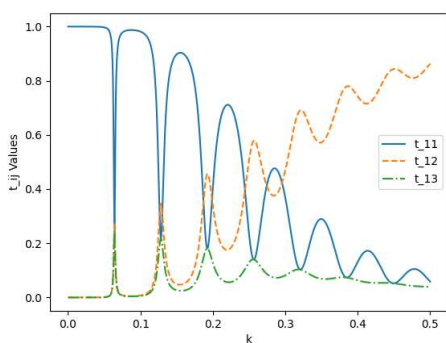
با توجه به مقادیر بالا احتمال پراکندگی از کانال ۱ به کانال های مختلف برای  $N$  های مختلف بر حسب  $k$  رسم شده است. لازم به بیان است که در بدست آوردن نتایج از برنامه پایتون استفاده شده است.

نکته جالب توجه از این شکل ها آن است که چون خط ناخالصی توسط امواج ایستاده منجر به انتقال الکترون از لبه بالا به لبه پایین می شود، بنابراین در این حالت پدیده های تشدید و پاد تشدید به وجود می آید و همان گونه که در این شکل دیده می شود پراکندگی می تواند بر حسب  $k$  به شدت تغییر کند. همچنین پدیده های تشدید و پاد تشدید با افزایش عرض نوار به شدت افزایش می یابند.



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۳ نتایج عددی برای  $t' = 0.15eV$ ,  $t'' = 0.13eV$  (الف)  $N=5$ ، (ب)  $N=20$  و (ج) نتایج شکل "ب" برای بازه کوچکتر.

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله نشان داده شد که با اضافه کردن یک خط ناخالصی در راستای دسته صندلی از یک نانو نوار فسفرین با لبه‌های زیگزاگ یک کانال بین لبه بالا و لبه پایین ایجاد می‌شود. با استفاده از فرمول بندی لیپمن- شوئینگر ماتریس پراکندگی و همچنین احتمال پراکندگی بین کانال‌های مختلف محاسبه و نشان داده شد که با توجه به ویژگی موجی بودن حالت خط ناخالصی، پدیده‌های تشدید و یا پادتشدید رخ می‌دهد. نکته دیگر آن است که تعداد پدیده‌های تشدید و پادتشدید بستگی به عرض نانو نوار دارد. به عبارتی با افزایش عرض نانو نوار تعداد امواج ایستاده نیز افزایش می‌یابد و به





همین دلیل تعداد حالت‌هایی که پدیده تشدید در آن اتفاق می‌افتد افزایش می‌یابد. نتایج این مقاله می‌تواند برای ساخت فیلترهای انرژی مورد استفاده قرار بگیرد.

## ۵. تقدیر و تشکر

نویسندگان از ریاست محترم دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف‌آباد به دلیل کمک‌های ارزشمندشان در راستای انجام این تحقیق صمیمانه تشکر می‌کنند.

## منابع

- [1] Ezawa M., Topological origin of quasi-flat edge band in phosphorene, *New Journal of Physics*, 16, 115004-115017, 2014. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/16/11/115004/meta>
- [2] Liu H., Neal A.T., Zhu Z., Luo Z., Xu X., D. Tomanek, and Ye P.D., Phosphorene: An Unexplored 2D Semiconductor with a High Hole Mobility, *ACS Nano*, 8, 4033-4041, 2014. <https://doi.org/10.1021/nn501226z>
- [3] Qingyun Wu, Lei Shen, Ming Yang, Yongqing Cai, Zhigao Huang, and Yuan Ping Feng, "Electronic and transport property of phosphorene nanoribbons", *Phys. Rev. B*, 92, 035436-035454, 2015. <https://doi.org/10.1021/nn501226z>
- [4] Rudenko A.N., Katsnelson M.I., Quasiparticle band structure and tight-binding model for single and bilayer black phosphorus, *Phys. Rev. B*, 89, 201408-201413, 2014. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.89.201408>
- [5] Amini M and Soltani M, Quantum transport through the edge states of zigzag phosphorene nanoribbons in presence of a single point defect: analytic green's function method, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 31, 215301-215311, 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab09b8>
- [6] Zare M.H., Fazileh F, and Shahbazi.F, Zero Temperature Phase Diagram of the Classical Kane-Mele-Heisenberg Model, *Phys. Rev. B*, 87, 224416-221428, 2013. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.224416>
- [7] Rezaei M., Karbaschi H., Amini M., Soltani M., and Rashedi G., Thermoelectric properties of armchair phosphorene nanoribbon in the presence of vacancy-induced impurity band, *Nano technology*, 32, 375704-375711, 2021. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac08ba>
- [8] Li L., Yu Y., Ye G.J., Ge Q., Ou X., Wu H., Feng D., Chen X.H., and Zhang. Y., Black phosphorus field-effect transistors, *Nature Nanotechnology*, 9, 372-377, 2014. <https://doi.org/10.1038/nnano.2014.35>
- [9] Chang P.-H., Bahramy M.S., Nagaosa N., and Nikoli B.K., Giant Thermoelectric Effect in Graphene-Based Topological Insulators with Heavy Adatoms and Nanopores, *Nano Letters*, 14, 3779-3784, 2014. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/aba9bf>
- [10] V. Wang, Y. Kawazoe, and W. T. Geng, Native point defects in few-layer phosphorene, *Phys. Rev. B*, 91, 045433-045442, 2015. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.045433>
- [11] B. Kiraly, N. Hauptmann, A. N. Rudenko, M. I. Kat-snelson, and A. A. Khajetoorians, "Probing Single Vacancies in Black Phosphorus at the Atomic level", *Nano Lett.* 17, 3607-3612, 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b00766>



- [12] Cupo A., Masih Das P., Chien C.-C., Danda G, Kharche N., Tristant D., Drndi M., and Meunier V., Periodic Arrays of Phosphorene Nanopores as Antidot Lattices with Tunabel Properties, *ACS Nano*, 11, 7494-7507, 2017. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b04031>
- [13] Li L.L., and Peeters F.M., Quantum transport in defective phosphorene nanoribbons: Effects of atomic vacancies, *Phys. Rev. B*, 97, 075414-075423, 2018. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.97.075414>
- [14] Michael A. Nielsen and Isaac Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition*, Cambridge University Press, Cambridge, 1, 50-100, 2010.
- [15] Paez C.J., Bahamon D.A., Pereira A.L.C., Schulz A., Zigzag phosphorene nanoribbons: one-dimensional resonant channels in two-dimensional atomic crystals, *Beilstein J. Nanotechnol.* 7, 1983-1990, 2016. <https://doi.org/10.3762/bjnano.7.189>
- [16] Economou E.N., *Greens Functions in Quantum Physics*, 3rd, Springer-Verlag, New York, 3, 10-15, 1979.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



# افزایش بازده سلول خورشیدی سیلیکونی با تبدیل طیف فرابنفش به مرئی با استفاده از نانوذرات فسفر قرمز<sup>۱</sup>

سعید صالح پور<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۸/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۷

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳

صص ۶۵ - ۷۴

## چکیده:

نانوذرات فسفر قرمز بر سطح سلول خورشیدی سیلیکونی به روش لایه‌نشانی تبخیر حرارتی فیزیکی (چگالش بر روی سطح سلول از فاز بخار) سنتز شد. لایه‌نشانی فسفر قرمز بر سطح سلول‌ها چندین بار با ضخامت‌های مختلفی از لایه‌ی فسفر تکرار شد و بعد از هر مرحله لایه‌نشانی بازده سلول خورشیدی سیلیکونی اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که بعد از لایه‌نشانی ۳۴۰ نانومتر فسفر بازده سلول از ۵/۸۶ به ۷/۰۸ درصد افزایش یافته و حدود ۲۱ درصد افزایش بازده نسبی حاصل شده است. علاوه بر آن نتایج طیف جذبی و فوتولومینسانس لایه‌ها نشان داد نانوذرات فسفر قرمز نور فرابنفش را جذب کرده و نور مرئی علاوه بر فرابنفش گسیل کرده‌اند. به عبارت دیگر لایه‌ی فسفر نور فرابنفش را به ناحیه‌ی طول موج مرئی جابجا می‌نماید. در این تحقیق از سلول خورشیدی سیلیکونی تک‌بلوری برای افزایش بازده استفاده شد و فسفر قرمز آمورف به روش تبخیر حرارتی فیزیکی بر سطح سلول خورشیدی سیلیکونی لایه‌نشانی شد. همچنین برای انجام طیف‌سنجی نوری، لام شیشه‌ای در کنار سلول‌ها در هر مرتبه لایه‌نشانی قرار داده شد. نتایج طیف‌سنجی نوری لایه‌های فسفر همچنین نشان داد میزان عبور نور فرابنفش در نمونه‌ی دارای ۳۴۰ نانومتر لایه‌ی فسفر نسبت به نمونه‌ی دارای ۵۰ نانومتر لایه‌ی فسفر کمتر است و برعکس میزان جذب نور بیشتر است، به عبارت دیگر لایه‌های ضخیم‌تر فسفر نور فرابنفش را کمتر عبور می‌دهند و بیشتر جذب می‌کنند.

**واژگان کلیدی:** نانو ذرات، سلول خورشیدی سیلیکونی، بازده، فسفر.

<sup>۱</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45587.1366>

<sup>۲</sup> پژوهشگر، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک حالت جامد، شاهرود، ایران. Email: sd.salehpour@gmail.com



## ۱. مقدمه

امروزه استفاده از انرژی خورشید موضوعی جذاب است. به دلیل اینکه انرژی ای پاک، در دسترس، رایگان و تجدیدپذیر می باشد. از طرفی سوخت فسیلی دارای معایب بسیاری از جمله ایجاد آلودگی محیطی، تولید گازهای گلخانه ای، گران بودن و تجدیدناپذیری است.

نسل های مختلفی از سلول های خورشیدی تا به امروز معرفی و ساخته شده اند. هدف از معرفی و ساخت سلول های نسل جدید، از یک سو، دست یافتن به بازده های بیشتر و از سوی دیگر کاهش هزینه های تولید است [۱، ۲]. سلول های خورشیدی سیلیکونی یکی از نسل های سلول های خورشیدی هستند که در مقایسه با نسل های جدیدتر رایج تر هستند و سهم قابل توجهی در بازار مصرف دارند. از این روی بهبود بازده این نوع از سلول های خورشیدی از اهمیت کاربردی و اقتصادی برخوردار است.

یکی از دلایل مهم بازده پایین سلول های خورشیدی سیلیکونی ناهماهنگی بین انرژی فوتون فرودی و انرژی شکاف نواری سیلیکون ( $1.12 \text{ eV}$ ) است. فوتون های با انرژی کمتر از انرژی شکاف نواری جذب نمی شوند و انرژی اضافی فوتون هایی با انرژی های بالاتر از انرژی شکاف نواری به صورت انرژی جنبشی جفت الکترون-حفره تولید شده در می آید و هدر می رود [۳، ۴].

نسبت حامل های جمع آوری شده به شار فرودی در یک طول موج مشخص را می توان از عکس العمل طیفی بدست آورد. مقدار این کمیت برای سلول های خورشیدی سیلیکونی در ناحیه ی طیف فرابنفش کمتر از مرئی است [۵].

یکی از راه های دستیابی به بازده بالاتر در سلول های خورشیدی سیلیکونی، بهبود فرآیند جذب طیف فرابنفش توسط این سلول ها است. برای رسیدن به این هدف، می توانیم طیف فرابنفش را به طول موج های طیف نور مرئی، که جذب بیشتری در سیلیکون دارند، جابه جا کنیم تا فوتون های ورودی بهتری توسط سلول خورشیدی سیلیکونی جذب شوند [۶، ۷]. برای این منظور می توان از مواد با ویژگی فوتولومینسانس استفاده کرد، به صورتی که این ماده تابش فرابنفش را جذب کند و در ناحیه ی طیفی که سلول عکس العمل طیفی بیشتری دارد نور گسیل کند، در دیگر پژوهش های مشابه راجع به این موضوع از روش های پیچیده و پرهزینه برای این کار استفاده شده است [۸-۱۱، ۱۴-۱۷]. لیو و همکاران [۸]، از نقاط کوانتومی کادمیوم سلناید به عنوان مبدل طیف فرابنفش به مرئی استفاده کردند و بازده سلول را از  $14/45$  به  $15/87$  درصد افزایش دادند، یعنی افزایش بازده نسبی  $9/83$  درصد را بدست آوردند. ژو و همکاران [۱۷]، نانوبلورهای  $\text{CsPbCl}_{1.5}\text{Br}_{1.5}:\text{Yb}^{3+}, \text{Ce}^{3+}$  را برای تبدیل طیف استفاده کردند و بازده را از  $18/1$  به  $21/5$  درصد افزایش دادند که یعنی افزایش



بازده نسبی ۱۸/۸ درصد را بدست آوردند. در پژوهش حاضر روشی ساده و در عین حال کم هزینه آزموده شده است که توانایی اجرا بر روی سلول‌های خورشیدی از پیش ساخته شده را نیز دارد. بدین معنی که نیاز به تغییر مراحل ساخت و ساختار داخلی سلول خورشیدی نیست. همچنین افزایش بازده نسبی حدود ۲۱ درصد را بدست آوردیم که نسبت به پژوهش‌های مشابه پیشین بیشتر است. ما از نانوذرات فسفر قرمز استفاده کردیم که می‌تواند نور فرابنفش را جذب کند و افزون بر فرابنفش، نور مرئی گسیل کند. برای این منظور فسفر قرمز به روش تبخیر حرارتی فیزیکی (چگالش بر روی سطح سلول از فاز بخار) بر روی سطح سلول لایه‌نشانی شد و نانوذرات فسفر قرمز بر روی سطح سلول تشکیل شد. نتایج اندازه‌گیری بازده سلول نشان داد بازده از ۵/۸۶ به ۷/۰۸ درصد افزایش یافته است (۱/۲۲ درصد افزایش بازده). نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در کمترین حالت حدود ۲۱ درصد افزایش بازده نسبی با این روش قابل دستیابی است.

## ۲. روش کار

در این پژوهش از سلول‌های خورشیدی سیلیکونی تک بلوری استفاده شد و بازده آن‌ها بهبود یافت. ضخامت‌های مختلف فسفر با استفاده از روش تبخیر حرارتی فیزیکی تحت فشار خلاء حدود  $10^{-5}$  بر روی سطح سلول‌ها لایه‌نشانی شد. ضخامت لایه‌های فسفر با استفاده از یک نوسانگر بلور کوارتز حین لایه‌نشانی اندازه‌گیری شد. ابتدا ۵۰ نانومتر فسفر قرمز بر سطح نمونه‌ها لایه‌نشانی شد. سپس نمونه‌ها از دستگاه تبخیر حرارتی خارج و اندازه‌گیری جریان، ولتاژ، بازده سلول و طیف‌سنجی‌های نوری لازم انجام شد. در مرحله بعد، نمونه‌ها برای لایه‌نشانی بیشتر در دستگاه قرار گرفت و به ترتیب ضخامت‌های ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰، ۳۴۰ نانومتر بر سطح نمونه‌ها نشانده شد. پس از هر مرحله لایه‌نشانی اندازه‌گیری جریان، ولتاژ، بازده سلول و طیف‌سنجی‌های نوری لازم انجام شد. قبل از شروع لایه‌نشانی‌ها، اتصالات اهمی با استفاده از چسب نقره به پشت و روی سلول متصل شدند.

برای انجام مشخصه‌یابی نوری لایه‌های فسفر؛ یک لام شیشه‌ای در محفظه لایه‌نشانی در کنار سلول‌ها قرار داده شد. در هر مرحله لایه‌نشانی همان ضخامت لایه فسفر روی سلول‌ها بر روی لام شیشه‌ای نیز لایه‌نشانی شد. دستگاه طیف‌سنج نوری قبل از انجام مشخصه‌یابی با یک لام تمیز و بدون لایه‌نشانی کالیبره شد. در پژوهش پیش روی از فسفر قرمز آمورف با چگالی  $\frac{g}{cm^3}$  ۲/۲ و خلوص

بیش از ۹۷ درصد استفاده شد. پیش از لایه‌نشانی، سطوح سلول‌های خورشیدی سیلیکونی و لام شیشه‌ای با اتانول و استون تمیز شدند تا آلودگی‌های سطحی حذف شوند. مشخصات سلول‌های خورشیدی (جریان، ولتاژ و بازده) قبل و بعد از فرآیند لایه‌نشانی فسفر قرمز تحت شرایط نوری استاندارد AM1.5D با استفاده از شبیه‌ساز خورشیدی NanoSAT-IIIS-210+ اندازه‌گیری شد. جذب و عبور لایه‌های فسفر با استفاده از دستگاه طیف‌سنج نوری SHIMADZU-UV1800 اندازه‌گیری شد.

### ۳. بحث و نتایج

پس از چهار مرتبه لایه‌نشانی فسفر با ضخامت ۵۰ نانومتر و سپس یک بار لایه‌نشانی فسفر با ضخامت ۱۴۰ نانومتر بر روی سطح سلول X، نام سلول بعد از هر مرحله لایه‌نشانی به صورت X100، X50، X150، X200 و X340 نام‌گذاری شد. مشخصات سلول (جریان، ولتاژ و بازده) بعد از هر مرحله لایه‌نشانی اندازه‌گیری شد (نتایج اندازه‌گیری در جدول (۱) آمده است). نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد که بعد از لایه‌نشانی ۳۴۰ نانومتر فسفر بازده سلول از ۵/۸۶ به ۷/۰۸ درصد افزایش یافته است و حدود ۲۱ درصد افزایش بازده نسبی بدست آمده است.

جدول ۱ مشخصات سلول خورشیدی X قبل و بعد از هر لایه‌نشانی.

نام سلول	$V_{mp}(V)$	$J_{mp}(mA/cm^2)$	بازده (%)	تغییرات بازده (%)	ضخامت لایه نشانداده شده (nm)	جمع ضخامت همه لایه‌ها (nm)	$V_{oc}(V)$	$J_{sc}(mA/cm^2)$
X	۰/۳۶	۱۶/۴۷	۵/۸۶	—	۰	۰	۰/۵۵	۲۱/۸۳
X50	۰/۳۹	۱۵/۵۳	۵/۹۸	۰/۱۲+	۵۰	۵۰	۰/۵۱	۲۲/۹۶
X100	۰/۳۶	۱۷/۴۳	۶/۲۹	۰/۳۱+	۵۰	۱۰۰	۰/۵۵	۲۵/۱۷
X150	۰/۳۸	۱۷/۴۰	۶/۵۴	۰/۲۵+	۵۰	۱۵۰	۰/۵۵	۲۳/۲۷
X200	۰/۳۷	۱۷/۷۳	۶/۶۳	۰/۰۹+	۵۰	۲۰۰	۰/۵۵	۲۴/۹۷
X340	۰/۳۸	۱۸/۷۸	۷/۰۸	۰/۴۵+	۱۴۰	۳۴۰	۰/۵۳	۲۳/۲۸

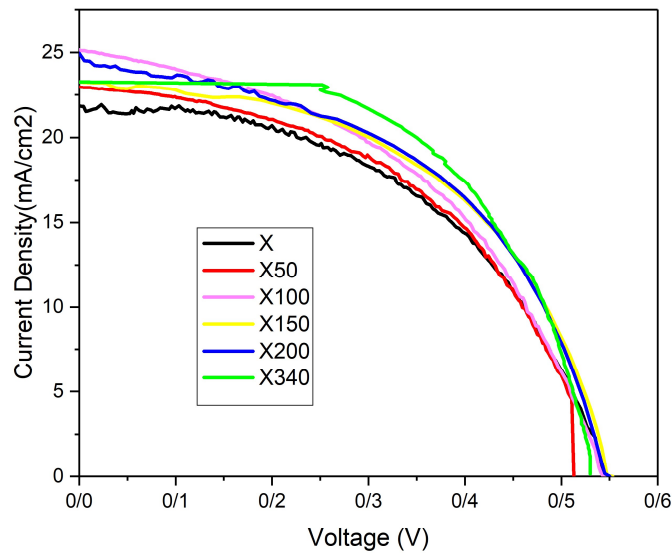


مشخصات سلول‌ها عبارتند از:

- چگالی جریان در توان بیشینه خروجی، این کمیت با جریان در توان بیشینه خروجی بر اساس این معادله  $J_{mp} = I_{mp}/A$  ارتباط دارد (A مساحت سطح سلول است که مقدار آن  $2 \times 2 = 4 \text{ cm}^2$  می‌باشد).
- ولتاژ در توان بیشینه خروجی،  $J_{sc} (mA/cm^2)$ : چگالی جریان اتصال کوتاه،  $V_{oc} (V)$ : ولتاژ مدار باز، بازده با رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [۱۲].

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{in}} \quad (1)$$

در رابطه‌ی بازده  $P_{in}$  شار فرودی بر سلول است و مقدار آن  $1 \text{ kw/m}^2$  تنظیم شده است که برابر شرایط استاندارد نوری AM1.5D است. همان‌گونه که در شکل (۱) (نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ سلول) و جدول (۱) مشاهده می‌شود، آشکار است که بازده سلول بعد از هر مرتبه لایه‌نشانی افزایش یافته است.



شکل ۱ نمودار چگالی جریان بر حسب ولتاژ سلول X قبل از لایه‌نشانی و بعد از لایه‌نشانی ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر لایه فسفر.

شکل (۲- الف و ب) طیف عبوری و جذبی لایه‌های فسفر به ضخامت ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر را نشان می‌دهد که به روش آزمایش طیف‌سنجی نوری فرابنفش- مرئی اندازه‌گیری شده است. شکل (۲- الف) نشان می‌دهد که لایه‌های فسفر عبور کمتری در طیف فرابنفش نسبت به سایر بخش‌های طیف نور دارند. همچنین لایه‌های فسفر ضخیم‌تر عبور کمتری در ناحیه فرابنفش دارند. لایه‌ی فسفر بخش مرئی و مادون قرمز نور را تا حد زیادی عبور می‌دهد.

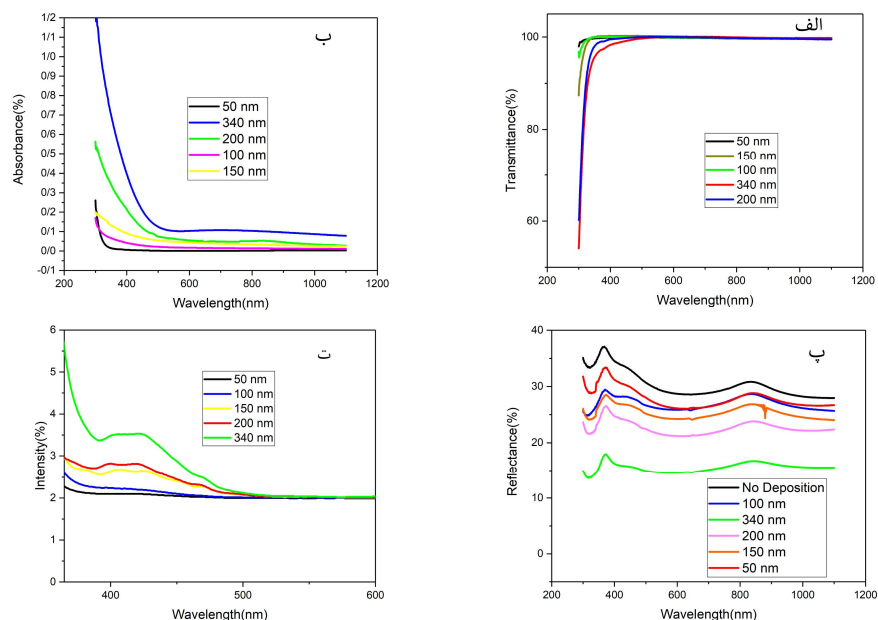
طیف جذبی لایه‌های فسفر با ضخامت ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر در شکل (۲- ب) آورده شده است. از این شکل می‌توان نتیجه گرفت که لایه‌های فسفر جذب بیشتری در ناحیه‌ی فرابنفش نسبت به سایر محدوده‌های طول موج طیف نور دارند و لایه‌های ضخیم‌تر فسفر جذب بیشتری در این ناحیه دارند. نتایج کار حاضر با کار قبلی Wu و همکارانش هماهنگی دارد [۱۳].

بازتاب سطحی سلول قبل و بعد از لایه‌نشانی ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر فسفر اندازه‌گیری شد و در شکل (۲- پ) آمده است. این شکل نشان می‌دهد که بازتاب سطحی سلول پس از لایه‌نشانی فسفر کاهش یافته است. این رخداد می‌تواند عاملی برای افزایش بازده سلول باشد.

نتایج آزمایش فوتولومینسانس برای لایه‌های فسفر با ضخامت ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر در شکل (۲- ت) آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که لایه‌ی فسفر، گسیل پهنی در ناحیه‌ی فرابنفش و مرئی داشته که در لایه‌های ضخیم‌تر این گسیل شدیدتر است. با توجه به نمودار طیف جذبی شکل (۲- ب) این بدین معنی است که لایه‌ی فسفر نور فرابنفش را جذب کرده است و نور مرئی را افزون بر فرابنفش گسیل می‌کند. در ناحیه‌ی مرئی عکس‌العمل طیفی سلول خورشیدی سیلیکونی بالاتر از ناحیه‌ی فرابنفش است [۵]، بنابراین آشکار است که لایه‌ی فسفر بازده سلول را افزایش می‌دهد.

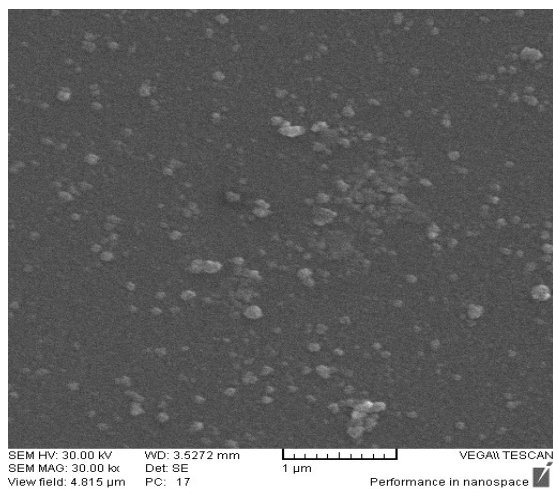






**شکل ۲** (الف) طیف عبوری لایه‌های فسفر با ضخامت ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر، (ب) طیف جذبی لایه‌های فسفر با ضخامت ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر، (پ) بازتاب سطح سلول قبل و بعد از لایه‌نشانی فسفر با ضخامت‌های مختلف (۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر)، (ت) نمودار طیف فوتولومینسانس لایه‌ی فسفر با ضخامت ۵۰ تا ۳۴۰ نانومتر

برای مطالعه‌ی اثر دانه بندی روی سطح نمونه‌ها بر بازده سلول خورشیدی، تصویر SEM از سطح سلول (شکل ۳) تهیه شد. نتایج نشان می‌دهد ذرات فسفر در نقاطی جمع شده و در بعضی نقاط خوشه‌هایی تشکیل داده‌اند. اندازه‌ی ذرات این خوشه‌ها از حدود ۱۵ نانومتر تا حدود ۹۰ نانومتر متغیر است.



شکل ۳ تصویر SEM از سطح سلول با حدود ۵۰ نانومتر لایه ی فسفر.

نانو ذرات نقش کلیدی در تبدیل نور فرابنفش به مرئی دارند. افزون بر آن، این خوشه های نانوذرات که بر روی سطح سلول پراکنده هستند، کمک می کنند تا نور مرئی از میان آن ها عبور کرده و بی واسطه و مستقیم، بدون جذب و پراکنده گی به سطح سلول برسد. اما اگر لایه ی روی سطح سلول یکنواخت باشد، ممکن است نور مرئی را جذب یا پراکنده کند.

#### ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش برای افزایش بازده سلول خورشیدی سیلیکونی از نانوذرات فسفر قرمز با ویژگی فوتولومینسانس استفاده شد، که می تواند نور فرابنفش را جذب و در ناحیه ی مرئی و فرابنفش نور گسیل کنند. لایه نشانی فسفر قرمز بر سطح سلول به روش تبخیر حرارتی فیزیکی بازده سلول را از ۵/۸۶ به ۷/۰۸ افزایش داده و حدود ۲۱ درصد افزایش بازده نسبی ایجاد کرده است. این روش ساده و کم هزینه را برای افزایش بازده سلول های خورشیدی سیلیکونی می توان پیشنهاد نمود.

#### ۵. تقدیر و تشکر

از دانشگاه صنعتی شاهرود برای در اختیار دادن وسایل آزمایشگاهی تشکر می کنیم.



## منابع

- [1] Bera, S. Mondal S., Majumder A., Paul S., et al., "A potential roadmap on the development, application, and loopholes of metal-organic frameworks in high-performance third-generation solar cells", *Chemistry of Inorganic Materials*, 1, 100024, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.cinorg.2023.100024>
- [2] Rahman M. F., Hasan M. K., Chowdhury M., Islam M. R., et al., "A qualitative Design and optimization of CIGS-based Solar Cells with Sn2S3 Back Surface Field: A plan for achieving 21.83 % efficiency", *Heliyon* 9 (12), e22866, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22866>
- [3] Pattnaik A., Shivangi and Kumar M., "Improving the short wavelength response of the multi-crystalline silicon solar cell by using 10% Erbium doped ZnS nanoparticle-based downshifting layer", *Results in Optics* 12, 100459, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rio.2023.100459>
- [4] Wu C.-K., Zou S., Peng C.-W., Gu S.-W., et al., "Improving the UV-light stability of silicon heterojunction solar cells through plasmon-enhanced luminescence downshifting of YVO4:Eu3+, Bi3+ nanophosphors decorated with Ag nanoparticles", *Journal of Energy Chemistry* 81, 212-220, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.01.050>
- [5] Saffar A. P. B., B.D., "Thermal effects investigation on electrical properties of silicon solar cells treated by laser irradiation", *Int. Journal of Renewable Energy Development* 3 (3), 184-187, 2014. <https://doi.org/10.14710/ijred.3.3.184-187>
- [6] Abdelbar M. F., Abdelhameed M., Esmat M., El-Kemary M., et al., "Energy management in hybrid organic-silicon nanostructured solar cells by downshifting using CdZnS/ZnS and CdZnSe/ZnS quantum dots", *Nano Energy* 89, 106470, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2021.106470>
- [7] Abdelbar M. F., El-Kemary M. and Fukata N., "Downshifting of highly energetic photons and energy transfer by Mn-doped perovskite CsPbCl3 nanocrystals in hybrid organic/silicon nanostructured solar cells", *Nano Energy* 77, 105163, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105163>
- [8] Pei L., Gong X.-K., Li L., Ma Z.-H., et al., "3D surface microstructure of silicon modified by QDs to improve solar cell performance through down-conversion and anti-reflection mechanism", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 675, 132015, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.132015>
- [9] Wu C.-K., Zou S., Peng C.-W., Gu S.-W., et al., "Improving the UV-light stability of silicon heterojunction solar cells through plasmon-enhanced luminescence downshifting of YVO4:Eu3+, Bi3+ nanophosphors decorated with Ag nanoparticles", *Journal of Energy Chemistry* 81, 212-220, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.01.050>
- [10] Ma X., Chen Y., Liu Y., Zhang X., et al., "Ce3+-Yb3+, Tb3+-Yb3+ and Pr3+-Nd3+-Yb3+ mixed-doped TeO2-ZnO-Na2O glasses for enhancing the efficiency of silicon solar cells", *Optical Materials* 145, 114501, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2023.114501>
- [11] Flores-Pacheco A., Montes-Bojórquez J. R., Álvarez-Ramos M. E. and Ayón A. A., "Down-shifting and antireflective effects of ZnO/PMMA thin films and their influence on silicon solar cells performance", *Micro and Nano Engineering* 15, 100128, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2022.100128>
- [12] Hong C. K., Ko H.-S., Han E.-M., Yun J.-J., et al., "Enhanced efficiency of dye-sensitized solar cells doped with green phosphors LaPO4: Ce, Tb or (Mg, Zn)Al11O19:Eu", *Nanoscale Research Letters* 8 (1), 219, 2013. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-8-219>
- [13] Wu Q., Liu X., Li B., Tan L., et al., "Eco-friendly and degradable red phosphorus nanoparticles for rapid microbial sterilization under visible light", *Journal of Materials Science & Technology* 67, 70-79, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.084>



- [14] Kamal R. and Hafez H., "Novel Down-converting single-phased white light Pr<sup>3+</sup>-doped BaWO<sub>4</sub> Nanophosphors material for DSSC applications", *Optical Materials* 121, 111646, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2021.111646>
- [15] Luo X., Ahn J. Y. and Kim S. H., "Aerosol synthesis and luminescent properties of CaAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu<sup>2+</sup>, Nd<sup>3+</sup> down-conversion phosphor particles for enhanced light harvesting of dye-sensitized solar cells", *Solar Energy* 178, 173-180, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.12.029>
- [16] Khurshid S., Latif H., Rasheed S., Sharif R., et al., "Enhancement in absorption spectrum by ITO coated, down converting glass as a photoanode substrate for efficient PbS/CdS quantum dots sensitized ZnO nano-rods array solar cell", *Optical Materials* 124, 111991, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.111991>
- [17] Zhou D., Liu D., Pan G., Chen X., et al., "Cerium and Ytterbium Codoped Halide Perovskite Quantum Dots: A Novel and Efficient Downconverter for Improving the Performance of Silicon Solar Cells", *Advanced Materials* 29, 1704149, 2017. <https://doi.org/10.1002/adma.201704149>



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



# آنالیز دوبعدی سرعت نقاط درخشان ناحیه انتقالی خورشید با روش ردیابی همبستگی موضعی<sup>۱</sup> احسان توابی<sup>۲</sup>، معصومه تاره<sup>۳</sup> و سیما ضیغمی<sup>۴\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۹

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳

صص ۷۵ - ۹۰

## چکیده:

دانش ما در مورد منشاء و روش‌های انتقال نقاط روشن در شبکه خورشید نقش مهمی در درک پرتاب مواد و انتقال انرژی به تاج خورشیدی دارد. در خارج از نواحی فعال خورشید با وجود اینکه خورشید آرام نامیده می‌شود، پیوسته انواع مختلفی از پدیده‌های کوچک مقیاس در مرزهای طرح‌های سلولی بالای شبکه‌ی مغناطیسی، رخ می‌دهد. شناخت نقاط درخشان کمک موثری در بررسی سیخک‌های خورشیدی دارد. در این پژوهش نقاط درخشان ناحیه انتقالی خورشید را مطالعه و سرعت ظاهری آن‌ها با روش ردیابی همبستگی موضعی فوریه (FLCT) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که این نقاط از نظر جهت سرعت و میزان روشنایی با یکدیگر متفاوت‌اند. طول عمر و میانگین سرعت افقی آن‌ها به ترتیب به اندازه تقریبی ۱۰۰ ثانیه و ۴ کیلومتر بر ثانیه برآورد شد. به تازگی، دسته جدیدی از سیخک‌های خورشیدی مشاهده شده که طول عمری در حدود ۱۰۰ ثانیه و سرعت افقی معادل ۳-۴ کیلومتر بر ثانیه دارند. با توجه به تحلیل دوبعدی سرعت ظاهری نقاط روشن بر روی مرز شبکه، این نقاط می‌توانند همتای دیسک سیخک‌های نوع دوم باشند. همچنین تحلیل میدان دوبعدی سرعت‌ها، چرخش‌هایی را در آن‌ها نشان می‌دهد که می‌تواند موجب برانگیخته شدن پالس‌های آلفونی باشد.

**واژگان کلیدی:** نقاط درخشان خورشید، ردیابی همبستگی موضعی فوریه، پالس‌های آلفونی.

<sup>۱</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46290.1387>

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران. Email: e\_tavabi@pnu.ac.ir

<sup>۳</sup> دانش آموزانه کارشناسی ارشد، موسسه آموزش عالی عبدالرحمن صوفی رازی، زنجان، ایران. Email: pigeon\_547@yahoo.com

<sup>۴</sup> استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول). Email: zeighami@iaut.ac.ir



## ۱. مقدمه

در ناحیه انتقالی خورشید، رویدادهای گذرایی، همراه با درخششی به صورت نقاط درخشان<sup>۱</sup> ظاهر می شود که با تلسکوپ و طیف نگار با وضوح بالا قابل مشاهده است [۱-۴]. این پدیده ها می توانند پروفایل های غیر گاوسی با افزایش قوی در عرض پروفایل تا ۲ ثانیه قوسی ایجاد کنند [۵، ۶]. نقاط درخشان و فعالیت هایی که در مناطق فعال<sup>۲</sup> رخ می دهند فراوان هستند، از جمله: رویدادهای انفجاری [۷]، حفره های تاج<sup>۳</sup>، شبکه خورشید آرام<sup>۴</sup> و درخشش های داخل شبکه که نشانه های قوی از بخش مغناطیسی خورشید به شمار می روند [۸]. لایه مغناطیسی خورشیدی از راه فتوسفر مغناطیسی شده، کرومسفر، ناحیه گذار<sup>۵</sup> و تاج به فضای بین سیاره ای نفوذ می کند [۹]. "خورشید آرام" ناحیه ای از سطح خورشید است که از مناطق فعال و لگه های خورشیدی دور است. بخش مغناطیسی در خورشید آرام به دو ناحیه مرز شبکه و داخل شبکه تقسیم می شود [۱۰]. ناحیه داخل شبکه دور از مرزهای ابردانه ای قرار می گیرد. مرز شبکه یک منطقه پویا است که طول عمر آن دارای تغییرات مکانی و زمانی زیادی است. افزون بر ویژگی های استاتیکی، آگاهی از رفتار دینامیکی نقاط درخشان مغناطیسی برای مطالعات کروموسفر خورشیدی و ناحیه انتقالی ضروری است.

کروموسفر خورشید از ساختارهایی به نام "سیخک" تشکیل شده است. اسپیکول ها انفجارهای پلاسمایی هستند که کمابیش هر پنج دقیقه یکبار رخ می دهند و مواد داخل آنها با سرعتی در حدود ۸۰ کیلومتر بر ثانیه به سمت بالا حرکت می کنند [۱۱]. اسپیکول ها حتی در خورشید آرام نیز دیده می شوند. جت ها نقش قدرتمندی در تعادل جرم تاج خورشیدی دارند. روشنایی جت های کوچک با دما و ارتفاع تغییر می کند و مطالعات طیف سنجی داده های ارزشمندی در مورد آنها از راه تغییر در مشخصات خطوط طیفی ارائه می دهد. تغییر دوپلری در این خطوط، سرعت در امتداد خط دید و تغییرات آن با زمان و ارتفاع از سطح خورشید را مشخص می کند [۱۲، ۱۳]. با جابه جایی خطوط طیفی، اندازه گیری سرعت های چرخشی غیر حرارتی امکان پذیر است که منجر به مشاهدات غیرمستقیم امواج آلفون پیچشی می شود. این امواج می توانند تاج را با فوران پلاسمای داغ و انتقال انرژی به صورت امواج مغناطیسی هیدرو دینامیکی گرم کنند [۱۴، ۱۵]. شبیه سازی های عددی از ناحیه همرفت خورشیدی توانایی تحول الگوهای دانه بندی و ظهور مناطق فعالی را دارند که با مشاهدات در بازه های زمانی کوتاه داخل حوزه هایی از ناحیه همرفت بالای تاج پایینی

<sup>1</sup> Bright points

<sup>2</sup> Active regions

<sup>3</sup> Coronal holes

<sup>4</sup> Quiet Sun

<sup>5</sup> Transition region



صورت می‌گیرد. مدل‌های کنونی حتی تغییرات انرژی را که با تولید رویدادهای فورانی سازگار است پیش‌بینی کرده و وقوع یک درخشش از راه شبیه‌سازی‌های عددی حقیقی تایید شده است. روش ردیابی همبستگی محلی<sup>۱</sup> [۱۶]، ردیابی همبستگی محلی مبتنی بر فوریه<sup>۲</sup> (FLCT) [۱۷-۱۹] از شدت نگارهای پشت هم برای تخمین جریان‌های نوری در فوتوسفر، استفاده می‌کنند. یعنی میدان سرعتی که باید روی یک تصویر اعمال شود (مانند یک تصویر پیوسته) تا در زمان بعدی آن را به تصویر هم‌تای خود متصل کند.

در پژوهش حاضر، پس از پردازش تصاویر IRIS، طول عمر، جهت و مقدار سرعت نقاط درخشان ناحیه انتقالی خورشید به روش FLCT بدست آمد. در ادامه، با استفاده از برنامه‌ی IDL و نرم افزار متلب بردارهای سرعت و سپس خطوط جریان دوبعدی بدست آمد.

## ۲. مشاهدات

در ابتدای کار با استفاده از سایت <http://iris.lmsal.com/search> تصاویر مورد نظر دریافت شد. داده مورد نظر باید شرایط ویژه‌ای را دارا باشد، یعنی باید منطقه‌ای از دیسک خورشید را در نظر گرفت که هم نقاط درخشان بیشتری داشته باشد و هم از زاویه دید مناسبی برخوردار باشد. همچنین این تصاویر می‌بایست دارای فاصله زمانی کم باشند. فاصله زمانی تصاویر دریافت شده برای هر طول موج برابر با ۲۰ ثانیه می‌باشد. در هر طول موج ۱۲۰۰ تصویر و در کل ۴۸۰۰ تصویر ثبت شده است. این تصویرها روی دیسک بوده و اختلاف زمانی پایین برای تصاویر در نظر گرفته شده است. برای دریافت تصاویری مناسب برای نقطه‌یابی با استفاده از برنامه متلب تصاویر با واحد اندازه‌گیری پیکسل (۰/۳ ثانیه کمانی) دریافت شد. این داده‌ها از سری داده‌های دارای شکاف ثابت تلسکوپ می‌باشد. جدول (۱) مشخصات این سری داده را نشان می‌دهد. در شکل (۱) تصاویر ناحیه دریافتی از IRIS به ترتیب در چهار طول موج ۱۳۳۰، ۱۴۰۰، ۲۷۹۶، ۲۸۳۲ آنگستروم دیده می‌شود.

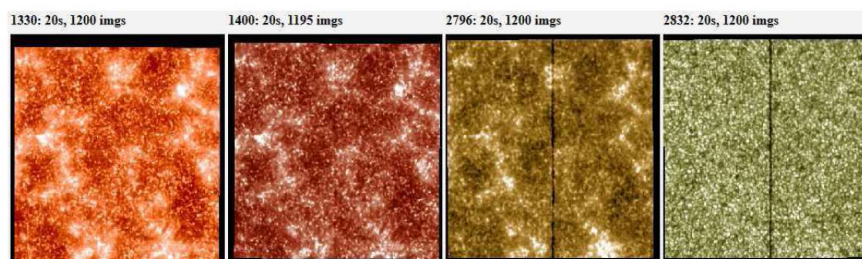
<sup>1</sup> Local correlation tracking

<sup>2</sup> Fourier local correlation tracking



جدول ۱ مشخصات داده مورد بررسی این مقاله.

تاریخ	شروع (U.T.) پایان (U.T.)	مقیاس افقی مقیاس قائم (ثانیه کمانی)	مرکز تصویر (ثانیه کمانی)	میدان دید افقی میدان دید قائم (ثانیه کمانی)	اندازه پیکسل (km)	فاصله زمانی تصاویر (s)
۲۷ می ۲۰۱۵	۱۱:۵۶:۱۵ ۱۸:۴۱:۴۷	۰/۳ ۰/۳	-۳۲ -۳۸	۱۲۰ ۱۱۹	۲۴۰	۲۰



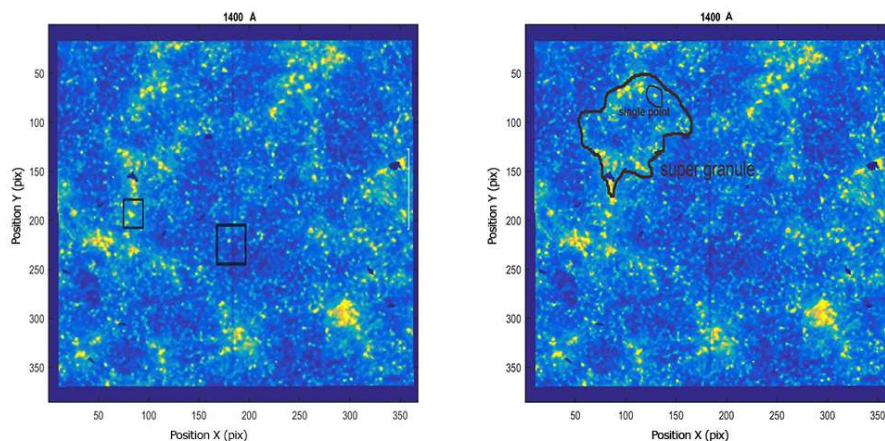
شکل ۱ تصاویر ناحیه دریافتی از IRIS در چهار طول موج ۱۳۳۰، ۱۴۰۰، ۲۷۹۶، ۲۸۳۲ آنگستروم.

### ۳. بررسی داده‌ها

برجسته‌ترین مشخصه‌های کوچک مقیاسی که در مرزهای شبکه قرار دارند، جت‌های خورشیدی هستند که در خط  $H\alpha$  بهتر مشاهده می‌شوند. در مرحله نقطه‌یابی ابتدا با استفاده از تصاویر دریافتی از فضاییمای آیریس و تبدیل به تصویری مناسب توسط نرم‌افزار متلب، نقاط روشنی روی مرز و داخل شبکه که به صورت مجزا می‌باشند، انتخاب شد. با بزرگنمایی نقاط درخشان توانستیم مختصات مربوط به نقطه را بیابیم. برای رسیدن به نقطه درخشان مطلوب تعداد زیادی نقطه روشن در نظر گرفته شد تا از این تعداد، نقاط درخشانی بر روی مرز شبکه و در داخل شبکه که با شرایط کار حاضر سازگار بود، انتخاب شد. شکل (۲) - سمت راست، ناحیه‌ای از شبکه و نمونه‌ای از نقاط درخشان را که از تصویر دریافتی از ماهواره آیریس در طول موج ۱۴۰۰ آنگستروم بدست آمده، نشان می‌دهد. شکل (۲) - سمت چپ، نمونه‌ای از نقاط درخشان در مرز و داخل شبکه را نشان می‌دهد.







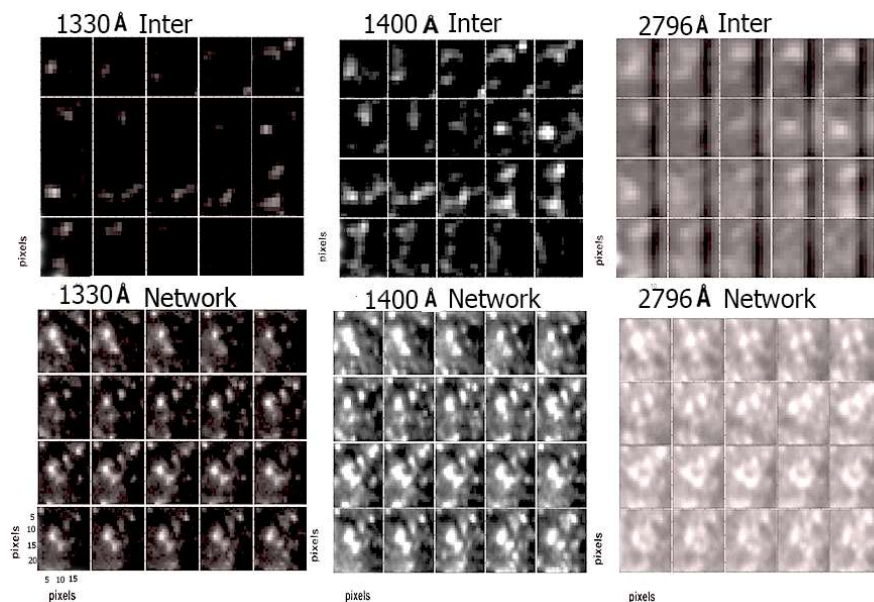
**شکل ۲** (سمت راست) ناحیه‌ای از شبکه و نمونه‌ای از نقاط درخشان که از تصویر دریافتی از ماهواره آپریس در طول موج ۱۴۰۰ آنگستروم بدست آمده، و (سمت چپ) نمونه‌ای از نقاط درخشان در مرز و داخل شبکه.

برای تعیین طول عمر نقاط درخشان، پوسترهایی از تحول زمانی آن‌ها در طول موج‌های مختلف بدست آمد. چون درجه وضوح نقاط روشن در طول موج‌های مختلف متفاوت بود، به همین دلیل طول موج‌های مختلف امتحان شد. با مشاهده‌ی پوسترها افت‌وخیز نقاط روشن و جابه‌جایی آن‌ها در کنار هم دیده می‌شوند. پوسترها با استفاده از نرم‌افزار متلب آماده شده و هر پیکسل برابر با  $0.3$  ثانیه کمانی یا  $240$  کیلومتر می‌باشد. شکل (۳)، پوسترهایی تهیه شده از نقاط درخشان داخل شبکه و روی شبکه در سه طول موج را نشان می‌دهد. سه تصویر بالایی و پایینی به ترتیب تحول زمانی نقطه روشنی را در داخل شبکه و روی شبکه نشان می‌دهند. همچنین نتایج تحلیل این پوسترها نشان می‌دهد که طول عمر آن‌ها کمابیش  $100$  ثانیه می‌باشد.

با توجه به اینکه طول موج  $1400$  آنگستروم در ناحیه‌ی انتقالی قرار دارد و در این طول موج نقاط را با روشنی بیشتری می‌بینیم، بر روی این نقاط کار می‌شود. با توجه به پوسترها نقطه‌ی روی مرز شبکه جابه‌جایی کمتری نسبت به نقطه‌ی داخل شبکه دارد و همچنین نقطه‌ی روی شبکه درخشش بیشتر و ثابت‌تری نسبت به نقطه‌ی داخل شبکه دارد.

پس از بدست آوردن تصاویر پدیدار و ناپدید شدن نقاط درخشان روی دیسک خورشید، جهت و مقدار سرعت ظاهری نقاط درخشان محاسبه می‌شود. برای این کار پس از پردازش تصاویر، با روش FLCT تحت نرم‌افزار IDL، مرحله جداسازی راستای تصاویر در امتداد طولی  $X$  و عرضی  $Y$  و

آمیزه‌های از آن‌ها انجام می‌شود. بدین ترتیب با اجرای این مراحل در پایان مقدار و جهت سرعت ظاهری حاصل از تصاویر بدست خواهد آمد. جزئیات مراحل به این صورت است که ابتدا نقاط روشن داخل و روی شبکه پیدا می‌شود. سپس فریم‌ها را به صورت مستطیل در آورده تا ابعاد و دید بهتری از نقطه روشن داشته باشیم. ۱ الی ۳۰ تصویر از ۱۲۰۰ تصویر اولیه انتخاب شد. در برنامه IDL سه کد به نام‌های Cross-cor.pro و Vel-Ccor.pro و Cmove.pro اجرا می‌شود.



شکل ۳ پوسترهای تهیه شده از نقاط درخشان داخل شبکه و روی شبکه در سه طول موج. سه تصویر بالایی و پایینی به ترتیب تحول زمانی نقطه روشنی در داخل شبکه و روی شبکه را نشان می‌دهند. در هر تصویر مراحل تحول زمانی به ترتیب از چپ به راست و از بالا به پایین می‌باشد.

تفاوت دو کد برنامه LCT و FLCT این است که کد LCT بر اساس میزان همبستگی یک جفت تصویر متوالی دو بعدی اجرا می‌شود و محاسبات تنها ریاضی است و هیچ قانون پیوستگی فیزیکی را شامل نمی‌شود. بنابراین در فیزیک خورشید دارای کاستی‌هایی است. فیشر و ولش (۲۰۰۸) با بازنگری در این برنامه توانستند کد جدیدی را ارائه دهند که به نام FLCT نامگذاری شده است. اجرای این کد شامل مراحل زیر است:

- ۱- انتخاب دو تصویر پشت سر هم،



۲- محاسبه تابع همبستگی<sup>۱</sup> بین دو تصویر به ازای هر پیکسل و

۳- مشخص کردن محل بیشینه تابع همبستگی به ازای هر پیکسل.

بنابراین، ابتدا دو تصویر به صورت دو ماتریس با شدت‌های  $I_1, I_2$  در زمان‌های  $t_1$  و  $t_2 = t_1 + dt$  به عنوان ورودی به برنامه تعریف می‌شود. سپس کد FLCT دو تصویر را به یک تابع گاوسی با عرض  $\sigma$  که در محل پیکسل  $(x_i, y_j)$  متمرکز شده به صورت زیر ضرب می‌کند:

$$S_1^{(i,j)}(x, y) = I_1(x, y) e^{-[(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2] / \sigma^2}$$

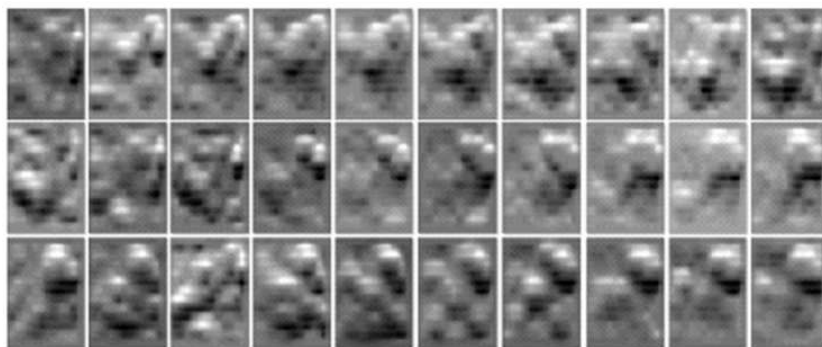
$$S_2^{(i,j)}(x, y) = I_2(x, y) e^{-[(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2] / \sigma^2}$$

برای  $(i, j)$  امین پیکسل، تابع همبستگی وابسته به زیر تصویرهای (۱) و (۲) به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۸، ۱۹]:

$$C^{i,j}(\delta x, \delta y) = \iint dx dy S_1^{i,j*}(-x, -y) S_2^{i,j}(\delta x - x, \delta y - y)$$

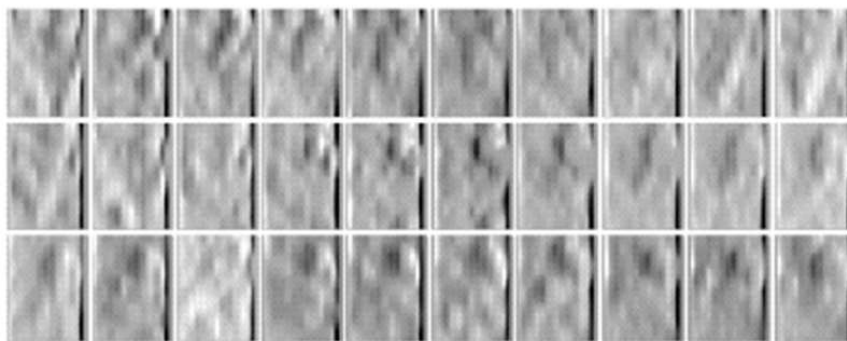
سپس برای هر دو زیر تصویر  $S_1, S_2$  که در مکان  $(x_i, y_j)$  متمرکز شده، با محاسبه بیشینه تابع همبستگی  $C(\delta x, \delta y)$  جابه‌جایی‌های  $\delta x, \delta y$  بدست می‌آید. مقدار سرعت از حاصل تقسیم دامنه جابه‌جایی‌ها بر  $\delta t = t_2 - t_1$  بدست می‌آید (یعنی  $v_x = \delta x / \delta t$  و  $v_y = \delta y / \delta t$ ). ابعاد تصاویر، درجه جداسازی فضایی و فاصله زمانی بین دو تصویر پشت هم را به عنوان ورودی به برنامه معرفی نموده و سپس برنامه اجرا می‌شود. شکل‌های (۴) و (۵) خروجی این برنامه است که از چپ به راست و از بالا به پایین تحول زمانی تصاویر پردازش شده حاصل از خروجی اجرای کد FLCT مربوط به نقطه‌ای در داخل شبکه به ترتیب در راستای X و Y قابل مشاهده است. همچنین این برنامه ترکیبی از تصاویر (۴) و (۵) را نیز اجرا می‌نماید که در شکل (۶) دیده می‌شود. شکل‌های (۷) و (۸) نیز خروجی این برنامه است که از چپ به راست و از بالا به پایین تحول زمانی تصاویر پردازش شده حاصل از خروجی اجرای کد بیان شده مربوط به نقطه‌ای بر روی مرز شبکه به ترتیب در راستای X و Y را نشان می‌دهد، که ترکیب آن‌ها در شکل (۹) دیده می‌شود.

<sup>1</sup> Cross correlation



pixels

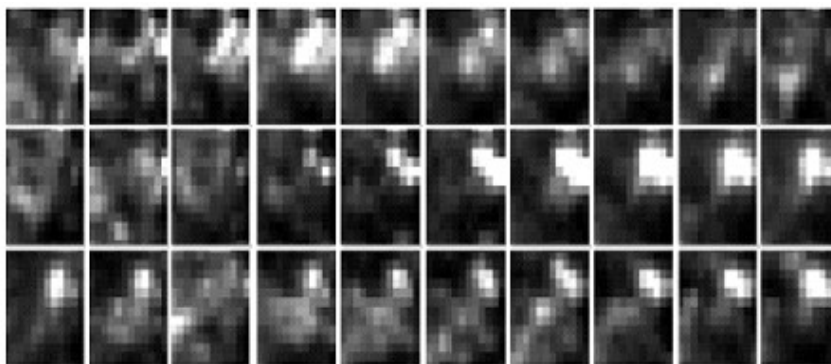
شکل ۴ از چپ به راست و از بالا به پایین تحول زمانی تصاویر پردازش شده حاصل از خروجی اجرای کد FLCT، مربوط به نقطه‌ای در داخل شبکه در راستای  $x$  مشاهده می‌شود.



pixels

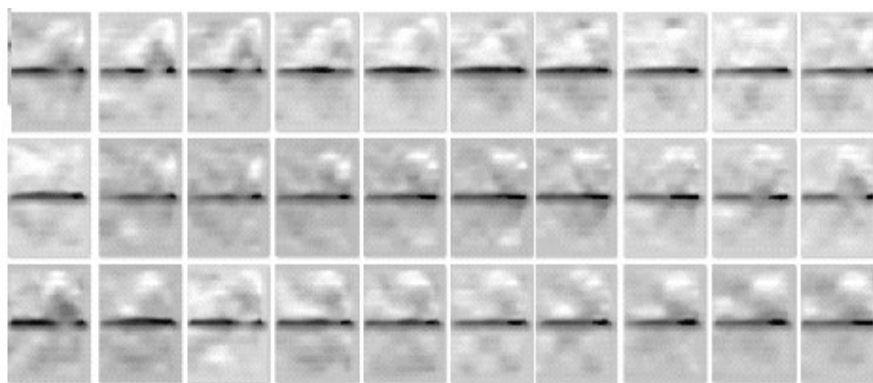
شکل ۵ از چپ به راست و از بالا به پایین، تصاویر پردازش شده حاصل از خروجی اجرای کد FLCT، مربوط به نقطه‌ای در داخل شبکه در راستای  $y$  مشاهده می‌شود.





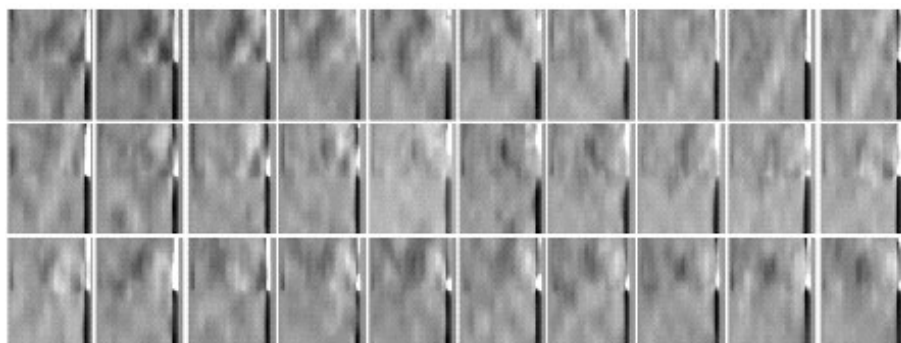
pixels

شکل ۶ از چپ به راست و از بالا به پایین، تحول زمانی شکل های ترکیبی از تصاویر طولی و عرضی حاصل از خروجی اجرای کد FLCT، مربوط به نقطه ای در داخل شبکه، مشاهده می شود.



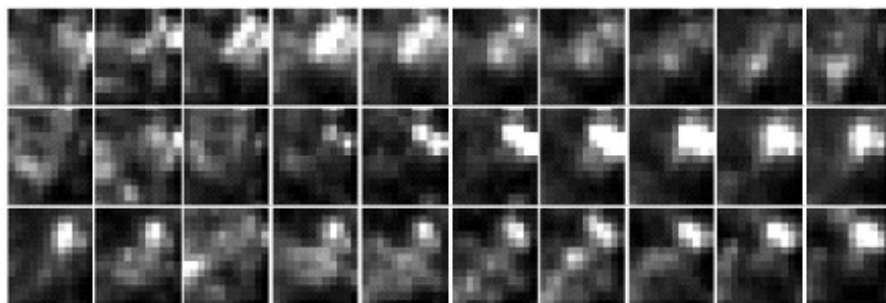
pixels

شکل ۷ از چپ به راست و از بالا به پایین، تصاویر پردازش شده حاصل از خروجی اجرای کد FLCT، مربوط به نقطه ای در مرز شبکه در راستای  $x$  مشاهده می شود.



pixels

**شکل ۸** از چپ به راست و از بالا به پایین، تصاویر پردازش شده حاصل از خروجی اجرای کد FLCT، مربوط به نقطه‌ای در مرز شبکه در راستای (مشاهده می‌شود).

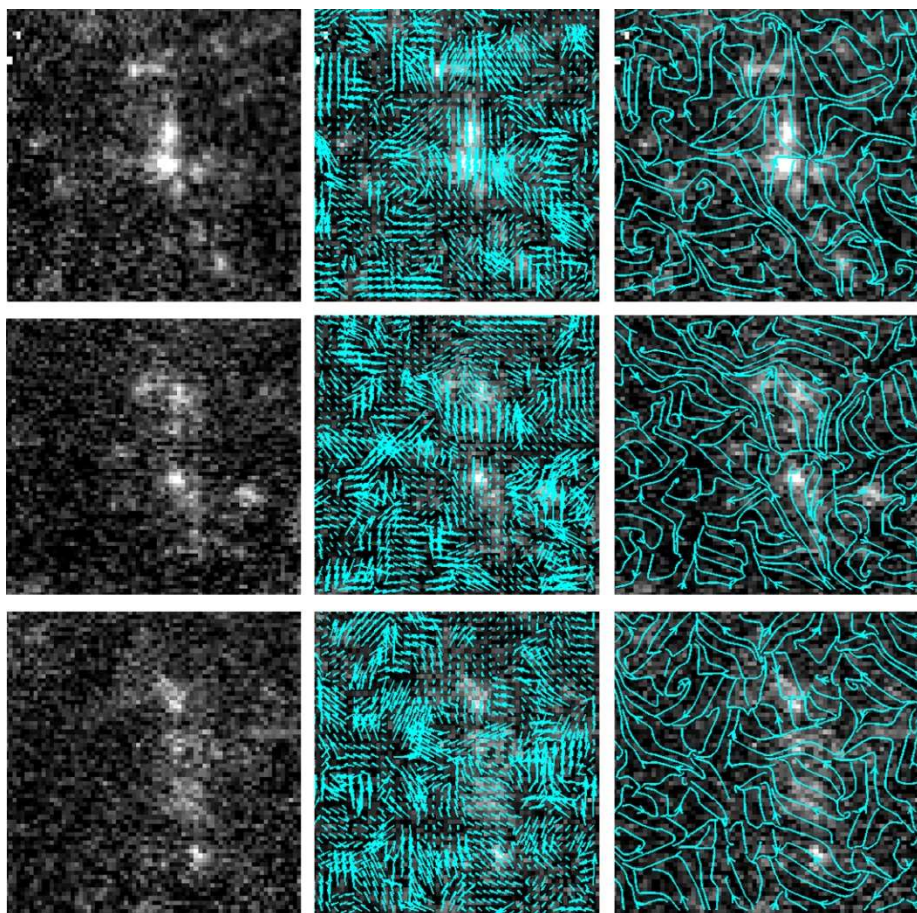


pixels

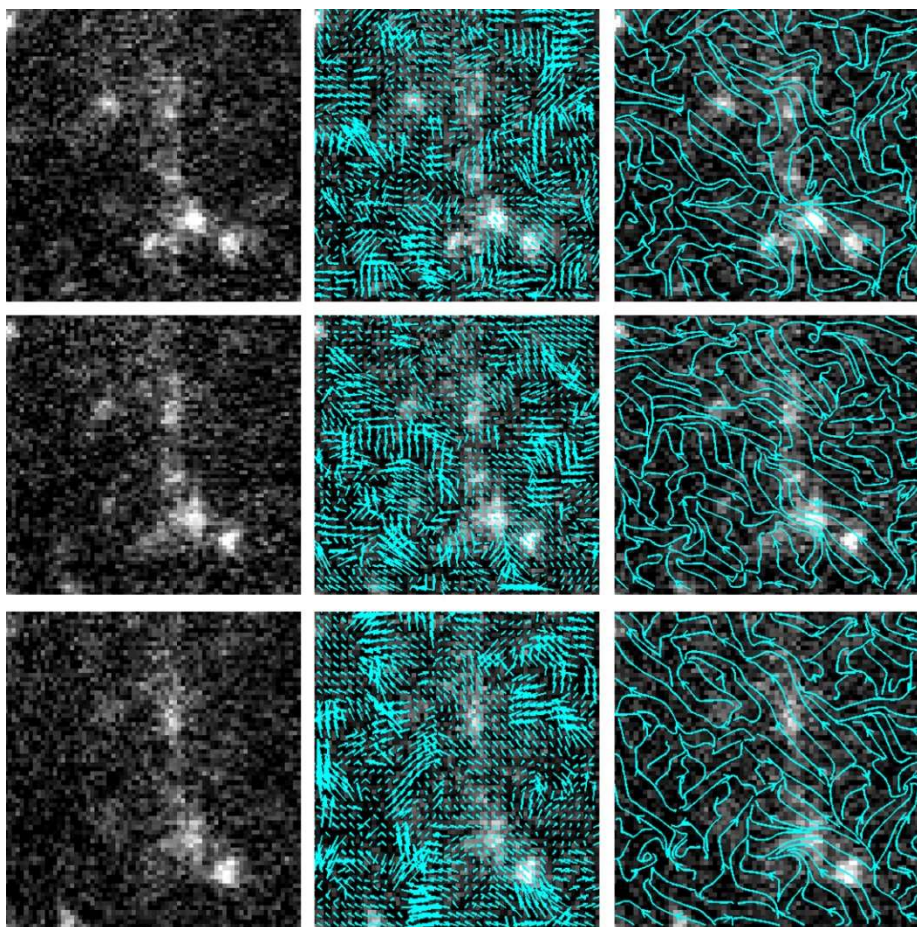
**شکل ۹** از چپ به راست و از بالا به پایین، تحول زمانی شکل‌های تلفیقی از تصاویر طولی و عرضی حاصل از خروجی اجرای کد FLCT، مربوط به نقطه‌ای در مرز شبکه، مشاهده می‌شود.

حال مقدار سرعت و مشخص کردن جهت بردار سرعت ظاهری در این نقاط روشن محاسبه می‌شود. با کمی دقت در نقاط مرز و داخل شبکه‌ای به تفاوت‌های آن‌ها پی می‌بریم. برای مشخص کردن مقدار سرعت و جهت آن از نرم‌افزار متلب استفاده شد. شکل‌های (۲) و (۳) نمونه‌هایی از نتایج بررسی دو بُعدی را که به ترتیب برای نقاط روشن داخل شبکه و روی مرز شبکه بدست آمده، نشان می‌دهند. تصاویر سمت چپ تصاویر پردازش شده از نقاط درخشان، تصاویر میانی میدان دو بُعدی سرعت‌ها و تصاویر سمت راست خطوط جریان دو بُعدی هستند. از بالا به پایین هم تحول زمانی این نقاط روشن دیده می‌شود.





**شکل ۱۰** تصاویر سمت چپ، میانی و راست به ترتیب تصاویر پردازش شده از نقاط درخشان داخل شبکه، میدان دوبعدی سرعت‌ها و خطوط جریان دو بعدی در داخل شبکه می‌باشند. از بالا به پایین تحول زمانی این نقاط روشن دیده می‌شود.



شکل ۱۱ تصاویر سمت چپ، میانی و راست به ترتیب تصاویر پردازش شده از نقاط درخشان روی مرز شبکه، میدان دوبعدی سرعت‌ها و خطوط جریان دو بعدی را بر روی مرز شبکه نشان می‌دهند. از بالا به پایین تحول زمانی این نقاط روشن دیده می‌شود.

#### ۴. نتیجه گیری

در این پژوهش پس از گرفتن تصاویر مناسب از IRIS نقاط درخشان ناحیه انتقالی خورشید در طول موج ۱۴۰۰ آنگستروم شناسایی و سرعت و مسیر دو بعدی آن‌ها با روش ردیابی همبستگی موضعی محاسبه شد. نتایج نشان‌دهنده متفاوت بودن جهت، سرعت و میزان روشنایی نقاط درخشان بود. طول عمر متوسط و میانگین سرعت افقی آن‌ها به ترتیب به اندازه تقریبی ۱۰۰ ثانیه و ۴ کیلومتر بر ثانیه بدست آمد. آبرامنک و همکاران (۲۰۱۰) طول عمر این نقاط درخشان را کمتر از ۱۲۰ ثانیه





بدست آوردند [۲۰]. علیپور و صفری (۲۰۱۲) طول عمر این نقاط درخشان را با استفاده از تلسکوپ خورشیدی جدید (NST) کمتر از ۱۲۰ ثانیه مشخص کردند [۲۱]. جعفرزاده و همکاران (۲۰۱۷)، نوسانات شدت نقاط درخشان مغناطیسی را با دوره‌های زمانی ۷۳-۱۲۸ ثانیه گزارش کردند [۹]. به نظر می‌رسد که ویژگی‌های نقاط روشن تا حد زیادی به وضوح فضایی ابزار تصویربرداری بستگی دارد. ضیغمی و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از داده‌های تلسکوپ IRIS مجموعه‌ای از نقاط روشن را که در ۱۷ اوت ۲۰۱۴ در طول موج‌های ۲۷۹۶، ۱۳۳۶ و ۱۳۹۴ آنگستروم ثبت شده بود، مورد مطالعه قرار داده و سرعت رو به بالای این جت‌ها را کمابیش بین ۱۰ تا ۱۱۰ کیلومتر بر ثانیه محاسبه نمودند [۱۳].

لیمین و همکاران (۲۰۲۴) بر روی داده‌های خورشید آرام در استوای شرقی و در نیمکره جنوبی و همچنین داده‌هایی در نزدیکی مرکز دیسک، تجزیه و تحلیل کردند [۲۲]. آن‌ها ویژگی‌های نقاط روشن مغناطیسی از جمله طول عمر، اختلاف شدت و سرعت را مطالعه کردند. بر اساس تجزیه و تحلیل آن‌ها، نقاط درخشان غیرمنزوی طول عمر بیشتری نسبت به نقاط منزوی دارند. آن‌ها در بررسی این نقاط روشن دریافتند که میانگین طول عمر نقاط جدا نشده واقع در نیمکره جنوبی نسبت به مرکز دیسک کوتاه‌تر است. با توجه به اینکه سیخک‌های خورشیدی نوع II دارای طول عمری در حدود ۱۰۰ ثانیه می‌باشند و سرعتی معادل ۳۰ کیلومتر بر ثانیه دارند، این نقاط می‌توانند هم‌تای دیسک سیخک‌های نوع دوم باشند [۲۳-۲۵].

همچنین با بررسی تحلیل میدان دوبعدی سرعت‌ها، شاهد چرخش‌هایی بودیم که می‌تواند موجب برانگیخته شدن پالس‌های آلفونی باشد. شناخت نقاط روشن کمک موثری در بررسی سیخک‌های خورشیدی دارد. این باور وجود دارد که شبکه‌ی مغناطیسی با دو قطبی‌های مغناطیسی تقویت می‌شود که این دو قطبی‌ها در نواحی داخلی شبکه دانه‌های خورشیدی ظاهر می‌شوند و به اطراف حرکت می‌کنند و به وسیله جریان‌های دانه‌ای ناپدید می‌گردند.

به نظر می‌رسد که این ساختارهای کوچک مقیاس توسط میدان‌های مغناطیسی که از مرزهای شبکه امتداد دارند، ایجاد شده و مستقیماً با تحول آن مرتبط باشند. پیدایش جو زیرین اساساً ناشی از فرآیندهایی است که شامل پیدایش جریان‌های نامنظم و ترکیب مجدد شار مغناطیسی ایجاد شده با فعالیت داخلی دینامیکی است [۲۶]. خارج از نواحی فعال ناحیه‌ای است که عموماً جو آرام خورشیدی نامیده می‌شود، در حالی است که واقعا آرام نیست. این ناحیه دائماً با انواع مختلفی از پدیده‌های کوچک مقیاس که در مرزهای طرح‌های سلولی که شبکه‌ی مغناطیسی را تشکیل می‌دهند

روبه‌رو است. امواج الکترومغناطیس را می‌توان در تمام لایه‌های خورشید مشاهده کرد. این امواج بر روی رنگین سپهر و تاج خورشیدی تاثیر گذار است. مشخص کردن ویژگی‌های آن‌ها می‌تواند ما را به دلیل گرمایش تاج خورشید و طوفان‌های خورشیدی رهنمون سازد. با توجه به ویژگی‌های مغناطیسی و میزان انرژی پتانسیل که این پدیده‌های کوچک مقیاس دارا هستند، می‌توان به فرآیندهای فیزیکی که در لایه‌های مختلف خورشید رخ می‌دهد آگاهی یافت. انتظار می‌رود که دانه‌های درخشان که در داخل شبکه‌ها و بر روی مرز شبکه‌ها هستند، توان این را داشته باشند که بین ناحیه انتقال و رنگین سپهر حرکت کنند. این دانه‌ها تحت یک جرقه به سمت بالا حرکت می‌کنند و کاهش تراکم از راه رنگین سپهر و ناحیه انتقال موجب افزایش دامنه این جرقه‌ها می‌شود. براساس یافته‌های رصدی، مدل‌های نظری و شبیه‌سازی‌های عددی مختلفی توسعه یافته‌اند تا روش این ساختار را توصیف کنند. البته برخلاف پیشرفت‌های قابل توجه ایجاد شده با رصدهای خیلی دقیق و گسترش نظریه‌ها و شبیه‌سازی‌های عددی، هنوز هم رابطه‌ی متقابل آن‌ها، مشخص کردن کمیت‌های فیزیکی آن‌ها، تعریف روش شکل‌گیری دقیق آن‌ها و همچنین نقش احتمالی آن‌ها در گرمایش تاج خورشیدی نامشخص است. این ابهامات بیشتر ناشی از تفاوت در ظاهر این پدیده‌ها هنگام مشاهده در خطوط طیفی مختلف است.

## ۵. تقدیر و تشکر

نویسندگان از هیأت تحریریه محترم مجله و داوران محترم مقاله سپاسگزاری می‌نمایند. همچنین از کاوشگر IRIS که تصاویر فضایی با وضوح بی نظیر را در اختیار پژوهشگران قرار می‌دهد قدردانی می‌شود.

## منابع

- [1] Martínez-Sykora, J., van der Voort, L.R., Carlsson, M., De Pontieu, B., Pereira, T., Boerner, P., Hurlburt, N., Kleint, L., Lemen, J., Tarbell, T.D. and Wuelser, J.P., "Internetwork chromospheric bright grains observed with IRIS and SST", *The Astrophysical Journal*, 803, 2015. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/803/1/44>.
- [2] Javaherian, M., Safari, H., Amiri, A. and Ziaei, S., "Automatic Method for Identifying Photospheric Bright Points and Granules Observed by Sunrise", *Solar Physics*, 289, 3969, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11207-014-0555-1>.
- [3] Shokri, Z., Alipour, N., Safari, H., Kayshap, P., Podladchikova, O., Nigro, G. and Tripathi, D., "Synchronization of Small-scale Magnetic Features, Blinkers, and Coronal Bright Points", *Apj*, 926, 42, 2022. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac4265>.
- [4] Alipour, N., Safari, H., Verbeeck, C., Berghmans, D., Auchère, F., Chitta, L.P., Antolin, P., Barczynski, K., Buchlin, É., Cuadrado, R.A. and Dolla, L., "Automatic detection of small-



- scale EUV brightenings observed by the Solar Orbiter/EUI", *Astronomy & Astrophysics*, 663, A128, 2022. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202243257>.
- [5] Brueckner, G.E. and Bartoe, J.D., "Observations of high-energy jets in the corona above the quiet sun, the heating of the corona, and the acceleration of the solar wind", *ApJ*, 272, 329, 1983. <https://doi.org/10.1086/161297>.
- [6] Tavabi, E., Zeighami, S. and Heydari, M., "Dynamics of Explosive Events Observed by the Interface Region Imaging Spectrograph", *Solar Phys*, 297, 7, 76, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11207-022-01990-x>.
- [7] Chen, Y., Tian, H., Huang, Z., Peter, H. and Samanta, T., "Investigating the Transition Region Explosive Events and Their Relationship to Network Jets", *ApJ*, 873, 79C, 2019. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab0417>.
- [8] Tziotziou, K., Tsiropoula, G. and Mein, P., "on the nature of the chromospheric fine structure I. Dynamics of dark mottles and grains", *Astronomy and Astrophysics*, 402, 361, 2003. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20030220>.
- [9] Jafarzadeh, S., Solanki, S.K., Stangalini, M., Steiner, O., Cameron, R.H. and Danilovic, S., "High-frequency Oscillations in Small Magnetic Elements Observed with Sunrise/SuFI", *ApJ*, 229, 10, 2017. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/229/1/10>.
- [10] De Wijn, A.G., Lites, B.W., Berger, T.E., Frank, Z.A., Tarbell, T.D. and Ishikawa, R., "Hinode Observations of Magnetic Elements in Internetwork Areas", *ApJ*, 684, 1469, 2008. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0806.0345>.
- [11] Tavabi, E., Ajabshirizadeh, A., Ahangarzadeh Maralani, A.R. and Zeighami, S., "Spicules Intensity Oscillations in SOT/HINODE Observations", *J. Astrophys. Astron.*, 36, 307, 2015. <https://doi.org/10.1007/s12036-015-9335-z>.
- [12] Tavabi, E., Zeighami, S. and Heydari, M., "Dynamics of Explosive Events Observed by the Interface Region Imaging Spectrograph", *Solar Physics*, 297, 7, 76, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11207-022-01990-x>.
- [13] Zeighami, S., Tavabi, E. and Amirkhanlou, E., "Waves propagation in network and inter-network bright points channels between the chromosphere and transition regions with IRIS observations", *JApA*, 41, 18Z, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12036-020-09633y>.
- [14] Zeighami, S., Ahangarzadeh Maralani, A.R., Tavabi, E. and Ajabshirizadeh, A., "Evidence of Energy Supply by Active-Region Spicules to the Solar Atmosphere", *Solar Physics*, 291, 847-858, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11207-016-0866-5>.
- [15] Riethmüller, T.L., Solanki, S.K., Van Noort, M. and Tiwari, S.K., "Vertical flows and mass flux balance of sunspot umbbral dots", *Astronomy & Astrophysics*, 554, A53, 5, 2013. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321075>.
- [16] November, L.J. and Simon, G.W., "Precise Proper-Motion Measurement of Solar Granulation", *Astrophys. J.*, 333, 427, 1988. <https://doi.org/10.1086/166758>.
- [17] Hudson H. S., Fisher G. H., and Welsch B. T., "Flare Energy and Magnetic Field Variation, Subsurface and Atmospheric Influences on Solar Activity", *ASP Conference Series*, proceedings of the conference held 16-20, at the National Solar Observatory, Sacramento Peak, Sunspot, New Mexico, USA 2008.
- [18] Fisher, G.H. and Welsch, B.T., "FLCT: a fast, efficient method for performing local correlation tracking", *ASP Conf. Ser.*, 383, 373-380, 2008. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0712.4289>.
- [19] Welsch, B.T., Fisher, G.H., Abbett, W.P. and Regnier, S., "ILCT: Recovering photospheric velocities from magnetograms by combining the induction equation with local correlation tracking", *Astrophys. J.*, 610, 1148, 2004. <https://doi.org/10.1086/421767>.
- [20] Abramenko, V., Yurchyshyn, V. and Goode, P.R., "Size and Life Time Distributions of Bright Points in the Quiet Sun Photosphere", American Geophysical Union, Fall Meeting 2010, abstract id.SH31C-1806, December 2010.



- [21] Alipour, N., Safari, H. and Innes, D.E., "An Automatic Detection Method for Extreme-ultraviolet Dimmings Associated with Small-scale Eruption", *The Astrophysical Journal*, Volume, 746(1), 12, 8, 2012. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/746/1/12>.
- [22] Zhao, L., Yang, P., Bai, H., Gong, X., Sang, M., Zhang, Y. and Yang, Y., "Statistical Properties of Magnetic Bright Points at Different Latitudes and Longitudes of the Sun", *Solar Physics*, 299, 1, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11207-023-02242-2>.
- [23] De Pontieu, B., McIntosh, S., Hansteen, V.H., Carlsson, M., Schrijver, C.J., Tarbell, T.D., Title, A.M., Shine, R.A., Suematsu, Y., Tsuneta, S. and Katsukawa, Y., "a tale of two spicules: the impact of spicules on the magnetic chromosphere", *Astronomical Society of Japan*, 59, 655, 2007. <https://doi.org/10.1093/pasj/59.sp3.S655>.
- [24] Tavabi, E., "power spectrum analysis of limb and disk spicule using hinode Ca H line broadband filter", *Astrophysics and Space Science*, 352(1), 43, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10509-014-1901-3>.
- [25] Tavabi, E., Koutchmy, S. and Ajabshirizadeh, A., "Increasing the Fine Structure Visibility of the Hinode SOT Ca II H Filtergrams", *Solar Phys.*, 283, 187, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11207-012-0011-z>.
- [26] Hagenaar, H.J., Schrijver, C.J. and Shine, R.A., "dispersal of magnetic flux in the quiet solar photosphere", *The Astrophysical Journal*, 511(2), 932, 1999. <https://doi.org/10.1086/306691>.
- [27] <http://iris.lmsal.com/search>



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



# طراحی موجبرهای نور کُند متشکل از بلورهای فوتونی دوبعدی و بررسی کوک پذیری آن<sup>۱</sup> تایماز فتح الهی خلخالی<sup>۲\*</sup>، مازیار امرائی<sup>۳</sup> و علی آقا محمدی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۲/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۰۲

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳

صص ۹۱ - ۱۰۵

## چکیده:

هدف از این پژوهش، بررسی سرعت گروه بلورهای فوتونی دوبعدی و تنظیم‌پذیر (یا کوک‌پذیر) است. در اولین مرحله، یک شبکه مربعی شامل مواد دی‌الکتریک در زمینه بلورمایع در نظر گرفته شد. در مرحله بعدی، این ساختار به اندازه ۴۵ درجه دوران داده شده و ساختار نوار فوتونی آن مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه با حذف یک ردیف از میله‌های ماده دی‌الکتریک (سیلیکون)، یک موجبر در این بلور فوتونی ایجاد و مد موجبری آن مورد مطالعه قرار گرفت. سپس سرعت گروه و ضریب گروه این مد موجبری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تاثیر اعمال ولتاژ خارجی و تغییر ضریب شکست ماده زمینه بر سرعت و ضریب گروه مد موجبری بررسی شد. در آخرین مرحله با اعمال تغییرات هندسی بر روی اندازه یک ردیف از میله‌های کناری موجبر اثر این تغییر هندسه بر روی ویژگی‌های مد موجبری و ضریب گروه بررسی شد. نتایج محاسبات عددی بر پایه روش بسط موج تخت نشان می‌دهد، با تغییر اندازه میله‌های کناری موجبر سرعت گروه کاهش یافته و متناسب با آن، ضریب گروه افزایش می‌یابد. در حقیقت، بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که به لحاظ کمی با اعمال ولتاژ خارجی در موجبر عادی محدوده تغییرات ضریب گروه بین ۷ تا ۱۰ است. اگرچه، با اعمال تغییرات در اندازه میله‌های کناری تغییرات این کمیت در محدوده ۱۴ الی ۲۷ قرار دارد که دامنه تغییرات بیشتری را نشان می‌دهد. به بیانی دیگر، با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی می‌توان این کمیت فیزیکی را تنظیم‌پذیر نمود.

**واژگان کلیدی:** بلور فوتونی دوبعدی، ضریب و سرعت گروه، بلور مایع، روش بسط موج تخت.

<sup>۱</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46413.1390>

<sup>۲</sup> دانشیار، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، تهران، ایران. (نویسنده مسئول)  
tfathollahi@aeoi.org.ir

<sup>۳</sup> دانشجوی دکترا، گروه فیزیک، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران. Email: mazyar\_amraie@yahoo.com

<sup>۴</sup> دانشیار، گروه فیزیک، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران. Email: aliaghamohamadi@gmail.com



## ۱. مقدمه

موضوع بلورهای فوتونی در سه دهه گذشته مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است. اگرچه، سیر پرشتاب تحولات علمی و جذابیت این حوزه از علم سبب شده که در همین مدت انواع ساختارهای بلور فوتونی طراحی، مدل سازی، بهینه سازی و ساخته شوند. در حقیقت، بلورهای فوتونی ساختارهای متناوب از مواد دی الکتریک بوده که به سه گروه یک، دو و سه بعدی تقسیم می شوند و اغلب ساخته دست بشر می باشند [۱-۲]. ویژگی تناوبی ثابت دی الکتریک بلورهای فوتونی در تشابه با پتانسیل متناوب در نیمه هادی ها، نواحی مجاز و ممنوعه بسامدی برای انتشار امواج الکترومغناطیسی ایجاد می نماید که مهمترین ویژگی این دسته از ادوات نوری می باشد [۳]. این ناحیه ممنوع شامل بسامدهایی است که به ازای آن ها، امواج الکترومغناطیسی مجاز به انتشار در بلور فوتونی نیستند. پهنای این ناحیه بسامدی به هندسه، اندازه، جنس و فضای ماده ای که ساختار تناوبی را می سازد، وابسته است.

در حالت مطلوب، برای بدست آوردن کنترل کامل نور در هر سه جهت، لازم است یک بلور فوتونی سه بعدی ایجاد و استفاده شود. اما ساخت بلورهای فوتونی سه بعدی با فناوری فعلی سخت و پیچیده است. خوشبختانه، برخی از ویژگی های بلورهای فوتونی سه بعدی از راه بلورهای فوتونی دو بعدی نیز قابل دستیابی است. از این رو، پژوهشگران به سمت استفاده از بلورهای فوتونی دو بعدی تمایل پیدا کرده اند. بلورهای فوتونی افزون بر این که در ساختار کامل و بدون نقص کاربرد دارد، با ایجاد نقص های مختلف و کنترل شده ساختاری، کاربردهای متفاوت دیگری نیز پیدا می کنند [۴-۵]. این نقص ها در بلور فوتونی، اجازه انتشار موج نوری با طول موج معین را در ناحیه بسامدی شکاف فوتونی فراهم می سازد که می توان ادواتی برای هدایت و انتشار نور فراهم آورد. از این ادوات نوری که با ایجاد نقص در ساختار نواری بلور فوتونی ساخته می شوند، می توان به میکرو کاواک ها [۶]، فیلترها [۷] و موجبرها [۸] اشاره نمود.

شاید مهمترین یا یکی از مهمترین کاربردهای بلورهای فوتونی، ایجاد موجبرهای بلور فوتونی است. در حقیقت، با برداشتن یک ردیف از میله های دی الکتریک و ایجاد نقص خطی می توان یک موجبر بلور فوتونی ایجاد کرد. بلور فوتونی برای امواج با فرکانس واقع در محدوده شکاف فوتونی همانند یک آینه کامل رفتار می کند. بنابراین، اگر پرتو نوری با فرکانس واقع در محدوده شکاف فوتونی تحت هر زاویه ای به داخل این نقص خطی تابیده شود، در مرز بین نقص خطی و سطح بلور انعکاس می یابد [۹].



همانطور که می‌دانیم، سرعت نور فوق‌العاده بالا است و برای انتقال داده‌ها بین دو نقطه بسیار سودمند است. اما همین سرعت بالای نور موجب می‌شود که هدایت سیگنال‌های اپتیکی با مشکلاتی مواجه شود. یکی از روش‌های غلبه بر این مشکل، استفاده از نور کند یا نور کم سرعت است که افزون بر آن در پدیده‌هایی از قبیل ایجاد کلیدزنی نوری، ذخیره‌سازی اپتیکی و تاخیر زمان اپتیکی استفاده می‌شود [۱۰]. اثر نور کند به کاهش سرعت گروه اشاره می‌کند. به تازگی، پدیده نور کم سرعت در ساختارهای دی‌الکتریک، به ویژه مشددهای حلقوی تزویج‌یافته و بلورهای فوتونی مورد مطالعه قرار گرفته است. بنابراین، با توجه به امکان مهندسی ساختارهای بلور فوتونی، بررسی پدیده نور کم سرعت در این ساختارها توجه بسیاری را به خود جلب کرده و پژوهش‌های فراوانی بر روی این پدیده در بلورهای فوتونی انجام شده است [۱۱-۱۳].

در بررسی پدیده نور کم سرعت افزون بر سرعت گروه، ضریب گروه که با عکس سرعت گروه متناسب است، مورد بررسی و مطالعه پژوهشگران قرار گرفته است. به عنوان مثال، در بعضی مقالات تلاش شده تا پایین‌ترین سرعت گروه بدست آید. به عنوان نمونه، در مقاله اوستون و همکاران [۱۴]، با حذف یک ردیف از میله‌های یک شبکه مربعی در یک ساختار ساخته شده از مواد دی‌الکتریک در زمینه هوا و همچنین ایجاد یک ساختار شبیه به یک موجبر ساخته شده از کاواک‌های جفت شده، سرعت گروه بسیار پایینی بدست آمد، ولی در عوض ضریب گروه ساختار بیان شده بسیار بالا بود. در ادامه مطالعات دیگری منتشر شد که با ارائه الگویی جدید، ساختاری با سرعت گروه اندکی بیشتر و ضریب گروه پایین‌تری بدست آمد [۱۵]. مطالعات در این زمینه ادامه یافت و مقالات دیگری در این زمینه منتشر شد [۱۶]. در پی این مطالعات، پژوهشگران در سال‌های بعد تلاش کردند تا این کمیت‌های فیزیکی را با استفاده از مواد قابل هدایت و تغییرپذیر، کوک‌پذیر کنند. به عنوان مثال، پژوهشگران چینی با استفاده از مواد پلی استایرن ساختارهای نور کم سرعت و کوک‌پذیر را مورد بررسی قرار دادند [۱۷]. سپس، ساختارهایی در زمینه دی‌الکتریک از حفره‌های هوا پر شده از مواد مغناطیسی که تحت تاثیر میدان مغناطیسی کوک‌پذیر هستند بررسی شد [۱۸]. در سال‌های کنونی، از مواد دیگری چون گرافن [۱۹]، برای ایجاد سامانه‌های نور کند و کوک‌پذیر استفاده شد و این پژوهش‌ها همچنان ادامه دارد.

افزون بر موارد بیان شده، می‌توان با به کار بردن پلاسما، بلور مایع یا فلزات و اعمال یک میدان الکتریکی یا مغناطیسی خارجی، ویژگی‌های نوری بلور فوتونی را تغییر داد. یکی از پر کاربردترین این مواد، بلورهای مایع هستند. مولکول‌های بلور مایع در اثر تحریک میدان الکتریکی خارجی،

هنگامی که ولتاژ اعمالی از ولتاژ بحرانی بزرگتر شود، دچار تغییر در جهت گیری می‌شوند و در نتیجه تغییر قابل ملاحظه‌ای در ضرایب شکست بلور مایع به وجود می‌آید. بر این اساس، ساختار نواری بلور فوتونی شامل بلور مایع با اعمال ولتاژ تغییر می‌کند که منجر به تغییر در ویژگی‌های نوری بلور می‌شود. بنابراین، اگر بلور مایع یکی از عناصر تشکیل دهنده بلور فوتونی باشد، ویژگی‌های آن با استفاده از میدان الکتریکی خارجی می‌تواند کوچک پذیر شود [۲۰].

هدف ابتدایی در این پژوهش، بررسی ساختار نواری فوتونی شبکه مربعی شامل ستون‌های سیلیکون در زمینه بلور مایع می‌باشد. سپس، ساختار نواری فوتونی این شبکه تحت زاویه دوران ۴۵ درجه مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه، تلاش می‌شود با حذف یک ردیف از میله‌های سیلیکونی، یک موجبر در این بلور فوتونی ایجاد و مد موجبری آن مطالعه شود. در مرحله بعد با تغییر اندازه، سطح مقطع میله‌های سیلیکون به ازای تمامی مقادیر ممکن مد موجبری در حالت‌های مختلف بررسی و ساختار بهینه انتخاب می‌شود. سپس، مشخصات مربوطه چون سرعت گروه و پاشندگی سرعت گروه بررسی می‌گردد. همچنین، از آنجایی که ماده زمینه با بلور مایع پر شده است، اثر اعمال ولتاژ بر روی موجبر نور کند و اثر آن بر روی کوچک‌پذیری کمیت‌های این موجبر مطالعه می‌شود. در پایان، تمامی کمیت‌های بیان شده به ازای تغییر اندازه سطح مقطع میله‌های مجاور موجبر و کوچک‌پذیری این کمیت‌ها بررسی خواهد شد.

## ۲. ساختار مورد بررسی و روش محاسباتی

ساختار فوتونی مورد بررسی در این پژوهش، به صورت یک شبکه مربعی از میله‌های سیلیکون ( $n_{si} = 3.67$ ) با سطح مقطع دایروی در زمینه بلور مایع در نظر گرفته شده است. بلور مایع ماده‌ای ناهمسانگرد است که دارای ضرایب شکست عادی و غیرعادی می‌باشد. بلور مایع مورد استفاده در این پژوهش فنیل استیلن است که ضرایب شکست عادی و غیرعادی آن به ترتیب  $n_o^{LC} = 1.59$  و  $n_e^{LC} = 2.223$  می‌باشد. در اینجا فرض شده است که راستای تناوب بلور در صفحه  $X - Y$  و میله‌های سیلیکونی در راستای محور  $Z$  قرار دارد.

شکل (۱) نشان‌دهنده جهت‌گیری بلورهای مایع نسبت به محورهای مختصات می‌باشد و  $\theta$  زاویه آن نسبت به محور  $Z$  است. بدون اعمال هیچ میدان خارجی جهت‌گیری آن‌ها در راستای محور  $X$  است. اگرچه، با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی در راستای محور  $Z$ ، جهت‌گیری این





بلورها شروع به تغییر جهت به سمت محور  $Z$  ها می‌کنند. ضریب شکست موثر در چنین حالتی عبارت است از [۲۱]:

$$n_{eff,LC}^2 = \frac{n_e^2 n_o^2}{n_e^2 \cos^2(\theta) + n_o^2 \sin^2(\theta)} \quad (1)$$

و رابطه زاویه  $\theta$  با ولتاژ اعمالی عبارت است از:

$$\theta = \begin{cases} 0, & V \leq V_C \\ \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left( \exp\left(-\frac{V - V_C}{V_0}\right) \right), & V > V_C \end{cases} \quad (2)$$

که در رابطه بالا،  $V_C$  ولتاژی است که در آن تغییر جهت بلورهای مایع شروع می‌شود و  $V_0$  مقدار ثابتی است. مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که با تغییرات ولتاژی بین صفر تا ۱۰ ولت، می‌توان بلورهای مایع را به تمام جهت گیری‌های دلخواه وادار نمود [۲۲].

منظور از کاهش سرعت نور، کاهش سرعت گروه یک پالس منتشر شونده در محیط مورد نظر است. سرعت گروه از راه شیب منحنی پاشندگی  $\omega - k$  در یک محدوده بسامدی، به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۳-۲۴]:

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{c}{n_g} \quad (3)$$

که در آن،  $c$  سرعت نور در خلا و  $n_g$  ضریب گروه است. بنابراین برای نور کم‌سرعت، شیب منحنی پاشندگی در یک محدوده بسامدی ناچیز است. همچنین، کمیت پاشندگی سرعت گروه که معیاری از اعوجاج پالس نوری است، به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$GVD = \frac{d^2k}{d\omega^2} = -\frac{1}{v_g^3} \frac{d^2\omega}{dk^2} \quad (4)$$

با توجه به رابطه (۴)، با کاهش سرعت گروه، پاشندگی سرعت گروه افزایش می‌یابد. ولی برای حالتی که  $\frac{d^2\omega}{dk^2}$  کمینه باشد، مقدار پاشندگی سرعت گروه نیز کمینه خواهد شد. بنابراین، هنگامی

که یک مُد موجبری با یک نقطه عطف در منحنی پاشندگی ایجاد شود، نور کُند با سرعت گروه پائین بدست خواهد آمد.

در تحلیل بلورهای فوتونی روش‌های گوناگونی وجود دارد که هر یک دارای مزایا و معایبی هستند. به صورت همه جانبه، مطالعه و بررسی ساختارهای دی‌الکتریک چون بلورهای فوتونی با کمک حل معادلات ماکسول یا هلمهولتز با استفاده از روش‌های تحلیلی، نیمه‌تحلیلی و عددی ممکن است. در این پژوهش، از روش بسط موج تخت به منظور محاسبه ساختار نوار فوتونی، محاسبه مُد موجبری، سرعت گروه و پاشندگی سرعت گروه استفاده می‌شود.

به صورت خلاصه باید بیان شود که برای بدست آوردن ساختارهای نواری و نمودارهای هم‌فرکانس، لازم است معادله مستقل از زمان ماکسول که به شکل 
$$\vec{\nabla} \times \left[ \frac{1}{\epsilon(\vec{r})} \vec{\nabla} \times \vec{H}(\vec{r}) \right] = \left( \frac{\omega}{c} \right)^2 \vec{H}(\vec{r})$$
 است، در ویژه پایه‌های توابع فوریه بسط داده شود. برای حل معادله بالا، از روش‌های مشابه برای حل معادله شرودینگر در فیزیک حالت جامد استفاده می‌شود. به دلیل تناوب در ساختار بلورهای فوتونی تابع دی‌الکتریک  $\epsilon(\vec{r})$  برای چنین محیط‌هایی یک تابع متناوب از بردار  $\vec{r}$  می‌باشد:

$$\epsilon(\vec{r} + \vec{R}) = \epsilon(\vec{r}) \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $\vec{R}$  بردار شبکه فضای حقیقی است.

برای حل معادله ویژه برداری بیان شده و تبدیل آن به یک معادله ویژه مقرداری همانند روش حل معادله شرودینگر در فیزیک حالت جامد، میدان مغناطیسی  $\vec{H}(\vec{r})$  را بر حسب بردارهای پایه شبکه وارون بسط داده و رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\vec{H}(\vec{r}) = \sum_{\vec{G}} \sum_{\lambda=1}^2 h_{\vec{G},\lambda} \hat{e}_{\lambda} e^{i(\vec{k} + \vec{G}) \cdot \vec{r}} \quad (6)$$

به روش مشابه می‌توان تابع دی‌الکتریک را بر حسب بردارهای پایه شبکه وارون بسط داد که با جایگذاری آن و رابطه (۶) در معادله مستقل از زمان ماکسول، یک ماتریس خطی به شکل زیر حاصل می‌شود:

(۷)

$$\sum_{\vec{G}'} H_{\vec{G},\vec{G}'} \begin{pmatrix} h_{\vec{G}',1} \\ h_{\vec{G}',2} \end{pmatrix} = \frac{\omega^2}{c^2} \begin{pmatrix} h_{\vec{G},1} \\ h_{\vec{G},2} \end{pmatrix}$$



که در آن،

$$H_{\vec{G}, \vec{G}'} = |\vec{k} + \vec{G}| |\vec{k} + \vec{G}'| \eta (\vec{G} - \vec{G}') \begin{bmatrix} \hat{e}_2 \cdot \hat{e}'_2 & -\hat{e}_2 \cdot \hat{e}'_1 \\ -\hat{e}_1 \cdot \hat{e}'_2 & \hat{e}_1 \cdot \hat{e}'_1 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

و در پایان، از راه ماتریس بیان شده می‌توان ساختار نواری فوتونی و سایر کمیت‌های متناسب با آن را بدست آورد [۲۵-۲۶].

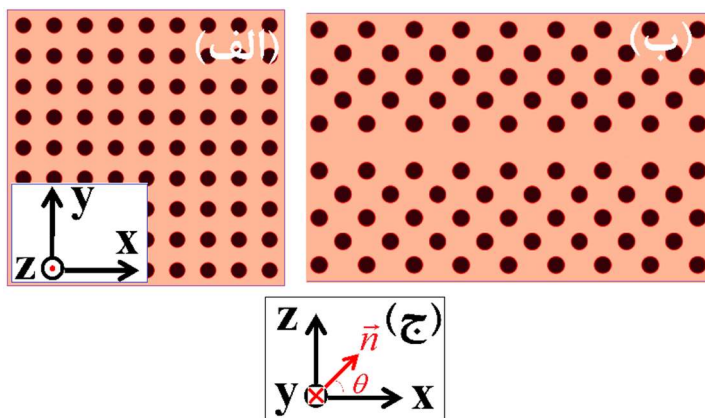
نرم افزارهای زیادی وجود دارند که بر اساس روش بسط موج تخت کار می‌کنند، یکی از بهترین و پرکاربردترین این نرم افزارها MPB<sup>۱</sup> می‌باشد، که در این پژوهش از آن استفاده شد [۲۷-۲۸].

### ۳. نتایج و بحث

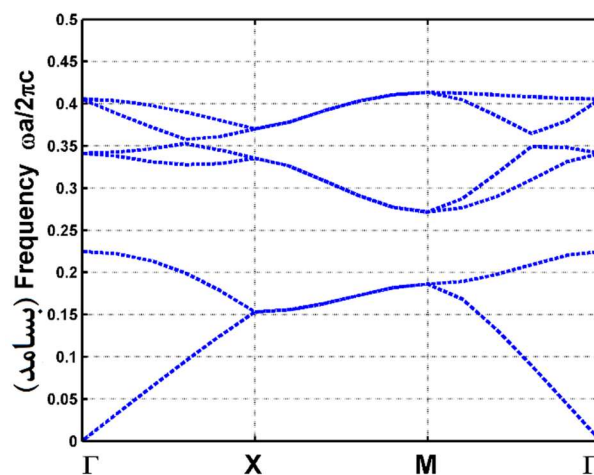
در این پژوهش در ابتدا ساختار نوار فوتونی یک شبکه مربعی شامل میله‌های سیلیکونی در زمینه بلور مایع مورد بررسی قرار داده شد. نمایش طرحواره سطح مقطع این ساختار در شکل (۱-الف) نشان داده شده است. در این بلور فوتونی شعاع میله‌های سیلیکونی و  $a$  ثابت شبکه (فاصله بین مرکز دو میله همسایه با نزدیک‌ترین فاصله) می‌باشد. در این پژوهش، مُد قطبشی الکتریکی (مُد TM) که در آن میدان الکتریکی در راستای میله‌های سیلیکونی فرض شده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اولین مرحله ساختار نوار فوتونی این بلور با استفاده از روش بسط موج تخت مورد بررسی قرار می‌گیرد. محاسبه ساختار فوتونی شبکه بیان شده به ازای تمامی مقادیر ممکن از شعاع میله‌های دی‌الکتریک بر پایه همین روش نشان می‌دهد که در این ساختار به ازای تمامی مقادیر ممکن از شعاع میله‌های دی‌الکتریک بر پایه همین روش نشان می‌دهد که در این ساختار به ازای شعاع  $r = 0.25a$  یک شکاف فوتونی با پهنای  $\Delta\omega = 0.0469 \left(\frac{2\pi c}{a}\right)$  بدست می‌آید. همانطوری که در شکل (۲) قابل مشاهده است، فرکانس لبه پائینی و بالایی شکاف فوتونی به ترتیب عبارتند از:  $0.2247 \left(\frac{2\pi c}{a}\right)$  و  $0.2716 \left(\frac{2\pi c}{a}\right)$ .

<sup>۱</sup> Mit photonic bands





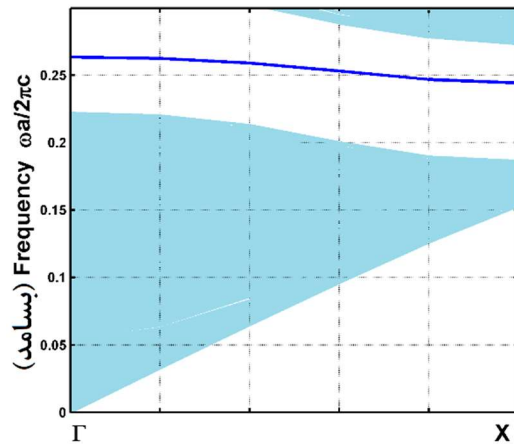
**شکل ۱** (الف) شکل طرحواره سطح مقطع یک بلور فوتونی دو بعدی با شبکه مربعی، (ب) ساختار طرحواره یک موجر بلور فوتونی ساخته شده در یک بلور فوتونی مربعی با دوران ۴۵ درجه و (ج) جهت گیری بلور مایع نسبت به محورهاى مختصات.



**شکل ۲** ساختار نوار فوتونی شبکه مربعی با میله‌های دایروی سیلیکون در زمینه بلور مایع بدون اعمال ولتاژ برای  $r = 0.25a$

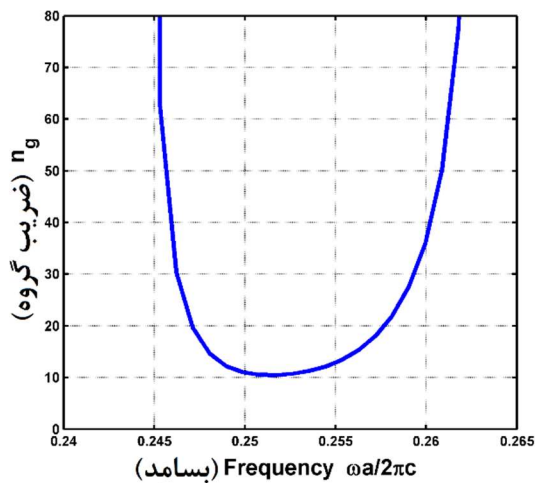
در ادامه به ازای همین کمیت ( $r = 0.25a$ ) در ابتدا شبکه مربعی را به اندازه ۴۵ درجه دوران داده و در مرحله بعد یک ردیف از میله‌های آن حذف می‌شود. با حذف یک ردیف از میله‌ها، یک مد موجبری در ناحیه ممنوعه بسامدی قابل مشاهده است. همانطور که در شکل (۳) مشاهده می‌شود، یک مد هدایت موجبری در ناحیه ممنوعه بسامدی به وجود آمده است و یک نقطه عطف در منحنی ایجاد شده است که در حقیقت، ناحیه مورد نظر برای ایجاد نور کند می‌باشد.





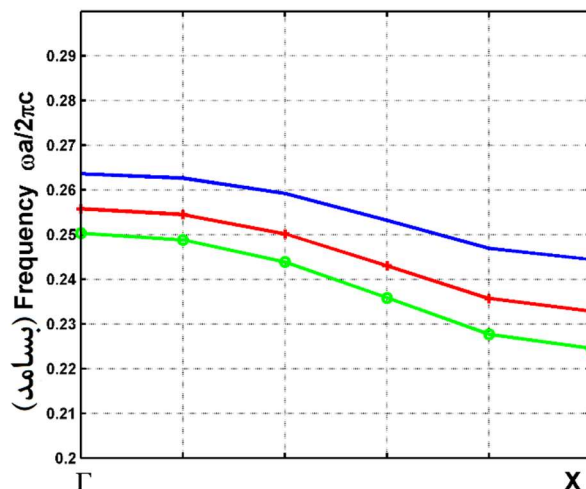
شکل ۳ ساختار نواری فوتونی تصویر یافته موجبر بلور فوتونی ساخته شده در شبکه مربعی با زاویه دوران ۴۵ درجه با میله‌های دایروی سیلیکون در زمینه بلور مایع بدون ولتاژ برای  $r = 0.25a$

در مرحله بعد شیب این مُد موجبری با استفاده از روش بسط موج تخت محاسبه می‌شود. همانطور که رابطه (۳) نشان می‌دهد، شیب منحنی پاشندگی  $\omega - k$  سرعت گروه مُد موجبری را نشان می‌دهد. همچنین عکس آن، نشان‌دهنده ضریب گروه می‌باشد. هر چه سرعت گروه کمتر باشد به مشخصات مربوط به یک موجبر نور کند نزدیک‌تر شده‌ایم. به همین منظور شیب این منحنی حساب شده و در شکل (۴) در بسامدهای مختلف به نمایش در آمده است.



شکل ۴ ضریب گروه مُد موجبری در موجبر ساخته شده در شبکه مربعی با زاویه دوران ۴۵ درجه با میله‌های دایروی سیلیکون در زمینه بلور مایع بدون ولتاژ برای  $r = 0.25a$

همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، در یک پهنای بسامدی مناسب نور کندی وجود دارد که سرعت گروه آن در این محدوده فرکانسی کمابیش ثابت است. یا به عبارت دیگر میزان پاشندگی نور ناچیز خواهد بود و می‌توان از این محدوده بسامدی بهره مناسب را برد. در مرحله بعد، تاثیر اعمال میدان الکتریکی خارجی و تغییر جهت بلورهای مایع مورد بررسی قرار می‌گیرد. می‌دانیم که با اعمال ولتاژ و ایجاد میدان الکتریکی مناسب جهت گیری بلورهای مایع و در نتیجه زاویه  $\theta$  تغییر می‌کند. در این مرحله همه کمیت‌های ساختاری نسبت به حالت بیان شده قبلی ثابت نگه داشته شد و تنها زاویه  $\theta$  تغییر می‌کند. نتایج محاسبات نشان می‌دهد با اعمال مقدار کمی ولتاژ امکان تغییر در مُد موجبری و در ادامه ضریب گروه وجود دارد. شکل (۵) مُد موجبری و فرکانس متناظر آن را به ازای سه زاویه  $\theta = 0^\circ, 30^\circ \& 40^\circ$  نشان می‌دهد. در این شکل به ترتیب نوارهای آبی، قرمز و سبز رنگ مُد موجبری سه زاویه صفر، سی و چهل را نشان می‌دهد. به روشنی قابل مشاهده است که با تغییر ضریب شکست زمینه ناحیه موجبری و مُد موجبری تغییر کرده است.

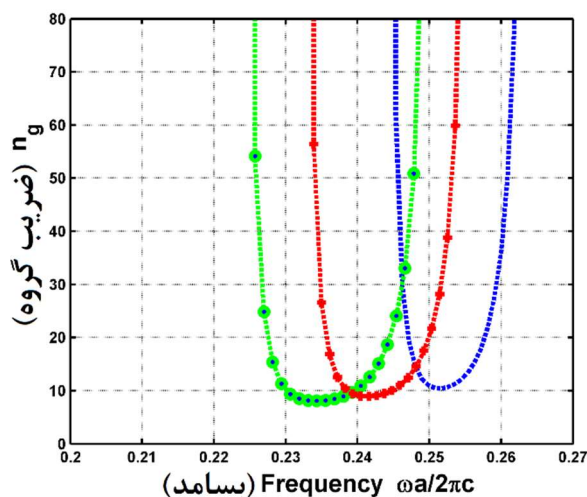


شکل ۵ ساختار نواری فوتونی تصویر یافته موجبر بلور فوتونی ساخته شده در شبکه مربعی با زاویه دوران  $45^\circ$  درجه با

$\theta = 0^\circ$  (blue),  $30^\circ$  (red) &  $40^\circ$  (green) میله‌های دایروی سیلیکون در زمینه بلور مایع به ازای

$$r = 0.25a \text{ برای}$$





شکل ۶ ضریب گروه مُد موجبری در موجبر ساخته شده در شبکه مربعی با زاویه دوران ۴۵ درجه با میله‌های دایروی

سیلیکون در زمینه بلور مایع به ازای  $\theta = 0^\circ$  (blue),  $30^\circ$  (red) &  $40^\circ$  (green) برای

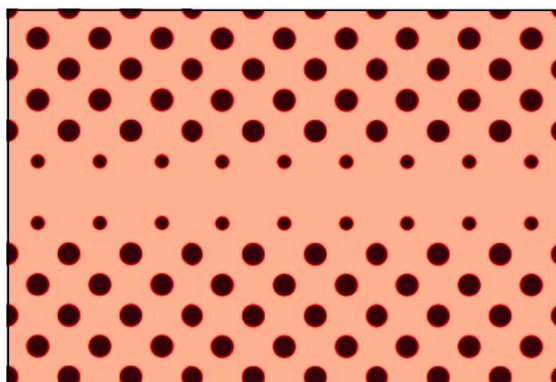
$$r = 0.25a$$

در حقیقت، شکل (۶) نشان می‌دهد که با تغییر اندک در ولتاژ اعمالی می‌توان ویژگی‌های نوری موجبر را هدایت و تغییر داد. با مقایسه شکل‌های (۵) و (۶) می‌توان دریافت که با اعمال ولتاژ بیرونی فرکانس مُد نقص، به سمت بسامدهای پایین‌تر منتقل می‌شود. همچنین پهنای بسامدی نمودارهای  $\bar{U}$  شکل بیشتر می‌شوند. این افزایش پهنای بسامدی نشان می‌دهد که ناحیه نورکند افزایش پیدا کرده است که نوعی برتری محسوب می‌شود. هر چند کاهش اندک  $n_g$  نشان‌دهنده افزایش اندک سرعت گروه می‌باشد.

در مرحله بعد به منظور انجام یک بررسی کامل‌تر، تغییر اندازه یک ردیف از میله‌های جانبی موجبر ساخته شده در شبکه مربعی با زاویه دوران ۴۵ درجه مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل (۷)). این ساختار نیز چون ساختار پیشین ساخته شده از میله‌های سیلیکونی در زمینه بلور مایع می‌باشد. در این بخش به ازای یک مقدار معین از شعاع میله‌های اصلی ( $r$ ) مُد موجبری به ازای تغییر اندازه شعاع میله‌های کناری ( $R$ ) بررسی و این روش برای تمامی مقادیر ممکن از شعاع میله‌های اصلی تکرار شد. نتایج محاسبات نشان می‌دهد، کمیت بهینه شعاع اصلی میله‌های دی‌الکتریک  $r = 0.25a$  است. نتایج محاسبات بر پایه بسط موج تخت بیان می‌کند که به ازای  $r = 0.25a$  &  $R = 0.15a$  و به ازای سه زاویه  $\theta = 0^\circ, 30^\circ$  &  $40^\circ$  سه مُد موجبری با شیبی کمتر نسبت به حالت قبلی در شکل (۸)

قابل مشاهده است. لازم به بیان است که این مقدار از شعاع میله‌های جانبی حالت بهینه شده است و این محاسبات برای تمام حالت‌های ممکن از شعاع میله‌های جانبی تا حد ممکن (مرز همپوشانی میله‌ها) انجام شده است.

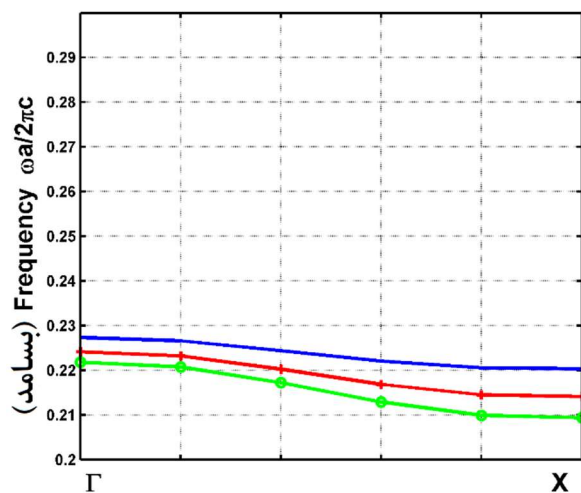
در ادامه مطابق با حالت قبلی به ازای کمیت‌های بهینه سرعت گروه و ضریب گروه برای هر سه حالت بیان شده با استفاده از روش بسط موج تخت مورد بررسی قرار گرفت. همانطور که در شکل (۹) قابل مشاهده است، با اعمال ولتاژ خارجی به ازای کمیت‌های بیان شده شیب نمودار تغییر می‌کند. البته شیب نمودار در این حالت نسبت به حالتی که میله‌های کناری هیچ گونه تغییری نداشتند، کمتر شده است. کاهش شیب متناسب با کاهش سرعت گروه و در نتیجه افزایش ضریب گروه می‌باشد. در حقیقت، تغییر اندازه شعاع میله‌های کناری سبب کاهش سرعت گروه و افزایش ضریب گروه شده است که همین مقدار را نیز می‌توان با اعمال ولتاژ خارجی تغییر داد.



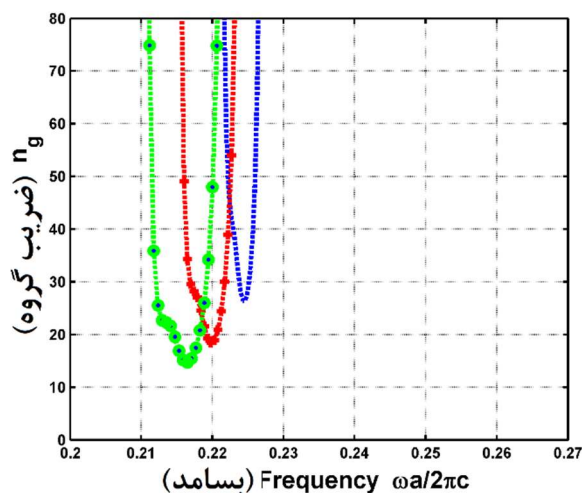
شکل ۷ ساختار طرحوار یک موجبر بلور فوتونی ساخته شده در یک بلور فوتونی مربعی با دوران ۴۵ درجه.







شکل ۸ ساختار نواری فوتونی تصویر یافته موجبر بلور فوتونی ساخته شده در شبکه مربعی با زاویه دوران ۴۵ درجه با میله‌های دایروی سیلیکون در زمینه بلور مایع به ازای  $\theta = 0^\circ$  (blue),  $30^\circ$  (red) &  $40^\circ$  (green) برای  $r = 0.25a$  &  $R = 0.15a$



شکل ۹ ضریب گروه مد موجبری در موجبر ساخته شده در شبکه مربعی با زاویه دوران ۴۵ درجه با میله‌های دایروی سیلیکون در زمینه بلور مایع به ازای  $\theta = 0^\circ$  (blue),  $30^\circ$  (red) &  $40^\circ$  (green) برای  $r = 0.25a$  &  $R = 0.15a$

#### ۴. نتیجه‌گیری

نتایج محاسبات عددی بر پایه روش بسط موج تخت نشان داد که در ساختارهای ساده بلور فوتونی ساخته شده از میله‌های سیلیکونی در زمینه بلور مایع، با زاویه دوران ۴۵ درجه، به ازای کمیت‌های

بهینه دارای یک شکاف فوتونی با پهنا  $\Delta\omega = 0.0469\left(\frac{2\pi c}{a}\right)$  است. نتایج محاسبات عددی نشان داد که با حذف یک ردیف از میله‌ها امکان ایجاد مد موجبری با سرعت گروه پایین در این ساختار وجود دارد و می‌توان با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی سرعت گروه و ضریب گروه آن را تغییر داد. در مرحله بعد، با تغییر اندازه یک ردیف از میله‌های کناری موجبر، مشاهده شد که سرعت گروه به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش و ضریب گروه حداقل به اندازه سه برابر افزایش یافته است. نتایج این محاسبات می‌تواند در ساختارهای نوری و کوک پذیر مورد استفاده قرار گیرد.

## منابع

- [1] Yablonovitch E., "Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics", *Phys. Rev. Lett.*, 58, 2059-2062, 1987. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2059>.
- [2] John S., "Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices", *Phys. Rev. Lett.*, 58, 2486-2489, 1987. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2486>.
- [3] Anderson CM., Giapis KP., "Larger Two-Dimensional Photonic Band Gaps", *Phys. Rev. Lett.*, 77, 2949-2952, 1996. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.2949>.
- [4] Rezaei B., Khalkhali TF., Vala AS., Kalafi M., "Absolute band gap properties in two-dimensional photonic crystals composed of air rings in anisotropic tellurium background", *Optics Commun.*, 282, 2861-2869, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.04.048>.
- [5] Fathollahi-khalkhali T., Rezaei B., "Investigation of Tunable Complete Photonic Band Gap in Two-dimensional Photonic Crystals Composed of Plasma Column in Kerr Nonlinear Dielectric Background", *Iranian Journal of Applied Physics*, 12, 17-30, 2022. (In Persian) <https://doi.org/10.22051/ijap.2022.36037.1208>.
- [6] Zhao Y., Zhang YN., Lv RQ, Li J., "Electric Field Sensor Based on Photonic Crystal Cavity with Liquid Crystal Infiltration", *J. Lightwave Technol.*, 35, 3440-3446, 2017. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2576500>.
- [7] Brunetti G., Dell'Olio F., Conteduca D., Armenise MN., Ciminelli C., "Ultra-Compact Tuneable Notch Filter Using Silicon Photonic Crystal Ring Resonator", *J. Lightwave Technol.*, 37, 2970-2980, 2019. <https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2908364>.
- [8] Hu YC., Chen HM., Xiang T., "Mach-Zehnder modulator based on a tapered waveguide and carrier plasma dispersion in photonic crystal", *J. Opt. Technol.*, 88, 242-251, 2021. <https://doi.org/10.1364/JOT.88.000242>.
- [9] Tamura T., Kondo K., Terada Y., Hinakura Y., Ishikura N., Baba T., "Silica-Clad Silicon Photonic Crystal Waveguides for Wideband Dispersion-Free Slow Light", *J. Lightwave Technol.*, 33, 3034-3040, 2015. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2420685>.
- [10] Bhagat D., Gaikwad M., "A review on production of slow light with material characterization", *Materials Today: Proceedings.*, 43, 1780-1783, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.453>.
- [11] Ebnali-Heidari A., Prokop C., Ebnali-Heidari M., Kamutsch C., "A Proposal for Loss Engineering in Slow-Light Photonic Crystal Waveguides", *J. Lightwave Technol.*, 33, 1905-1912, 2015. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2391196>.
- [12] Mao Y., Li Z., Hu W., Dai X., Xiang Y., "Topological Slow Light Rainbow Trapping and Releasing Based on Gradient Valley Photonic Crystal", *J. Lightwave Technol.*, 40, 5152-5156, 2022. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3171289>.



- [13] Ma CJ, Ren LY, Xu YP, Wang YL, Zhou H, Fu HW, Wen J, "Theoretical and experimental study of structural slow light in a microfiber coil resonator", *Appl. Opt.*, 54, 5619-5623, 2015. <https://doi.org/10.1364/AO.54.005619>.
- [14] Üstün K., Kurt H., "Ultra slow light achievement in photonic crystals by merging coupled cavities with waveguides", *Opt. Express*, 18, 21155-21161, 2010. <https://doi.org/10.1364/OE.18.021155>.
- [15] Liang J., Ren LY., Yun MJ., Wang XJ., "Wideband slow light with ultralow dispersion in a W1 photonic crystal waveguide", *Appl. Opt.*, 50, G98-G103, 2011. <https://doi.org/10.1364/AO.50.000G98>.
- [16] Varmazyari V., Habibiyan H., Ghafoorifard H., "Slow light in ellipse-hole photonic crystal line-defect waveguide with high normalized delay bandwidth product", *J. Opt. Soc. Amer. B* 31, 771-779, 2014. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.31.000771>.
- [17] Tian H., Long F., Liu W., Ji Y., "Tunable slow light and buffer capability in photonic crystal coupled-cavity waveguides based on electro-optic effect", *Optics Commun*, 285, 2760-2764, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.01.086>.
- [18] Guillan-Lorenzo O., Diaz-Otero FJ., "Slow light in tunable low dispersion wide bandwidth photonic crystal waveguides infiltrated with magnetic fluids", *Optics Commun*, 359, 49-52, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.09.057>.
- [19] Kumar D., Devi KM., Kumar R., Chowdhury DR., "Dynamically tunable slow light characteristics in graphene based terahertz meta surfaces", *Optics Commun*, 491, 126949, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2021.126949>.
- [20] Khalkhali TF., Bananej A., "Manipulating femtosecond pulse shape using liquid crystals infiltrated one-dimensional graded index photonic crystal waveguides composed of coupled-cavities", *Physics Letters A*, 381, 3342-3347, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2017.08.022>.
- [21] Busch K., John S., "Liquid-Crystal Photonic-Band-Gap Materials: The Tunable Electromagnetic Vacuum", *Phys. Rev. Lett.*, 83, 967, 1999. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.83.967>.
- [22] G V Tkachenko *New Developments in Liquid Crystals (Ukraine: IntechOpen) (2009)*.
- [23] Liang J., Ren LY., Yun MJ., Han X., Wang XJ., "Wideband ultraflat slow light with large group index in a W1 photonic crystal waveguide", *J. Appl. Phys.*, 110, 063103, 2011. <https://doi.org/10.1063/1.3634074>.
- [24] Mao Y., Li Z., Hu W., Dai X., Xiang Y., "Topological Slow Light Rainbow Trapping and Releasing Based on Gradient Valley Photonic Crystal", *J. Lightwave Technol.*, 40, 5152-5156, 2022. <https://doi.org/10.1109/JLT.2022.3171289>.
- [25] Plihal M., Maradudin AA., "Photonic band structure of two-dimensional systems: The triangular lattice", *Phys. Rev. B*, 44, 8565, 1991. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.44.8565>.
- [26] Park J., Min B., "Spatiotemporal plane wave expansion method for arbitrary space-time periodic photonic media", *Opt. Lett.*, 46, 484-487, 2021. <https://doi.org/10.1364/OL.411622>.
- [27] Johnson SG., Joannopoulos JD., "Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell's equations in a planewave basis", *Opt. Express*, 8, 173-190, 2001. <https://doi.org/10.1364/OE.8.000173>.
- [28] Fathollahi-Khalkhali T, Shiri R., "An ultra-sensitive refractive index-based photonic crystal biosensor with the coupled cavity-waveguide structure", *Indian J. Phys.*, 97, 4427-4437, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12648-023-02772-2>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



## گذار فاز توپولوژیکی $InBi$ و $InSb$ تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه<sup>۱</sup>

صبا احمدوند<sup>۲</sup> و شیرین نامجو<sup>۳\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۱۳

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳

صص ۱۰۶ - ۱۲۱

### چکیده:

در این مطالعه گذار فاز توپولوژیکی  $InBi$  و  $InSb$  تحت کشش غیرهیدرواستاتیک با استفاده از نظریه تابعی چگالی و بسته محاسباتی  $WIEN2K$  مورد بررسی قرار گرفته است. نتیجه‌های بدست آمده از بررسی ساختار نواری  $InBi$  و  $InSb$  با به کارگیری پتانسیل تبادل - همبستگی  $mBJGGA$  نشان می‌دهد که  $InSb$  نیمه رسانایی با پهنای شکاف کوچک و نظم عادی نواری در نقطه  $\Gamma$  است. در حالی که  $InBi$  یک فلز است که در مرکز ناحیه نخست بریلوئن دارای وارونگی نواری است. به منظور تبدیل کردن این ترکیب‌ها به نیمه رساناهای توپولوژی، شبکه این ترکیب‌ها به دو صورت تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه قرار می‌گیرند. نخست ثابت شبکه در صفحه  $ab$  بسط داده می‌شود و ثابت شبکه در امتداد محور  $c$  ثابت باقی می‌ماند و سپس ثابت شبکه در راستای محور  $c$  بسط داده می‌شود؛ اما در صفحه  $ab$  ثابت باقی می‌ماند. نتایج بدست آمده از محاسبات نشان می‌دهد که تحت تأثیر هر دو نوع بسط غیرهیدرواستاتیک شبکه با شکسته شدن تقارن مکعبی، در ترکیب‌های  $InBi$  و  $InSb$  گذار به سمت نیمه رسانای توپولوژی رخ می‌دهد.

**واژگان کلیدی:** نظریه تابعی چگالی، نیمه رساناهای توپولوژی، وارونگی نواری، ترکیبات  $III-V$ ، کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه.

<sup>۱</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46666.1397>

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه آموزشی فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، لرستان، ایران. Email: saba.sa259@gmail.com

<sup>۳</sup> استادیار، گروه آموزشی فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، لرستان، ایران. (نویسنده مسئول) Email: namjoo.sh@lu.ac.ir



## ۱. مقدمه

جستجو و بررسی مواد توپولوژی و مطالعه ساختار الکترونی آن‌ها در سال‌های کنونی به‌عنوان یک موضوع جدید، بسیار جذاب و نوظهور در فیزیک ماده چگال پدیدار شده است [۱، ۲]. در نارسانا‌های توپولوژی جفت‌شدگی اسپین-مدار و تقارن وارونی زمانی با هم ترکیب می‌شوند و ویژگی‌های فیزیکی یکتایی را در این دسته از ترکیب‌ها ایجاد می‌کنند. نارسانا‌های توپولوژی دارای هر دو فاز رسانا و نارسانا به صورت همزمان در یک ماده هستند. آن‌ها در لایه‌های درونی نارسانا هستند، اما در لایه‌های سطحی رسانندگی قطبیده و محافظت شده‌ای از خود نشان می‌دهند که برای کاربرد در زمینه‌های اسپینترونیک و ترانزیستورهای بدون اتلاف نویدبخش هستند. حالت‌های سطحی در نارسانا‌های توپولوژی به دلیل وجود تقارن وارونی زمانی از هرگونه اختلالات موضعی محافظت می‌شوند. با توجه به ویژگی‌های یگانه‌ای که در سطح نارسانا‌های توپولوژی مشاهده می‌شود، انتظار می‌رود که این دسته از ترکیب‌ها در بسیاری از زمینه‌های صنعتی به کار گرفته شوند. از آن‌جا که امروزه تلاش برای یافتن نارسانا‌های توپولوژی به دلیل این ویژگی‌های یگانه در حال افزایش است، بنابراین می‌توان به اهمیت فوق‌العاده زیاد تبدیل به مواد توپولوژی پی‌برد. بر اساس مطالعه پیشین صورت‌گرفته‌ی گروه نامجو و همکاران [۳]، InSb با ساختار مکعبی دارای نظم نواری عادی و شکاف نواری بسیار کوچک در حدود  $0.12$  الکترون‌ولت در مرکز ناحیه نخست بریلوئن می‌باشد.

باتوجه به کوچک بودن شکاف نواری در این ترکیب پیش‌بینی می‌شود که تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه و شکسته شدن تقارن مکعبی بتوان در ساختار نواری این ترکیب وارونگی نواری ایجاد و سپس گذار به سمت عایق توپولوژی را مشاهده کرد. همچنین بر اساس مطالعه صورت گرفته روی ویژگی الکترونی InBi [۴]، این ترکیب با وجود وارونگی نواری در ساختار نواری خود، در فاز فلزی قرار دارد. با اعمال کشش غیرهیدرواستاتیک این امکان وجود دارد که ضمن حفظ شدن وارونگی نواری، در ساختار نواری آن شکاف ایجاد شود و گذار از فاز فلزی به عایق یا نیمه‌رسانای توپولوژی رخ دهد. بنابراین در این مطالعه به منظور مشاهده گذار فاز توپولوژی، شبکه ترکیب‌های InBi و InSb تحت کشش غیرهیدرواستاتیک قرار می‌گیرد. این نوع کشش به دو صورت به شبکه این ترکیب‌ها اعمال می‌شود. نخست ثابت شبکه در صفحه  $ab$  بسط داده می‌شود و ثابت شبکه در امتداد محور  $c$  ثابت باقی می‌ماند و سپس ثابت شبکه در راستای محور  $c$  بسط داده می‌شود؛ اما در صفحه  $ab$  ثابت باقی می‌ماند. در حقیقت، در این پژوهش اعمال کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه به عنوان ابزاری کارآمد برای هدایت شکاف نواری و القای گذار فاز

توپولوژیکی در InSb و InBi به کار گرفته می‌شود و این روش نوآورانه، در پیچه‌ای نو به سوی مهندسی مواد توپولوژی با ویژگی‌های دلخواه می‌گشاید و زمینه را برای اکتشافات جدید در این حوزه هموار می‌کند. با وجود اهمیت فراوان گذار به سمت مواد توپولوژی، تاکنون مطالعه‌ای در ارتباط با گذار فاز توپولوژیکی InBi تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه انجام نگرفته است. همچنین مطالعه صورت گرفته در ارتباط با گذار فاز توپولوژیکی InSb محدود به نوع اول بسط (بسط در صفحه  $ab$ ) می‌باشد [۵] و در این مطالعه به تنظیم شکاف نواری با بسط غیرهیدرواستاتیک شبکه پرداخته نشده است. بنابراین با توجه به محدود بودن کارهای پژوهشی انجام شده در راستای گذار فاز توپولوژیکی InSb و InBi، با انجام این پژوهش می‌توان به درک عمیق‌تر و کامل‌تر از رفتار توپولوژیکی این ترکیبات تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه دست یافت و زمینه را برای توسعه کاربردهای جدید در حوزه مواد توپولوژی فراهم ساخت.

## ۲. روش محاسبات

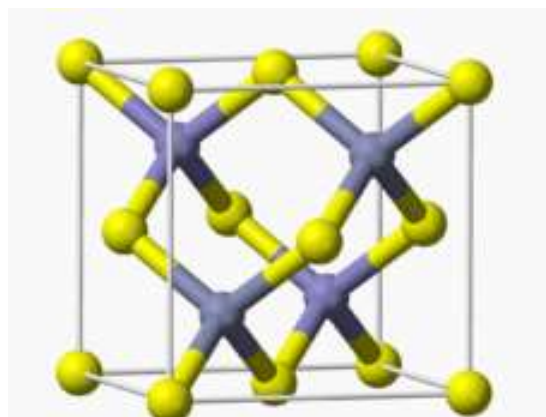
محاسبات بر پایه نظریه تابعی چگالی استوار است و از روش امواج تخت به‌ساخته خطی با پتانسیل کامل برای حل معادلات تک‌ذره کوهن-شم استفاده شده است [۶، ۷]. تمام محاسبات با استفاده از کد کامپیوتری Wien2k انجام گرفته است [۸]. کمیت  $RK_{max}$  (شعاع کوچک‌ترین کره موافین-تین و  $K_{max}$  بردار موج تخت برای بسط تابع موج برحسب امواج تخت در ناحیه بین جایگاهی است) برابر ۸ و بردار موج قطع برای بسط پتانسیل و چگالی بار در ناحیه بین جایگاهی  $G_{max}=12$  انتخاب شد. محاسبه‌ها در حضور برهم‌کنش اسپین-مدار انجام شده است. انتگرال فضای فاز برای محاسبه ویژگی‌های ساختاری با استفاده از ۳۰۰۰ نقطه  $k$  در منطقه نخست بریلوئن انجام شده است. از آنجا که برای محاسبه ساختار نواری به تعداد نقطه‌های  $k$  بیشتری نیاز است، بنابراین ۷۰۰۰ نقطه  $k$  به منظور مطالعه ساختار نواری این ترکیب‌ها در نظر گرفته شده است. برای مطالعه ساختار نواری از پتانسیل تبادل همبستگی mBJGGA<sup>۱</sup> استفاده شده است [۹]. در این مطالعه برای بررسی ویژگی‌های ساختاری تابعی تبادل همبستگی GGA (Wu-Cohen) به کار گرفته شده است [۱۰].

<sup>۱</sup> Modified Beck- Johnson exchange potential together with Local- Density Approximation



### ۳. نتایج

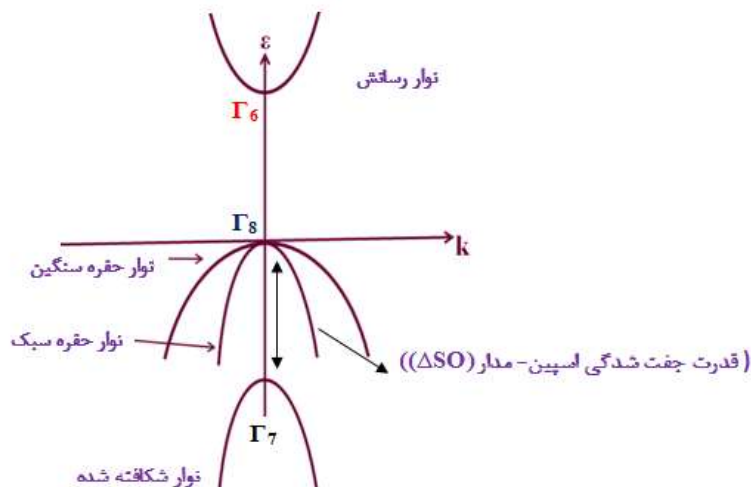
در این مطالعه ساختار سولفید روی برای ترکیب‌های InSb و InBi در نظر گرفته شده است. این ساختار در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱ ساختار سولفید روی برای InSb و InBi، دایره‌های زرد رنگ اتم‌های In و دایره‌های آبی رنگ اتم‌های Sb و Bi را نشان می‌دهند.

یاخته واحد در ساختار سولفید روی یک یاخته fcc است با یک پایه که در هر جایگاه شبکه آن دو اتم قرار گرفته است. موقعیت مکانی این دو اتم پایه عبارت از (۰ ۰ ۰) و (۱/۴ ۱/۴ ۱/۴) است. مقدار کمیت شبکه برای InSb، InBi به ترتیب ۶/۵۳ آنگستروم و ۶/۷۸ آنگستروم بدست آمده است. مقادیر بدست آمده کمیت شبکه برای InSb و InBi در هماهنگی خوبی با مقدارهای تجربی ۶/۴۷۹ آنگستروم [۱۱] و ۶/۶۲ آنگستروم [۱۲] قرار دارد. بر پایه کمیت شبکه محاسبه شده، ساختار نواری InSb و InBi مورد بررسی قرار گرفته است. همانگونه که در شکل (۲) به صورت شماتیک نشان داده شده است، نوارهای انرژی برای ترکیبات III-V (ترکیب‌های III-V از دو عنصر تشکیل شده‌اند که یکی از آن‌ها مربوط به گروه سوم و دیگری مربوط به گروه پنجم جدول تناوبی است) با ساختار سولفید روی در مرکز ناحیه نخست بریلوئن دارای تقارن گروه نقطه‌ای  $\Gamma_8$  (نوار تبهگن چهارگانه آبی رنگ)،  $\Gamma_7$  (نوار ظرفیت مشکی رنگ با تبهگنی دوگانه) و  $\Gamma_6$  (نوار قرمز رنگ با تبهگنی دوگانه) هستند. دو نوار ظرفیت بالایی به نوارهای حفره‌های سنگین و حفره‌های سبک معروفند. نوار پایین تر به نوار شکافته معروف است که از جفت شدگی اسپین-مدار نتیجه می‌شود [۱۳]. همچنین نوار رسانش بالایی نیز تبهگن دوگانه است. ترتیب نواری‌ای که در بیشینه ترکیب‌های

III-V با ساختار سولفید روی (از انرژی بالا به سمت انرژی پایین) مشاهده می‌شود به صورت  $\Gamma_6$ ،  $\Gamma_8$ ،  $\Gamma_7$  است. چنین ترتیب نواری ای ترتیب نواری عادی نامیده می‌شود که در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ ساختار نواری ترکیب‌های نیمه‌رسانای III-V نزدیک  $k=0$ ، شامل جفت شدگی اسپین-مدار [۱۳].

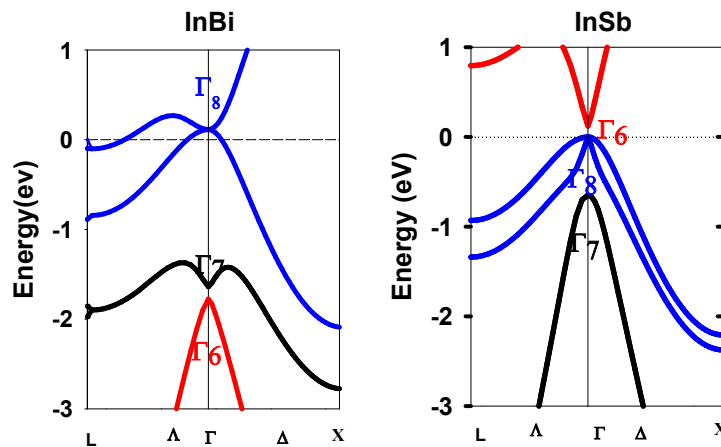
در ترکیب‌هایی که در آن‌ها برهم کنش اسپین-مدار بسیار قوی است، نوار  $\Gamma_8$  بالاتر از نوار  $\Gamma_6$  قرار می‌گیرد و بنابراین یک ترتیب نواری وارون شکل می‌گیرد. معیاری به صورت  $\Delta E = E(\Gamma_6) - E(\Gamma_8)$  برای مشخص کردن ترتیب نواری تعریف می‌شود. مقادیر مثبت  $\Delta E$  نشان دهنده ترتیب نواری عادی است، درحالی‌که مقادیر منفی  $\Delta E$  نشان از ترتیب نواری وارون دارند. InBi و InSb که در این مطالعه به آن‌ها پرداخته شده است، نمونه‌ای از ترکیبات III-V است که به ترتیب دارای ترتیب نواری عادی و وارون در مرکز ناحیه اول بریلوئن می‌باشند.

ترتیب نواری عادی برای InSb و همچنین ترتیب نواری وارون برای InBi در شکل (۳) نشان داده شده است. بر اساس شکل (۳)، InSb یک نیمه‌رسانا با ترتیب نواری عادی است، درحالی‌که InBi در فاز فلزی قرار دارند و در ساختار نواری آن وارونگی مشاهده می‌شود. وجود وارونگی نواری در ساختار نواری می‌تواند نشانه‌ای از برهم کنش قوی اسپین-مدار باشد. با محاسبه قدرت جفت شدگی اسپین-مدار به صورت تفاوت انرژی بین حالت‌های  $\Gamma_7$  و  $\Gamma_8$  یعنی  $\Delta SO = E(\Gamma_8) - E(\Gamma_7)$  در این ترکیب می‌توان به قوی بودن برهم کنش اسپین-مدار پی برد. در این مطالعه قدرت





جفت‌شدگی اسپین مدار برای InBi ۱/۸۸ الکترون‌ولت بدست آمده است که در مقایسه با مقدار مشابه در InSb که در مطالعه حاضر ۰/۶۴ الکترون‌ولت بدست آمده است، بسیار بزرگ و قابل توجه است. از این‌رو، بزرگ بودن قدرت جفت‌شدگی اسپین-مدار در InBi سبب بروز وارونگی نواری در ساختار نواری این ترکیب می‌شود. از آن‌جا که ترتیب نواری وارون در مرکز ناحیه اول بریلوئن می‌تواند نشانه‌ای محکم بر وجود فاز توپولوژیکی باشد. از این‌رو، InBi پتانسیل تبدیل شدن به یک عایق توپولوژی را دارد و اگر بتوان به روشی در ساختار نواری آن شکاف ایجاد کرد می‌توان گذار به سمت عایق توپولوژی را در این ترکیب مشاهده کرد. بر اساس مطالعه صورت گرفته توسط نامجو و همکاران [۳]، InSb نیمه‌رسانایی با شکاف نواری کوچک در حدود ۰/۱۲ الکترون‌ولت است، که اگرچه این ترکیب دارای شکاف نواری است اما بدون نظم نواری وارون است (دارای نظم نواری عادی است) و اگر بتوان ترتیب نواری عادی در ساختار نواری در مرکز ناحیه نخست بریلوئن را بر هم زد و وارونگی نواری در ساختار نواری آن ایجاد کرد می‌توان گذار فاز توپولوژیکی را در آن مشاهده کرد.



شکل ۳ ساختار نواری InSb و InBi با در نظر گرفتن برهمکنش اسپین - مدار.

مطابق مدل بستگی قوی انرژی حالت‌های  $\Gamma_6$ ,  $\Gamma_7$ ,  $\Gamma_8$  به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۴، ۱۵]:

$$E_{\Gamma_6} = \frac{\varepsilon_{s1} + \varepsilon_{s2}}{2} + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{s1} - \varepsilon_{s2}}{2}\right)^2 + V_{ss}^2}, \quad (1)$$

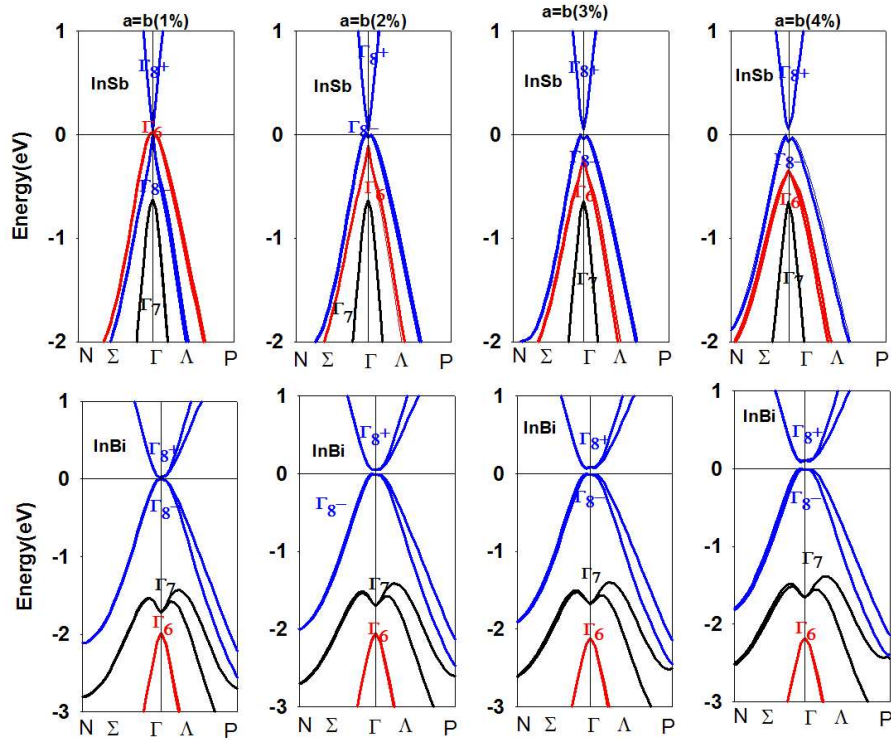
$$E_{\Gamma_7} = \frac{\varepsilon_{p1} + \varepsilon_{p2}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{p1} - \varepsilon_{p2}}{2}\right)^2 + V_{pp}^2} - \lambda_{SO}, \quad (2)$$

$$E_{\Gamma_8} = \frac{\varepsilon_{p1} + \varepsilon_{p2}}{2} - \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{p1} - \varepsilon_{p2}}{2}\right)^2 + V_{pp}^2} + \frac{1}{2} \lambda_{SO}, \quad (3)$$

انرژی حالت‌های  $\Gamma_6, \Gamma_7$  و  $\Gamma_8$  به انرژی اوربیتال‌های  $s$  و  $p$  مربوط به کاتیون‌ها و آنیون‌ها، پتانسیل‌های جفت‌شدگی پیوندهای  $ss$  و  $pp$  ( $v_{ss}$  و  $v_{pp}$ ) و همچنین قدرت جفت‌شدگی اسپین-ارپیت ( $\lambda_{so}$ ) وابسته است. در رابطه بالا،  $\varepsilon_{s1,2}$  و  $\varepsilon_{p1,2}$  به ترتیب انرژی اوربیتال‌های  $s$  و  $p$  مربوط به کاتیون‌ها و همچنین آنیون‌ها هستند. بر اساس روابط بالا، با تغییر قدرت جفت‌شدگی اسپین مدار ( $\lambda_{so}$ ) و همچنین پتانسیل‌های جفت‌شدگی ( $v_{pp}$  و  $v_{ss}$ )، انرژی حالت‌های  $\Gamma_6, \Gamma_7$  و  $\Gamma_8$  تغییر پیدا می‌کند. از آنجا که قدرت جفت‌شدگی اسپین-مدار یک ویژگی ذاتی است، بنابراین تغییر انرژی حالت‌های  $\Gamma_6, \Gamma_7$  و  $\Gamma_8$  تنها با تغییر پتانسیل‌های جفت‌شدگی ( $v_{pp}$  و  $v_{ss}$ ) امکان‌پذیر خواهد بود. یکی از راه‌های تغییر پتانسیل‌های جفت‌شدگی، تغییر ثابت شبکه است. از آنجا که افزایش ثابت شبکه منجر به کاهش پتانسیل‌های جفت‌شدگی و در نتیجه تغییر انرژی حالت‌های  $\Gamma_6, \Gamma_7$  و  $\Gamma_8$  می‌شود، بنابراین پیش‌بینی می‌شود که تحت تاثیر کشش شبکه و تغییر انرژی حالت‌های  $\Gamma_6, \Gamma_7$  و  $\Gamma_8$  گذار به سمت نارساناها و یا نیمه‌رساناهای توپولوژی رخ دهد. در این مطالعه کشش شبکه به صورت غیرهیدرواستاتیک اعمال شده است. هدف از اعمال کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه شکستن تقارن مکعبی و ایجاد شکاف نواری در ساختار نواری است. تبهگنی چهارگانه  $\Gamma_8$  به دلیل وجود تقارن مکعبی حفظ می‌شود. با اعمال بسط غیرهیدرواستاتیک این امکان وجود دارد که همزمان با ایجاد وارونگی نواری با شکسته شدن تقارن مکعبی، یک شکاف نواری در نقطه  $\Gamma$  ظاهر شود و بنابراین گذار به سمت نارساناهای توپولوژی رخ دهد. با توجه به کاربرد بسیار زیاد نارساناها توپولوژی، می‌توان به اهمیت بسیار زیاد گذار به سمت نارساناها توپولوژی پی برد. در ادامه بررسی نتایج بدست آمده از مطالعه ساختار نواری InSb و InBi تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه انجام می‌شود. در این مطالعه، کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه به دو شیوه متفاوت اعمال می‌شود. نخست ثابت شبکه در صفحه  $ab$  بسط داده می‌شود و ثابت شبکه در امتداد محور  $c$  ثابت باقی



می ماند. سپس، ثابت شبکه در راستای محور  $c$  بسط داده می شود اما در صفحه  $ab$  ثابت باقی می ماند. در شکل (۴)، ساختار نواری  $\text{InSb}$  و  $\text{InBi}$  تحت نوع اول کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه (بسط ثابت شبکه در صفحه  $ab$  از ۱ تا ۴ درصد) آمده است.



**شکل ۴** ساختار نواری  $\text{InSb}$  و  $\text{InBi}$  با استفاده از تابعی  $m\text{BJGGA}$  تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه (بسط ثابت شبکه در صفحه  $ab$  از ۱ تا ۴ درصد و ثابت نگه داشتن ثابت شبکه در راستای محور  $c$ ).

با توجه به شکل (۴)، تحت تأثیر کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه به دلیل شکسته شدن تقارن مکعبی، تبهگنی چهارگانه  $\Gamma_8$  از بین می رود و در مرکز ناحیه نخست بریلوئن نوار تبهگن چهارگانه  $\Gamma_8$  به نوارهای تبهگن دوگانه  $\Gamma_8^+$  (انرژی بالاتر) و  $\Gamma_8^-$  (انرژی پائین تر) شکافته می شود و یک شکاف نواری بین نوارهای تبهگن دوگانه  $\Gamma_8^+$  و نوارهای تبهگن دوگانه  $\Gamma_8^-$  ایجاد می شود. در این دستگاهها با تقارن چهارگوشی، قدرت وارونی نواری به صورت تفاوت انرژی بین نوار تبهگن دوگانه  $\Gamma_6$  و همچنین نوار تبهگن دوگانه  $\Gamma_8^+$  در مرکز ناحیه نخست بریلوئن به صورت  $E(\Gamma_6) - E(\Gamma_8^+)$

تعریف می‌شود. ترکیب‌ها با ترتیب نواری عادی دارای قدرت وارونی نواری مثبت و ترکیب‌ها با ترتیب نواری وارون دارای قدرت وارونی نواری منفی هستند. در شکل (۴) (ردیف اول) ساختار نواری InSb تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه از ۱ تا ۴ درصد نشان داده شده است. تحت تأثیر کشش شبکه، افزون بر ایجاد شکاف نواری در ساختار نواری InSb در نقطه  $\Gamma$  که به دلیل شکسته شدن تقارن مکعبی ایجاد می‌شود، وارونگی نواری نیز در این نقطه ایجاد می‌شود. به‌ازای ۱ درصد بسط غیرهیدرواستاتیک شبکه، قدرت وارونی نواری منفی است؛ چرا که نوارهای تبهگن دوگانه  $\Gamma_8^+$  بالاتر از نوار دوگانه  $\Gamma_6$  قرار می‌گیرد. این روند به‌ازای درصدهای بالاتر بسط شبکه نیز حفظ می‌شود. هم‌زمان با ایجاد وارونی نواری در ساختار نواری تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه، یک شکاف نواری در نقطه  $\Gamma$  باز می‌شود که میزان این شکاف با افزایش بسط شبکه افزایش می‌یابد.

میزان شکاف نواری باز شده در نقطه  $\Gamma$  در جدول (۱) آمده است. از آن جا که وجود وارونگی نواری در نقاط با تقارن بالا از جمله نقطه  $\Gamma$ ، می‌تواند نشانه‌ای قوی از وجود فاز توپولوژی در یک ماده باشد، بنابراین در InSb تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه از ۱ تا ۴ درصد، گذار از نیمه‌رسانای معمول با نظم نواری عادی در نقطه  $\Gamma$  به سمت نیمه‌رسانای توپولوژی با نظم نواری وارون در نقطه  $\Gamma$  رخ می‌دهد. نتایج بدست آمده از محاسبات به‌ازای ۲ تا ۴ درصد کشش غیرهیدرواستاتیک با نتایج مطالعه پیشین [۵]، که در راستای گذار فاز توپولوژیکی InAs، InSb و آلایژهای سه‌تایی آن‌ها با استفاده از تابعی GGA (Wu- Cohen) انجام شده است، در هماهنگی بسیار خوبی قرار دارد. هر دو مطالعه از ۲ تا ۴ درصد گذار به سمت نیمه‌رسانای توپولوژی را پیش‌بینی می‌کنند؛ اما در یک درصد بسط، پیش‌بینی‌های متفاوتی از گذار فاز توپولوژی دارند. دلیل تفاوتی که در مشاهده گذار فاز توپولوژی در یک درصد بسط بروز پیدا می‌کند، استفاده از شیوه متفاوت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه در صفحه ab است. در مطالعه پیشین ثابت شبکه در صفحه ab بسط داده شده است و ثابت شبکه در راستای محور c با به‌کارگیری تابعی (Wu- Cohen) GGA بهینه شده است، در صورتی که مطالعه حاضر بدون بهینه کردن پارامتر شبکه c انجام شده است. در مطالعه پیشین صورت گرفته روی این ترکیب وابستگی شکاف نواری باز شده در نقطه  $\Gamma$  به کشش غیرهیدرواستاتیک مورد بررسی قرار نگرفته است؛ بنابراین مرجعی برای مقایسه میزان شکاف نواری باز شده در ساختار نواری InSb حین گذار به سمت نیمه‌رسانای توپولوژی (نتایج موجود در جدول (۱)) وجود ندارد.



در مورد InBi (شکل (۴) ردیف پایین) تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه از ۱ تا ۴ درصد، افزون بر حفظ شدن وارونگی نواری در نقطه  $\Gamma$  یک شکاف نواری در این نقطه ایجاد می شود که همانند InSb میزان این شکاف با افزایش بسط شبکه افزایش می یابد. بنابراین InBi که در شبکه تعادلی در فاز فلزی قرار دارد تحت کشش غیرهیدرواستاتیک به یک نیمه رسانای توپولوژی تبدیل می شود که میزان شکاف نواری آن رفته رفته با افزایش بسط غیرهیدرواستاتیک شبکه افزایش می یابد.

همان گونه که در جدول (۱) آمده است، شکاف نواری با افزایش بسط غیرهیدرواستاتیک افزایش می یابد و از مقداری در حدود  $0.030$  الکترون - ولت در حالت یک درصد بسط به مقداری در حدود  $0.12$  الکترون ولت در حالت ۴ درصد بسط می رسد. متأسفانه هیچ گونه نتیجه تجربی و یا محاسباتی در ارتباط با گذار فاز توپولوژیکی InBi و همچنین میزان شکاف نواری باز شده در ساختار نواری InBi برای مقایسه با مطالعه حاضر وجود ندارد.

**جدول ۱** میزان شکاف نواری باز شده در نقطه  $\Gamma$  بصورت  $(E_{\Gamma 8^+} - E_{\Gamma 8^-})$  برای InSb و InBi تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه (با بسط شبکه در صفحه ab از ۱ تا ۴ درصد و ثابت نگه داشتن ثابت شبکه در راستای محور c).

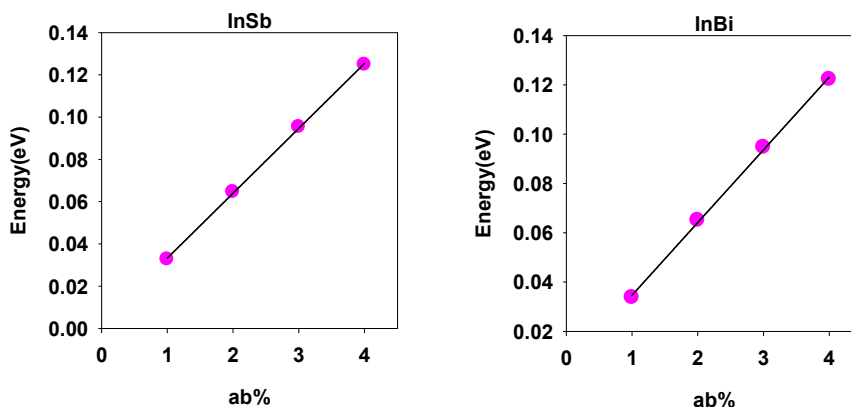
ت ترکیب	بسط شبکه (درصد)	$(E_{\Gamma 8^+} - E_{\Gamma 8^-})$ (eV)
InSb	۱	۰/۰۳۲۷
InSb	۲	۰/۰۶۴۶
InSb	۳	۰/۰۹۵۳
InSb	۴	۰/۱۲۴۸
InBi	۱	۰/۰۳۳۷
InBi	۲	۰/۰۶۵۱
InBi	۳	۰/۰۹۴۷
InBi	۴	۰/۱۲۲۱

هنگامی که نقطه های مشخص کننده شکاف نواری باز شده در نقطه  $\Gamma$  به ازای درصد های مختلف بسط شبکه با معادلات مرتبه نخست برآزش داده می شود، مشاهده می شود میزان انحراف این نقاط از این معادله خطی بسیار ناچیز است. از این رو، شکاف نواری باز شده در ساختار نواری InSb،

InBi تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه به صورت خطی افزایش می‌یابد. این امر به خوبی در شکل (۵) نشان داده شده است.

مقادیر قدرت وارونی نواری بر حسب کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه نیز در جدول (۲) آمده است.

$$(E(\Gamma_8^+) - E(\Gamma_8^-)) \text{ (eV)}$$



شکل ۵ شکاف نواری باز شده در نقطه  $\Gamma$  برای InBi و InSb به صورت تابعی از بسط غیرهیدرواستاتیک شبکه (بسط ثابت شبکه در صفحه ab از ۱ درصد تا ۴ درصد و ثابت نگه داشتن ثابت شبکه در راستای محور c). نقاط مشخص کننده شکاف نواری باز شده در نقطه  $\Gamma$  برای InBi و InSb به ترتیب با معادلات مرتبه نخست  $E_g = 0.003 + 0.03x$  و  $E_g = 0.005 + 0.03x$  برازش داده شده‌اند.

جدول ۲ قدرت وارونی نواری به صورت  $(E_{\Gamma_6} - E_{\Gamma_8^+})$  برای InBi و InSb تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه (بسط شبکه در صفحه ab از ۱ تا ۴ درصد و ثابت نگه داشتن ثابت شبکه در راستای محور c).

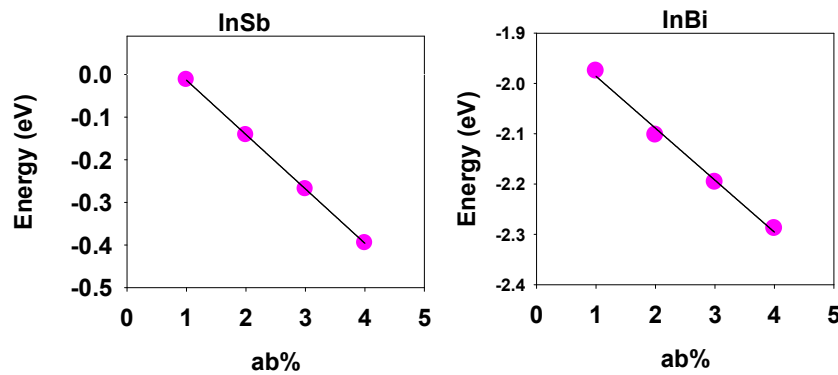
ترکیب	بسط شبکه (درصد)	$(E_{\Gamma_6} - E_{\Gamma_8^+})$ (eV)
InSb	۱	-۰/۱۲۵
InSb	۲	-۰/۱۴۲
InSb	۳	-۰/۲۷
InSb	۴	-۰/۴
InBi	۱	-۱/۹۸
InBi	۲	-۲/۱
InBi	۳	-۲/۲
InBi	۴	-۲/۲۹



همان گونه که در جدول (۲) نشان داده شده است، به ازای یک درصد بسط شبکه قدرت وارونی نواری برای InSb و InBi منفی می شود و این روال به ازای درصدهای بیشتر بسط شبکه نیز مشاهده می شود. قدرت وارونگی نواری برای InSb از ۰/۱۲۵- الکترون ولت در حالت یک درصد بسط به ۰/۴- الکترون ولت در حالت ۴ درصد بسط می رسد. در حالی که برای InBi قدرت وارونی نواری از ۱/۹۸- الکترون ولت در حالت یک درصد بسط به ۲/۲۹- الکترون ولت در حالت ۴ درصد بسط می رسد.

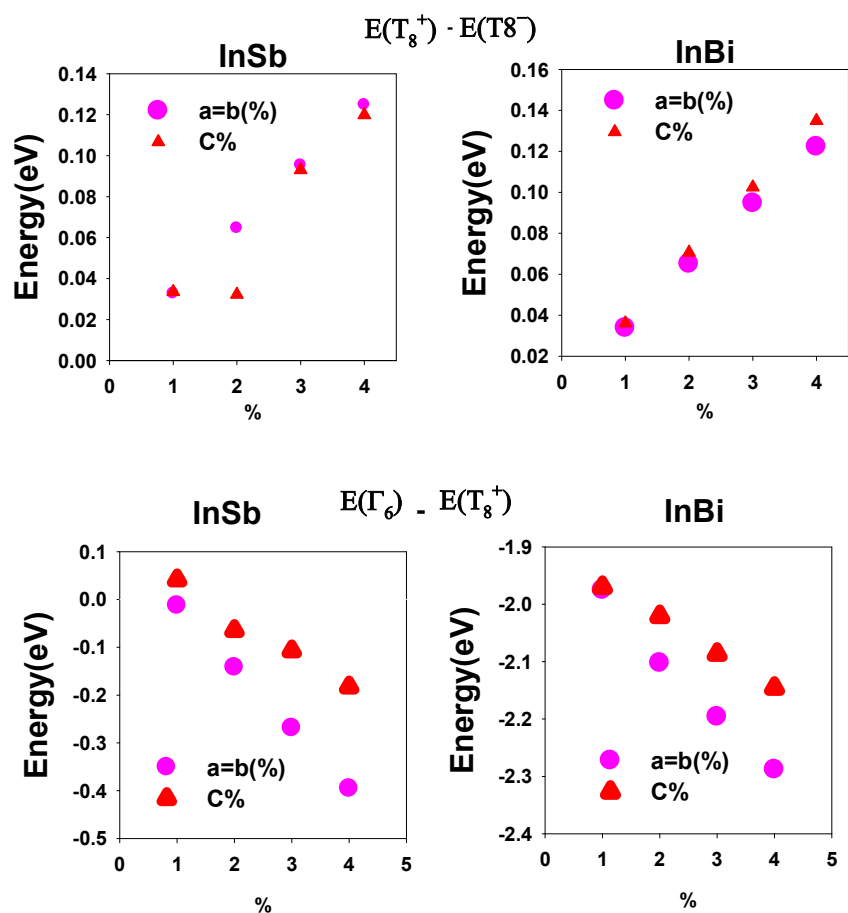
نمودار تغییرات قدرت وارونی نواری بر حسب بسط غیرهیدرواستاتیک شبکه در شکل (۶) نشان داده شده است. بر اساس این شکل، گرچه قدرت وارونی نواری برای InSb و InBi دارای مقادیر متفاوتی است؛ اما رفتار آن بر حسب بسط شبکه یکسان است و در حقیقت برای هر دو ترکیب قدرت وارونی نواری با افزایش بسط غیرهیدرواستاتیک شبکه به صورت خطی کاهش می یابد. این رفتار در هماهنگی بسیار خوبی با مطالعه پیشین، [۵]، که به بررسی گذار فاز توپولوژیکی InSb تحت کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه با بسط ثابت شبکه در صفحه ab و بهینه کردن ثابت شبکه در راستای محور c پرداخته است، قرار دارد. در این مطالعه نیز قدرت وارونی نواری با افزایش بسط شبکه به صورت خطی کاهش می یابد. نقاط مشخص کننده قدرت وارونی نواری بر حسب بسط غیرهیدرواستاتیک شبکه برای InSb و InBi به خوبی با معادلات مرتبه نخست  $+0/1 - 0/13X$  و  $\Delta E = -0/189 - 0/1X$  برازش داده شده اند.

$$(E(\Gamma_6) - E(\Gamma_8^+)) \text{ (eV)}$$



**شکل ۶** قدرت وارونی نواری برای InSb, InBi به صورت تابعی از بسط غیرهیدرواستاتیک شبکه (بسط ثابت شبکه در صفحه ab از ۱ تا ۴ درصد و ثابت نگه داشتن ثابت شبکه در راستای محور c). نقاط مشخص کننده قدرت وارونی نواری بر حسب بسط غیرهیدرواستاتیک شبکه برای InSb و InBi به خوبی با معادلات مرتبه نخست  $+0/1 - 0/13X$  و  $\Delta E = -0/189 - 0/1X$  برازش داده شده اند.

شبکه ترکیب‌های InBi و InSb تحت نوع دوم کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه (بسط در راستای محور C) نیز قرار گرفته است. از آنجا که نتایج بدست آمده با تفاوت‌های جزئی بسیار مشابه نتایج بدست آمده تحت نوع اول کشش غیرهیدرواستاتیک (بسط در صفحه ab) است، به همین منظور در ادامه تنها مقایسه شکاف نواری باز شده در نقطه  $\Gamma$  و همچنین قدرت وارونی نواری در دو نوع بسط انجام می‌شود (شکل ۷).



**شکل ۷** شکاف نواری باز شده در نقطه  $\Gamma$  به صورت  $\Gamma_6^+ - \Gamma_8^-$  (ردیف بالا) و قدرت وارونی نواری به صورت  $\Gamma_6 - \Gamma_8^+$  (ردیف پایین) برای InBi و InSb به صورت تابعی از نوع اول بسط غیرهیدرواستاتیک شبکه (بسط ثابت شبکه به صورت یکسان در راستای محورهای a و b از ۱ تا ۴ درصد (دایره‌های صورتی رنگ)) و نوع دوم بسط غیرهیدرواستاتیک شبکه (بسط ثابت شبکه در راستای محور C از ۱ تا ۴ درصد (مثلث‌های قرمز رنگ)).





مقادیر پیش‌بینی شده شکاف نواری باز شده در نقطه  $\Gamma$  برای InBi در هر دو نوع از بسط شبکه بسیار به هم نزدیک هستند. برای InSb به‌ازای درصدهای ۱، ۳ و ۴ مقادیر پیش‌بینی شده شکاف نواری در هر دو بسط بسیار به هم نزدیک هستند. اما در ۲ درصد بسط، مقدار شکاف پیش‌بینی شده در نوع اول بسط شبکه (دایره‌های صورتی رنگ) بزرگ‌تر از مقدار پیش‌بینی شده در نوع دوم بسط (مثلث‌های قرمز رنگ) است. مقایسه قدرت وارونی نواری در دو نوع بسط شبکه نشان می‌دهد که در نوع دوم بسط شبکه (بسط ثابت شبکه C) برای هر دو ترکیب قدرت وارونی نواری بزرگ‌تر از مقادیر مشابه در نوع اول بسط شبکه است. برای InBi در هر دو نوع از بسط شبکه، قدرت وارونی نواری به‌ازای یک درصد بسط شبکه منفی می‌شود و این روال به‌ازای درصدهای بیشتر نیز حفظ می‌شود. از این‌رو، هر دو بسط پیش‌بینی یکسانی از گذار فاز توپولوژیکی این ترکیب دارند. در حقیقت هر دو نوع بسط برای InBi گذار به سمت نیمه‌رسانای توپولوژی را از ۱ درصد بسط پیش‌بینی می‌کنند. برای InSb گذار به سمت نیمه‌رسانای توپولوژی در ۱ درصد بسط شبکه در نوع اول بسط غیرهیدرواستاتیک (بسط در صفحه ab) رخ می‌دهد (به دلیل منفی شدن قدرت وارونی نواری در ۱ درصد بسط) در حالی که در نوع دوم بسط شبکه (بسط C) گذار در ۲ درصد بسط رخ می‌دهد (به دلیل منفی شدن قدرت وارونی نواری در ۲ درصد بسط).

#### ۴. نتیجه‌گیری

این مطالعه باهدف بررسی تأثیر کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه بر گذار فاز توپولوژیکی و شکاف نواری ترکیب‌های InSb و InBi با استفاده از روش امواج تخت به‌ساخته خطی با پتانسیل کامل، در چارچوب نظریه تابعی چگالی، انجام شده است. کشش غیرهیدرواستاتیک به دو شیوه متفاوت به شبکه ترکیب‌های InSb و InBi اعمال شده است. با توجه به نتایج بدست آمده تحت هر دو نوع کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه با ایجاد شدن شکاف نواری در ساختار نواری، گذار به سمت نیمه‌رساناهای توپولوژی رخ می‌دهد و این شکاف نواری رفته‌رفته با افزایش بسط شبکه افزایش می‌یابد. هر دو بسط پیش‌بینی یکسانی از گذار فاز توپولوژی InBi و همچنین مقدار شکاف نواری باز شده در ساختار نواری آن در نقطه  $\Gamma$  دارند. برای InSb در نوع اول بسط غیرهیدرواستاتیک (بسط در صفحه ab) گذار به سمت نیمه‌رسانای توپولوژی در ۱ درصد بسط شبکه رخ می‌دهد، در حالی که در نوع دوم بسط شبکه (بسط C) گذار در ۲ درصد رخ می‌دهد. به‌ازای درصدهای بیشتر بسط شبکه در هر دو نوع از بسط، شکاف نواری باز شده در نقطه  $\Gamma$  رفته‌رفته افزایش می‌یابد و میزان شکاف نواری در درصدهای بالاتر (۳ و ۴ درصد) بسیار مشابه است.

نتایج بدست آمده از این مطالعه نشان می دهد که کشش غیرهیدرواستاتیک شبکه می تواند ابزاری مؤثر برای کنترل گذار فاز توپولوژیکی و شکاف نواری در ترکیب های InBi و InSb باشد. در حقیقت این مطالعه با ارائه روشی نوآورانه برای کنترل گذار فاز توپولوژیکی و شکاف نواری، دریچه ای جدید به سوی توسعه مواد نیمه رسانای جدید با ویژگی های قابل تنظیم و کارایی بالا می گشاید و فرصتی را برای کاوش های تجربی در ارتباط با بررسی ویژگی های حالت های سطحی توپولوژیکی در ترکیبات بیان شده فراهم می کند که می تواند در کاربردهای عملی بسیار حائز اهمیت باشد.

## ۵. تقدیر و تشکر

از دانشکده علوم پایه و گروه فیزیک دانشگاه لرستان که امکانات انجام این کار پژوهشی را فراهم آورده اند بسیار سپاسگزاریم.

## منابع

- [1] Bradlyn, B., Cano, J., Wang, Z., Vergniory, M.G., Felser, C., Cava, R.J. and Bernevig, B.A., "Beyond Dirac and Weyl fermions: Unconventional quasiparticles in conventional crystals", *Science* 353(6299), aaf5037, 2016. <https://doi.org/10.1126/science.aaf5037>
- [2] Hasan, M.Z. and Kane, C.L., "Colloquium: topological insulators", *Reviews of modern physics* 82, 4 (3045), 2010. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.3045>
- [3] Namjoo, S., Rozatian, A.S., Jabbari, I. and Puschnig, P., "Optical study of narrow band gap InAs x Sb 1- x (x= 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1) alloys", *Physical Review B* 91, 20 (205205), 2015. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.205205>
- [4] Ahmadvand, S., Namjoo, S., Ganji, M. and Dadsetani, M., "Structural and electronic properties of InSb1-xBix (x= 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1)", *Journal of Research on Many-body Systems* 13(4), 69-81, 2024. (in Persian) <https://doi.org/10.22055/JRMBS.2024.18899>
- [5] Namjoo, S., Rozatian, A.S. and Jabbari, I., "Influence of lattice expansion on the topological band order of InAsxSb1- x (x= 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1) alloys", *Journal of Alloys and Compounds* 628, 458-463, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.12.131>
- [6] Singh, D.J. and Nordstrom, L., "Planewaves, Pseudopotentials, and the LAPW method", *Springer Science & Business Media*, 2006.
- [7] Blügel, S. and Bihlmayer, G., "Full-potential linearized augmented planewave method", *Computational nanoscience: do it yourself* 31, 85-129, 2006.
- [8] Blaha, P., Schwarz, K., Madsen, G.K., Kvasnicka, D. and Luitz, J., "wien2k", *An augmented plane wave+ local orbitals program for calculating crystal properties* 60, 1, 2001.
- [9] Tran, F. and Blaha, P., "Accurate band gaps of semiconductors and insulators with a semilocal exchange-correlation potential", *Physical review letters* 102(22), 226401, 2009. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.226401>



- [10] Wu, Zhigang, and Ronald E. Cohen. "More accurate generalized gradient approximation for solids", *Physical Review B* 73(23), 235116, 2006. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.73.235116>
- [11] Madelung, O., "Semiconductors: data handbook", *Springer Science & Business Media*, 2004.
- [12] Rajpalke, M.K., Linhart, W.M., Yu, K.M., Birkett, M., Alaria, J., Bomphrey, J.J., Sallis, S., Piper, L.F.J., Jones, T.S., Ashwin, M.J. and Veal, T.D., "Bi-induced band gap reduction in epitaxial InSbBi alloys", *Applied Physics Letters* 105(21), 2014. <https://doi.org/10.1063/1.4902442>
- [13] Peyghambarian, N., Koch, S.W. and Mysyrowicz, A., "Introduction to semiconductor optics", *Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA*, 1993.
- [14] Slater, J.C. and Koster, G.F., "Simplified LCAO method for the periodic potential problem", *Physical review* 94(6), 1498, 1954. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.94.1498>
- [15] Chadi, D.J., "Spin-orbit splitting in crystalline and compositionally disordered semiconductors." *Physical Review B* 16(2), 790, 1977. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.16.790>



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## تأثیر تلاطم غلاف پلاسمایی بر حالت‌های تکانه‌ی زاویه‌ای مداری باریکه‌های بسل - گوسین و لاگر - گوسین<sup>۱</sup>

داود نوبهار<sup>۲\*</sup> و سیروس خرم<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۳۰

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال چهاردهم، پیاپی ۳۸، پاییز ۱۴۰۳

صص ۱۲۲ - ۱۳۴

### چکیده:

در این پژوهش احتمال حضور حالت‌های تکانه‌ی زاویه‌ای مداری باریکه‌های بسل - گوسین و لاگر - گوسین انتشار یافته در تلاطم غلاف پلاسمایی به صورت نظری بررسی می‌شود. برای این منظور با استفاده از طیف وون کارمن تصحیح شده در چارچوب نظری رایتوف، طیف تکانه‌ی زاویه‌ای مداری باریکه‌های ورتکس استخراج می‌شود، و سپس تجزیه و تحلیل‌های عددی برای نشان دادن تفاوت ویژگی‌های انتشاری دو باریکه‌ی ورتکس در نظر گرفته شده در داخل تلاطم غلاف پلاسمایی انجام می‌پذیرد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که پارامترهای باریکه‌ی فرودی همانند عدد مد زاویه‌ای، کمر باریکه، و طول موج به راحتی می‌توانند طیف تکانه‌ی زاویه‌ای مداری هر دو نوع باریکه‌ی ورتکس را تحت تأثیر قرار دهند. همچنین، افزایش پارامترهای ناهمسانگردی محیط متلاطم می‌تواند منجر به کاهش اختلال ناشی از تلاطم شود. افزون بر این، مشخص می‌شود که باریکه‌های غیرپراشی بسل - گوسین ویژگی‌های انتشاری بهتری نسبت به باریکه‌های لاگر - گوسین در تلاطم غلاف پلاسمایی نشان می‌دهند. ویژگی‌های بیان شده به باریکه‌های بسل - گوسین این امکان را فراهم می‌سازد تا به عنوان گزینه‌ای خوب برای کاربردهای ارتباطی در فضای آزاد باشند.

**واژگان کلیدی:** غلاف پلاسمایی، تکانه زاویه‌ای مداری، تلاطم، باریکه‌های ورتکس.

<sup>۱</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46007.1382>

<sup>۲</sup> دانش‌آموخته دکتری، دانشکده‌ی فیزیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول) Email: d.nobahar@tabrizu.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، پژوهشکده‌ی فیزیک کاربردی و ستاره‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. Email: skhorram@tabrizu.ac.ir



## ۱. مقدمه

امروزه مخابرات نوری در فضای آزاد به دلیل ایمنی ارتباط، مقرون به صرفه بودن، پهنای نواری بالا، انعطاف پذیری و سهولت ارتباط به یکی از کارآمدترین سامانه‌های ارتباطی ممکن تبدیل شده است [۱]. با این حال، عملکرد این سامانه‌های ارتباطی تحت تأثیر برخی شرایط ناسازگار چون تلاطم‌های جوی قرار گرفته و منجر به تخریب داده‌ها و در برخی موارد سبب قطعی ارتباطات می‌شود [۲]. این اختلالات ناشی از تلاطم در مواردی که سرعت وسیله‌ی در حال پرواز در حدود سرعت‌های هایپرسونیک می‌باشد قابل ملاحظه‌تر می‌شود.

در حقیقت، هنگامی که یک فضاپیما به داخل جو زمین وارد می‌شود و یا وسیله‌ی نقلیه‌ای با سرعت بیشتر از پنج ماخ در جو زمین حرکت می‌کند، یک موج شوک در جلوی وسیله ایجاد شده و سبب فشرده و گرم شدن هوای اطراف می‌شود. در ناحیه‌ی شوک، انرژی جنبشی وسیله به گرما تبدیل شده و منجر به افزایش دمای هوا می‌شود. این امر به نوبه‌ی خود سبب می‌شود تا مولکول‌های هوا از هم گسسته و حتی یونیزه شوند. بنابراین یک لایه‌ی پلاسمایی در اثر یونش ذرات خنثی توسط گرمایش موج شوک ایجاد می‌شود. این لایه‌ی پلاسمایی به غلاف پلاسمایی معروف است و می‌تواند اثرات مهمی بر عملکرد وسیله داشته باشد زیرا مانع عبور امواج ارتباطی شده و یا اینکه عبور آن‌ها را دچار اختلال می‌کند [۳]. باید بیان کرد که ارتباطات پیوسته و بی‌وقفه برای ایمنی پرواز، تجزیه و تحلیل مخاطرات و در حالت کلی موفقیت در مأموریت وسایل نقلیه‌ی سرنشین‌دار و بدون سرنشین بسیار مهم است. به همین منظور راه‌کارهای متفاوتی برای حل مسئله‌ی اختلالات ناشی از تلاطم غلاف پلاسمایی پیشنهاد شده است. یکی از این راه‌کارهایی که توسط پژوهشگران مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است، استفاده از پرتوهای غیرپراشی ورتکس برای ارتباطات نوری است [۴-۶].

به صورت کلی، پرتوهایی که حامل تکانه‌ی زاویه‌ای مداری می‌باشند، با پژوهش‌هایی که آقای آلن و همکارانشان در سال ۱۹۹۲ انجام دادند [۷] پا به عرصه فناوری‌های جدیدی همچون تصویربرداری با وضوح بالا [۸]، ارتباطات بی‌سیم و انتقال داده‌های حجیم [۹]، اطلاعات کوانتومی [۱۰]، و سایر زمینه‌های در حال گسترش نهادند. این پرتوها دارای نمایه‌ای به صورت  $e^{i\ell\theta}$  می‌باشند، که در آن  $\ell$  عدد مد زاویه‌ای بوده و  $\theta$  نمایان‌گر زاویه‌ی سمتی است. چنین ساختاری به بردار پوئین‌تینگ اجازه می‌دهد تا حول محور انتشار دوران کند. از این‌رو، تحت این شرایط موج دارای شکل فازی به صورت هلیکالی بوده و تکینگی فازی در مرکز آن ایجاد می‌شود [۱۴-۱۱]. در سال‌های کنونی استفاده از پرتوهای ورتکس برای ارتباطات نوری به صورت چشمگیری رو به افزایش بوده است.

استفاده از سامانه‌های ارتباطی مبتنی بر تکانه‌ی زاویه‌ای مداری نه تنها انتقال حجم وسیعی از داده‌ها را در مدت زمان بسیار اندک امکان‌پذیر می‌سازد، بلکه امنیت شبکه ارتباطی را از راه کدگذاری داده‌ها امکان‌پذیر می‌سازد [۱۶-۱۵]. با این حال انتشار این پرتوها در محیط جوی همراه با اختلالات ناشی از تلاطم خواهد بود و آشنایی با روش تعامل این امواج حامل تکانه‌ی زاویه‌ای مداری با محیط‌های متلاطم یکی از ضرورت‌ها در عرصه‌ی ارتباطات نوری در فضای آزاد برای بازیابی داده‌ها است.

از این‌رو در بخش‌های بعدی مقاله، مختصر باریکه‌های خود سامانده بسل گوسین معرفی خواهد شد و روش تعامل آن‌ها در حین انتشار در تلاطم غلاف پلاسمایی با باریکه‌های پیرامحوری لاگر گوسین مقایسه می‌شود. در آخر نتایج بدست آمده تجزیه و تحلیل خواهد شد و خلاصه‌ای از نتایج بیان خواهد شد.

## ۲. الگوی نظری و معادلات بنیادی

### ۱.۲ باریکه‌ی بسل - گوسین

توابع بسل از حل دقیق معادله‌ی هلمهولتز بدست می‌آیند و دارای ویژگی‌های منحصر به فرد در حفظ شکل و شدت خود در فاصله‌های طولانی می‌باشند. البته، یک پرتو بسل برای انتشار غیرپراشی خود به منبع بی‌نهایتی از انرژی نیاز دارد و یک حالت ایده‌آل محسوب می‌شود. برای اینکه این باریکه دارای حد مرزی بوده و از لحاظ فیزیکی توجیه‌پذیر باشد، در بیشتر موارد این باریکه را به صورت بسل - گوسین در نظر می‌گیرند [۱۸-۱۷]. میدان الکتریکی موج بسل - گوسین در مختصات استوانه‌ای به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E_{BG}^{in}(r, \theta, 0) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} J_{\ell}(k_r r) \exp\left[-\frac{r^2}{W_0^2}\right] \exp[i\ell\theta] \quad (1)$$

که در آن،  $\ell$  عدد مد زاویه‌ای،  $W_0$  کمر باریکه، و  $k_r$  بردار موج شعاعی می‌باشد. در غیاب تلاطم، میدان الکتریکی موج بسل - گوسین در صفحه‌ی خروجی با استفاده از انتگرال هویگنس - فرنل به صورت زیر بدست می‌آید:

$$E_{BG}^{out}(r, \theta, z) = (-i)^{\ell+1} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{W_0}{W}\right)^2 \left(i + \frac{z}{z_R}\right) \exp\left[-\frac{r^2}{W^2} - \frac{k_r^2 z W_0^2}{4(z - iz_R)}\right] I_{\ell}\left(\frac{z_R k_r r}{z - iz_R}\right) \exp\left[ik\left(z + \frac{r^2}{2R_z}\right)\right] \exp[i\ell\theta] \quad (2)$$



که در آن،  $k = 2\pi/\lambda$  عدد موج،  $z_R = kW_0^2/2$  طول ریلی،  $W = W_0[1 + (z/z_R)^2]^{1/2}$  شعاع باریکه، و  $R_z = z[1 + (z/z_R)^2]$  شعاع انحناء می‌باشد. معادله‌ی (۲) را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

$$E_{BG}^{out}(r, \theta, z) = \Omega_{BG} \exp [i\ell\theta]. \quad (۳)$$

در رابطه بالا داریم:

$$\Omega_{BG} = (-i)^{\ell+1} \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{W_0}{W}\right)^2 \left(i + \frac{z}{z_R}\right) \exp \left[-\frac{r^2}{W^2} - \frac{k_r^2 z W_0^2}{4(z - iz_R)}\right] I_\ell \left(\frac{z_R k_r r}{z - iz_R}\right) \times \exp \left[ik \left(z + \frac{r^2}{2R_z}\right)\right]$$

## ۲.۲ باریکه‌ی لاگر-گوسین

پرتوهای لاگر-گوسین از حل معادله‌ی موج در دستگاه مختصات استوانه‌ای با در نظر گرفتن تقریب پیرامحوری بدست می‌آید [۱۹]. میدان الکتریکی این امواج در صفحه‌ی ورودی به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$E_{LG}^{in}(r, \theta, 0) = \frac{1}{w_0} \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!}} \left(\frac{\sqrt{2}r}{w_0}\right)^{|l|} \exp \left[\frac{-r^2}{w_0^2}\right] L_p^{|l|} \left(\frac{2r^2}{w_0^2}\right) \exp [-i\ell\theta] \quad (۴)$$

که در آن،  $p$  نمایانگر عدد مد شعاعی بوده و  $L_p^{|l|}$  توابع چند جمله‌ای لاگر می‌باشد. در فضای آزاد و در غیاب تلاطم، میدان الکتریکی باریکه‌ی لاگر-گوسین در صفحه‌ی خروجی به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$E_{LG}^{out}(r, \theta, z) = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!}} \frac{1}{W} \left(\frac{\sqrt{2}r}{W}\right)^{|l|} L_p^{|l|} \left(\frac{2r^2}{W^2}\right) \exp \left[-\frac{r^2}{W^2} + \frac{ikr^2 z}{2(z^2 + z_R^2)}\right] \times \exp \left[-i(2p + |l| + 1) \tan^{-1} \left(\frac{z}{z_R}\right)\right] \exp [i\ell\theta] \quad (۵)$$

معادله‌ی (۵) را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

$$E_{LG}^{out}(r, \theta, z) = \Omega_{LG} \exp [i\ell\theta]. \quad (۶)$$

در معادله‌ی (۶) داریم:



$$\Omega_{LG} = \sqrt{\frac{2p!}{\pi(p+|l|)!} \frac{1}{W} \left(\frac{\sqrt{2}r}{W}\right)^{|l|} L_p^{|l|} \left(\frac{2r^2}{W^2}\right) \exp\left[-\frac{r^2}{W^2} + \frac{ikr^2z}{2(z^2+z_R^2)}\right]} \times \exp\left[-i(2p+|l|+1)\tan^{-1}\left(\frac{z}{z_R}\right)\right].$$

### ۳.۲ طیف تکانه‌ای زاویه‌ای باریکه‌های ورتکس انتشار یافته در تلاطم غلاف پلاسمایی

برای بدست آوردن طیف تکانه‌ای زاویه‌ای باریکه‌های ورتکس در غلاف پلاسمایی متلاطم غیر همسانگرد، گرداب‌های تلاطمی را در صفحه‌ی  $(\hat{x}\hat{y})$  که بر راستای انتشار موج عمود است در نظر گرفته شده است. با این فرض، طیف توانی افت‌وخیزهای ضریب شکست محیط متلاطم غلاف پلاسمایی به صورت زیر بیان می‌گردد [۲۰-۲۱]:

$$\Phi(\delta) = \alpha \frac{64\pi\langle n_1^2 \rangle L_0^2 (s-1)}{(1+100\delta L_0^2)^s} \exp\left[-\frac{\delta}{\delta_0}\right]. \quad (7)$$

که در آن،  $\delta = \sqrt{\xi_x^2 \delta_x^2 + \xi_y^2 \delta_y^2 + \delta_z^2}$  بوده  $\xi_x$  و  $\xi_y$  پارامترهای ناهمسانگردی می‌باشند. همچنین  $s = 4 - d$  است، در حالی که،  $d$  بعد فراکتال،  $\langle n_1^2 \rangle$  واریانس افت‌وخیزهای ضریب شکست،  $\delta_0 = (2\pi/l_0)^{s-0.7}$  است و  $l_0$  و  $L_0$  به ترتیب مقیاس داخلی و خارجی تلاطم می‌باشند. باید توجه کرد در صورتی که  $\xi_x = \xi_y = 1$  باشد آنگاه محیط متلاطم غلاف پلاسمایی همسانگرد در نظر گرفته می‌شود.

برای اعمال اثر تلاطم بر موج ورودی به محیط، از تقریب رایتوف استفاده شده و میدان الکتریکی باریکه‌ی ورتکس در صفحه‌ی خروجی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$\Lambda_{tur}(r, \theta, z) = E_{\gamma}^{out}(r, \theta, z) \exp[\psi(r, \theta, z)] \quad (8)$$

که در آن،  $\gamma$  نشانگر باریکه‌های بسل - گوسین و لاگر - گوسین بوده و  $\psi(r, \theta, z)$  فاز اختلالی ناشی از تلاطم می‌باشد. به منظور تخمین طیف تکانه‌ای زاویه‌ای مداری باریکه‌ی ورتکس در صفحه‌ی خروجی،  $\Lambda_{tur}(r, \theta, z)$ ، به صورت زیر بسط داده می‌شود:

$$\Lambda_{tur}(r, \theta, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{m=-\infty}^{m=+\infty} \eta_m(r, z) \exp[im\theta] \quad (9)$$





که در آن،  $m$  عدد صحیح بوده و  $\eta_m(r, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2\pi} \Lambda_{tur}(r, \theta, z) \exp[-im\theta] d\theta$  است. حال می توان چگالی احتمالی مدهای پیچشی در تلاطم غلاف پلاسمایی را به صورت زیر نوشت:

$$\langle |\eta_m(r, z)|^2 \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \langle \Lambda_{tur}(r, \theta_1, z) \Lambda_{tur}^*(r, \theta_2, z) \rangle \exp[im(\theta_2 - \theta_1)] d\theta_1 d\theta_2 \quad (10)$$

با جایگذاری معادله (۸) در معادله (۱۰) داریم:

$$\langle |\eta_m(r, z)|^2 \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} E_Y^{out}(r, \theta_1, z) E_Y^{out*}(r, \theta_2, z) \exp[-im(\theta_1 - \theta_2)] \langle \exp[\psi(r, \theta_1, z) + \psi^*(r, \theta_2, z)] \rangle d\theta_1 d\theta_2, \quad (11)$$

با استفاده از الگوی رایتوف برای تابع ساختار فازی داریم [۲۲]:

$$\langle \exp[\psi(r, \theta_1, z) + \psi^*(r, \theta_2, z)] \rangle = \exp[-2r^2\mu(z) + 2r^2\mu(z)\cos(\theta_1 - \theta_2)], \quad (12)$$

که در آن،

$$\mu(z) = \frac{\pi^2 k^2 z}{3} \int_0^\infty \delta^3 \Phi(\delta) d\delta. \quad (13)$$

در اینجا برای ساده سازی معادله بالا، از تغییر پارامترهایی به صورت  $\delta_x = q_x / \xi_x = \frac{q \sin \varphi}{\xi_y}$  و  $\delta_y = q_y / \xi_y = \frac{q \cos \varphi}{\xi_x}$  استفاده می شود. در این شرایط، معادله (۷) به صورت زیر نوشته می شود:

$$\Phi(q) = \alpha \frac{64\pi(n_1^2)L_0^2(s-1)}{(1+100\frac{z}{L_0})^s} \exp\left[-\frac{q}{\delta_0}\right] \quad (14)$$

با جایگذاری معادله (۱۴) در معادله (۱۳) خواهیم داشت:

$$\mu(z) = \frac{\pi^2 k^2 z}{3} \frac{\xi_x^2 + \xi_y^2}{2\xi_x^2 \xi_y^2} (\alpha 64\pi(n_1^2)L_0^2(s-1)) \int_0^\infty \frac{q^3}{(1+100\frac{z}{L_0})^s} \exp\left[-\frac{q}{\delta_0}\right] dq. \quad (15)$$

حال با جایگذاری معادله (۱۵) در معادلات (۱۲) و (۱۳) و با بهره بردن از رابطه انتگرالی زیر



$$\int_0^{2\pi} \exp[-iv\theta_1 + \rho \cos(\theta_1 - \theta_2)] d\theta_1 = 2\pi \exp(-iv\theta_2) I_\nu(\rho)$$

چگالی احتمالی حالت‌های مختلف به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\langle |\eta_m(r, z)|^2 \rangle = 2\pi \Omega_\gamma(r, \theta, z) \Omega_\gamma^*(r, \theta, z) \exp[-2r^2 \mu(z)] I_{m-\ell}(2r^2 \mu(z)). \quad (16)$$

در نهایت، طیف عبوری حالت‌های مختلف تکانه‌ی زاویه‌ای مداری باریکه‌های ورتکس انتشار یافته در غلاف پلاسمایی متلاطم به صورت زیر بدست می‌آید:

$$P_m = \frac{\int_0^{R_0} \langle |\eta_m(r, z)|^2 \rangle r dr}{\sum_{j=-\infty}^{+\infty} \int_0^{R_0} \langle |\eta_j(r, z)|^2 \rangle r dr}. \quad (17)$$

در رابطه‌ی بالا،  $R_0$  بیانگر شعاع دریچه‌ی دریافت کننده‌ی باریکه‌ی عبوری می‌باشد.

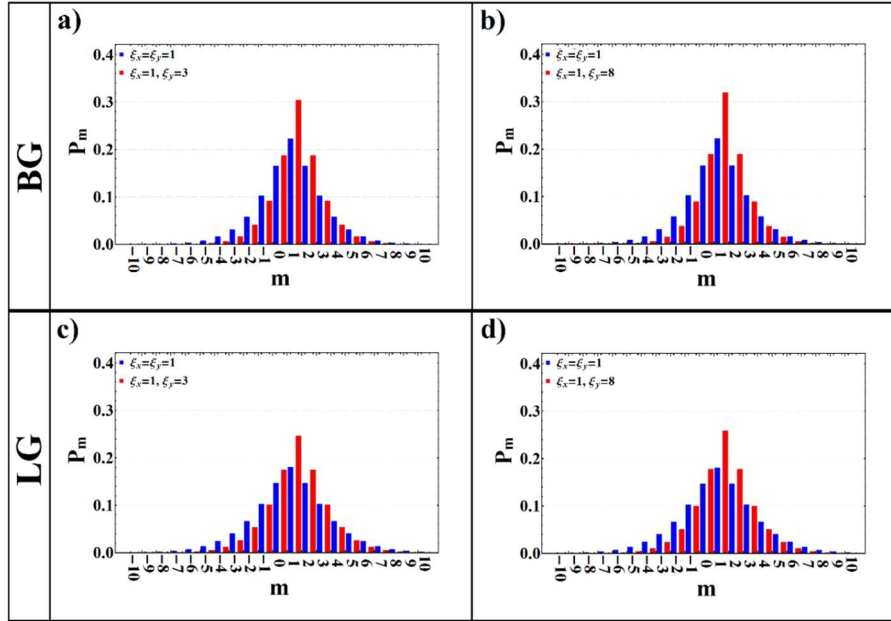
### ۳. تجزیه و تحلیل محاسبات عددی

در این بخش برای نشان دادن تغییرات حالت‌های تکانه‌ی زاویه‌ای مداری پرتوهای ورتکس انتشار یافته در تلاطم غلاف پلاسمایی به چند بررسی عددی با استفاده از پارامترهای مختلف پرداخته شده است. برای این منظور طول موج باریکه‌ی فرودی برابر  $\lambda = 1550 \times 10^{-9} m$ ، کمر باریکه برابر  $W_0 = 0.02 m$ ، عدد مد شعاعی برابر  $p = 0$ ، واریانس افت و خیزهای ضریب شکست برابر  $\langle n_1^2 \rangle = 0.73 \times 10^{-20}$ ، شعاع دریچه‌ی دریافت کننده برابر  $R_0 = 0.03 m$ ، و مقیاس داخلی و خارجی تلاطم به ترتیب برابر  $l_0 = 5.3 \times 10^{-6} m$  و  $L_0 = 0.1 m$  در نظر گرفته شده است [۲۱].

شکل (۱) طیف تکانه‌ی زاویه‌ای مداری بدست آمده در فاصله‌ی  $z = 0.3 m$  برای باریکه‌های بسل - گوسین و لاگر - گوسین انتشار یافته در غلاف پلاسمایی متلاطم به ازای  $\ell = 1$  را نشان می‌دهد. در این شکل به روشنی مشاهده می‌شود، هنگامی که باریکه‌ی ورتکسی با مد تکانه‌ی زاویه‌ای خالص وارد محیط متلاطم غلاف پلاسمایی می‌شود، بعد از طی مسافتی اندک به دلیل افت و خیزهای ضریب شکست محیط به مدهای متفاوت دیگری پاشیده می‌شود. این پاشیدگی به مدهای هم‌جوار در محیط‌های متلاطم همسانگرد ( $\xi_x = \xi_y = 1$ ) بیشتر از محیط‌های ناهمسانگرد ( $\xi_x \neq \xi_y$ ) رخ می‌دهد. به صورتی که احتمال حضور مد مرکزی یا همان مد اولیه در محیط‌های متلاطم ناهمسانگرد بیشتر است و با افزایش ضریب ناهمسانگردی محیط، احتمال حضور



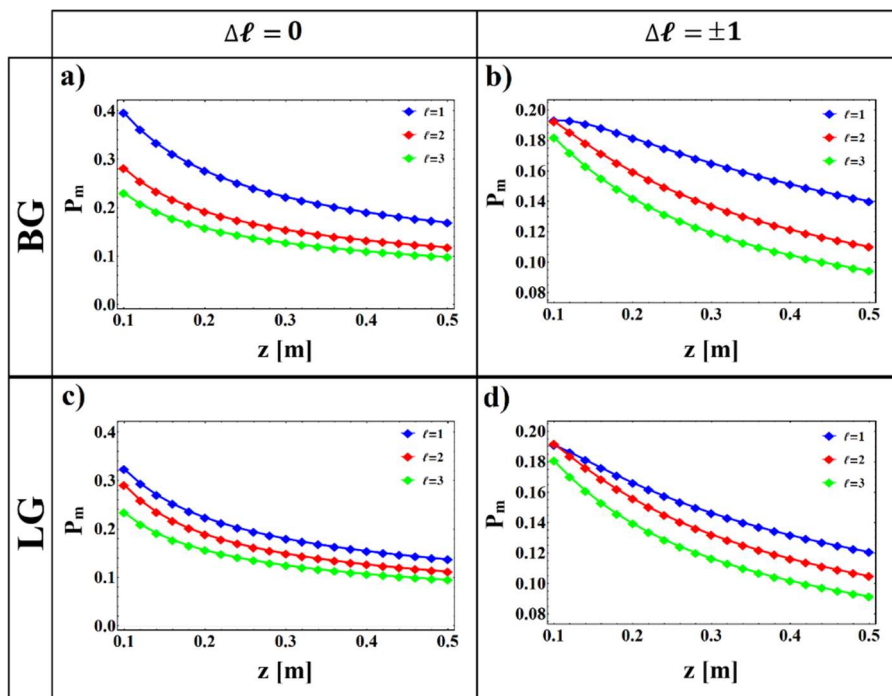
مد مرکزی برای هر دو باریکه افزایش می‌یابد. اگرچه، همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود، در شرایط مساوی احتمال حضور مد مرکزی برای باریکه‌های بسل - گوسین در هر دو حالت محیط همسانگرد و ناهمسانگرد از احتمال حضور مد مرکزی در باریکه‌های لاگر - گوسین بیشتر است. این گفته بدان معناست که باریکه‌های بسل - گوسین در تعامل با محیط‌های متلاطم عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند.



شکل ۱ طیف تکانه‌ی زاویه‌ای مداری باریکه‌های بسل - گوسین و لاگر - گوسین انتشار یافته در تلاطم غلاف پلاسمایی به ازای مد زاویه‌ای فرودی  $\ell = 1$  و مقادیر مختلفی از پارامترهای ناهمسانگردی.

در شکل (۲) اثر اعداد مد زاویه‌ای فرودی متفاوت را بر احتمال حضور مد مرکزی تکانه‌ی زاویه‌ای مداری ( $\Delta\ell = \ell - m = 0$ ) و همچنین اولین مد هم‌جوار آن ( $\Delta\ell = \ell - m = 1$ ) در فواصل مختلف انتشار مشاهده می‌شود. شکل‌های (۲a) و (۲c) که برای حالت  $\Delta\ell = 0$  می‌باشند نشان می‌دهند که با افزایش فاصله‌ی انتشار (Z) احتمال حضور مد مرکزی برای هر دو باریکه‌ی ورتکس کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که افزایش عدد مد زاویه‌ای باریکه‌ی فرودی سبب کاهش احتمال حضور مد مرکزی در فواصل انتشاری مختلف می‌شود. به عبارت دیگر هر چه عدد مد زاویه‌ای اولیه‌ی باریکه بزرگتر باشد، باریکه با سطح مقطع بزرگتری با محیط متلاطم

برهمکنش می‌کند و این امر منجر به کاهش احتمال حضور مد مرکزی در صفحه‌ی خروجی می‌شود. در شکل‌های (۲b) و (۲d) که برای  $\Delta\ell = 1$  رسم شده‌اند، روند مشابهی با حالت قبلی مشاهده می‌شود و با افزایش فاصله‌ی انتشار، احتمال حضور اولین مد هم‌جوار مد اصلی کاهش می‌یابد.



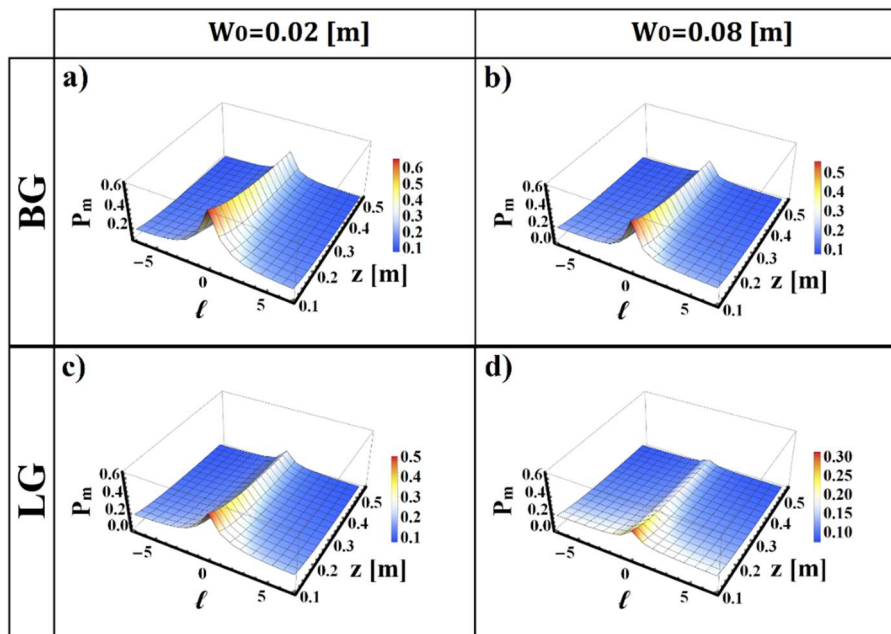
شکل ۲ احتمال حضور مدهای تکانه‌ی زاویه‌ای مداری باریکه‌های بسل-گوسین و لاگر-گوسین در فواصل انتشار مختلف در داخل غلاف پلاسمایی متلاطم همسانگرد به ازای عدد مد زاویه‌ای اولیه‌ی ۱ و ۲ و ۳ (a,c) و  $\Delta\ell = \pm 1$  (b,d) و  $\Delta\ell = 0$ .

در شکل (۳) اثر تغییر اندازه‌ی کمر باریکه‌ی فرودی بر احتمال حضور مد مرکزی طیف تکانه‌ی زاویه‌ای مداری به ازای فواصل انتشار مختلف در داخل محیط متلاطم همسانگرد برای هر دو باریکه‌ی بسل-گوسین و لاگر-گوسین به صورت سه بعدی نشان داده شده است. در این شکل به روشنی می‌توان دید که برای هر دو مقدار کمر باریکه، احتمال حضور مدهای مرکزی مختلف باریکه‌ی بسل-گوسین بیشتر از باریکه‌ی لاگر-گوسین در فاصله‌های انتشاری متفاوت می‌باشد. همچنین برای هر دو باریکه‌ی ورتکس افزایش مقدار کمر باریکه سبب کاهش  $P_m$  برای مدهای

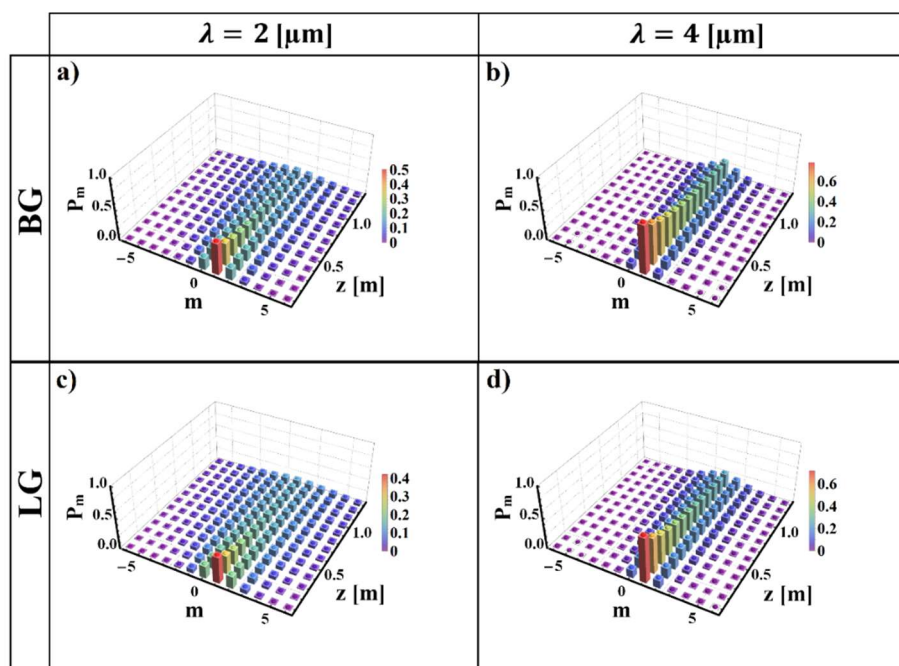


مرکزی مختلف می‌شود. از این گفته می‌توان نتیجه گرفت که هر چقدر باریکه‌ی ورتکس حول محور انتشار متمرکزتر باشد، احتمال ایجاد اختلال در ساختار تکانه‌ی زاویه‌ای آن در حین انتشار در محیط‌های متلاطم کمتر است.

در شکل (۴)، وابستگی طیف تکانه‌ی زاویه‌ای مداری باریکه‌های بسل - گوسین و لاگر- گوسین انتشار یافته در محیط غلاف پلاسمایی متلاطم همسانگرد به طول موج فرودی باریکه نشان داده شده است. با مقایسه‌ی شکل‌های (۴a) و (۴c) که برای  $\lambda = 2 \mu m$  رسم شده‌اند، با شکل‌های شکل‌های (۴b) و (۴d) که برای  $\lambda = 4 \mu m$  رسم گردیده‌اند می‌توان نتیجه گرفت که افزایش طول موج باریکه‌ی فرودی منجر به افزایش چشمگیر  $P_m$  مد مرکزی در تمام نقاط مسیر انتشاری می‌شود. از این رو، استفاده از باریکه‌هایی با طول موج‌های بلندتر در سامانه‌های ارتباطی می‌تواند با اختلالات کمتری همراه باشد.



شکل ۳ نمایش سه بعدی احتمال حضور مد تکانه‌ی زاویه‌ای مداری مرکزی ( $\Delta l = 0$ ) باریکه‌های بسل - گوسین و لاگر- گوسین بر حسب تابعی از فاصله‌ی انتشار در محیط متلاطم همسانگرد غلاف پلاسمایی به ازای دو مقدار متفاوت برای کمر باریکه.



شکل ۴ طیف تکانه‌ی زاویه‌ای مداری باریکه‌های بسل - گوسین و لاگر - گوسین بر حسب تابعی از فاصله‌ی انتشار و به ازای  $\ell = 1$ ,  $\xi_x = \xi_y = 1$ ,  $W_0 = 0.02 m$  و دو مقدار متفاوت برای طول موج فرودی.

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر تلاطم غلاف پلاسمایی را بر طیف تکانه‌ی زاویه‌ای مداری باریکه‌های بسل - گوسین و لاگر - گوسین به صورت نظری بررسی شده است. برای این منظور ابتدا با استفاده از طیف وون کارمن تصحیح شده در چارچوب الگوی نظری رایتوف، رابطه‌ی مربوط به طیف تکانه‌ی زاویه‌ای مداری مربوط به امواج ورتکس در محیط غلاف پلاسمایی استخراج شد و سپس با استفاده از تجزیه و تحلیل عددی نتایج بدست آمده از انتشار دو باریکه‌ی بسل - گوسین و لاگر - گوسین در محیط متلاطم یادشده با هم مقایسه گردید. نتایج بدست آمده از این مقایسه نشان می‌دهند که برای هر دو نوع باریکه‌ی در نظر گرفته شده، انتشار در محیط ناهمسانگرد غلاف پلاسمایی نسبت به محیط همسانگرد همراه با اختلال‌های کمتری بوده و مد تکانه‌ی زاویه‌ای مداری اصلی باریکه با احتمال کمتری به حالت‌های مجاور پاشیده می‌شود. همچنین افزایش عدد مد زاویه‌ای پرتو فرودی برای هر دو نوع باریکه سبب کاهش احتمال حضور مد مرکزی و اولین مد مجاور آن در فواصل انتشاری مختلف در داخل محیط متلاطم می‌شود.



با بررسی‌های بیشتر در مورد اثر تغییر پارامترهای باریکه‌های فرودی بر طیف تکانه‌ی زاویه‌ای مداری باریکه‌ها در صفحه‌ی خروجی مشاهده گردید که افزایش اندازه‌ی کمر باریکه‌ی فرودی سبب کاهش احتمال حضور مد مرکزی در فواصل انتشاری مختلف می‌شود. همچنین افزایش طول موج باریکه‌ی فرودی منجر به رشد احتمال حضور مد مرکزی تکانه‌ی زاویه‌ای مداری برای هر دو نوع باریکه ورتکس می‌شود. با این حال تمام نتایج نشان می‌دهند که باریکه‌ی بسل - گوسین به دلیل ویژگی خود ساماندهی که داراست، ویژگی‌های اختلالاتی و پاشندگی مد تکانه‌ی زاویه‌ای کمتری نسبت به باریکه‌ی لاگر - گوسین نشان می‌دهد. از این رو، گزینه‌ای بهتر برای سامانه‌های ارتباطی در فضای آزاد می‌باشد.

## ۵. تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله لازم می‌دانند تا مراتب امتنان و قدردانی خود را از دست‌اندرکاران دانشکده فیزیک دانشگاه تبریز صمیمانه ابراز نمایند.

## منابع

- [1] Kaushal H., Jain V.K. and Kar S., "Free space optical communication", New Delhi: Springer India Pvt. Ltd., 2017.
- [2] Zhu Z., Janasik M., Fyffe A., Hay D., Zhou Y., Kantor B., Winder T., Boyd R.W., Leuchs G. and Shi Z., "Compensation-free high-dimensional free-space optical communication using turbulence-resilient vector beams", *Nat. Commun.*, 12, 1666, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21793-1>.
- [3] Starkey R.P., "Hypersonic vehicle telemetry blackout analysis", *J. Spacecr Rockets*, 52, 426-438, 2015. <https://doi.org/10.2514/1.A32051>.
- [4] Yuan Y., Lei T., Li Z., Li Y., Gao S., Xie Z. and Yuan X., "Beam wander relieved orbital angular momentum communication in turbulent atmosphere using Bessel beams", *Sci. Rep.*, 7, 42276, 2017. <https://doi.org/10.1038/srep42276>.
- [5] Nobahar D., Khorram S. and Rodrigues J.D., "Orbital angular momentum state variation of vortex beams propagating in a plasma sheath turbulence", *Opt. Laser Technol.*, 159, 108911, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108911>.
- [6] Chen M., Wang X., Qin C., Yuan Q. and Wang L., "The spiral phase spectrum of the composite power Gaussian vortex beam in plasma sheath turbulence", *Phys. Scr.*, 99, 01550, 2024. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ad0e52>.
- [7] Allen L., Beijersbergen M.W., Spreeuw R.J.C. and Woerdman J.P., "Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes", *Phys. Rev. A*, 45, 8185-8189, 1992. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.45.8185>.
- [8] Tian N., Fu L. and Gu M., "Resolution and contrast enhancement of subtractive second harmonic generation microscopy with a circularly polarized vortex beam", *Sci. Rep.*, 5, 13580, 2015. <https://doi.org/10.1038/srep13580>.
- [9] Bozinovic N., Yue Y., Ren Y., Tur M., Kristensen P., Huang H., Willner A.E. and Ramachandran S., "Terabit-scale orbital angular momentum mode division



- multiplexing in fibers", *Science*, 340, 1545-1548, 2013. <https://doi.org/10.1126/science.1237861>.
- [10] Bahari B., Hsu L., Pan S.H., Preece D., Ndao A., Amili A.E., Fainman Y. and Kanté B., Photonic quantum Hall effect and multiplexed light sources of large orbital angular momenta, *Nat. Phys.*, 17, 700-703, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41567-021-01165-8>.
- [11] Nobahar D., Khorram S. and Rodrigues J.D., "Vortex beam manipulation through a tunable plasma-ferrite metamaterial", *Sci. Rep.*, 11, 16048, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95693-1>.
- [12] Nobahar D., Hajisharifi K. and Mehdian H., Twisted beam shaping by plasma photonic crystal, *J. Appl. Phys.*, 124, 213102, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5049547>.
- [13] Forbes A., Oliveira M.D. and Dennis M.R., "Structured light", *Nat. Photonics*, 15, 253-262, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41566-021-00780-4>.
- [14] Babiker M., Andrews D.L. and Lembessis V.E., "The Angular Momentum of Light", Cambridge University Press, Cambridge, 2013.
- [15] Willner A.E., Pang K., Song H., Zou K. and Zhou H., "Orbital angular momentum of light for communications", *Appl. Phys. Rev.*, 8, 041312, 2021. <https://doi.org/10.1063/5.0054885>.
- [16] Wang J., "Advances in communications using optical vortices", *Photonics Res.*, 4, B14-B28, 2016. <https://doi.org/10.1364/PRJ.4.000B14>.
- [17] Khonina S.N., Kazanskiy N.L., Karpeev S.V. and Butt M.A., "Bessel beam: Significance and applications—A progressive review", *Micromachines*, 11, 997, 2020. <https://doi.org/10.3390/mi11110997>.
- [18] Nobahar D., Hajisharifi K. and Mehdian H., "Collisional absorption of the optical vortex beam in plasma", *Opt. Laser Technol.*, 117, 165-168, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.04.016>.
- [19] Nobahar D. and Akou H., "Distortion of a twisted beam passing through a plasma layer", *Appl. Opt.*, 59, 6497-6504, 2020. <https://doi.org/10.1364/AO.394698>.
- [20] Li J., Li J., Guo L., Cheng M. and Xi L., "Polarization characteristics of radially polarized partially coherent vortex beam in anisotropic plasma turbulence", *Waves Random Complex Media*, 31, 1931-1944, 2021. <https://doi.org/10.1080/17455030.2020.1713421>.
- [21] Li J., Yang S., Guo L. and Cheng M., "Anisotropic power spectrum of refractive-index fluctuation in hypersonic turbulence", *Appl. Opt.*, 55, 9137-9144, 2016. <https://doi.org/10.1364/AO.55.009137>.
- [22] Yura H.T., "Mutual coherence function of a finite cross section optical beam propagating in a turbulent medium", *Appl. Opt.*, 11, 1399-1406, 1972. <https://doi.org/10.1364/AO.11.001399>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).





# Abstracts of Papers





## Research Paper

# The Effect of Plasma Sheath Turbulence on the Orbital Angular Momentum States of Bessel-Gaussian and Laguerre-Gaussian Beams<sup>1</sup>

Davod Nobahar<sup>\*2</sup> and Sirous Khorram<sup>3</sup>

Received: 2023.12.28

Revised: 2024.03.11

Accepted: 2024.04.18

## Abstract

In this work, detection probability of the orbital angular momentum (OAM) states of the Bessel-Gaussian (BG) and Laguerre-Gaussian (LG) beams passing through a plasma sheath turbulence (PST) are theoretically investigated. For this purpose, OAM-spectrum of the vortex beams (VB) is derived by using the modified von-Karman spectrum in the frame of Rytov theory, then some numerical analysis is performed to show the difference of considered VBs in the propagation through a PST. Obtained results indicate that incident beam parameters such as angular mode number, beam waist, and wavelength can easily affect the OAM-spectrum of both types of VBs. As well as, increasing the anisotropic parameters of the turbulent media can mitigate the turbulence-induced disturbance of the propagated VBs. Furthermore, it is found that diffraction-free BG beams show a better propagation performance than LG beams in the PST. This feature allows the BG beam to be a good candidate for free-space communication applications.

**Keywords:** *Plasma Sheath, Orbital Angular Momentum, Turbulence, Vortex Beams.*

---

<sup>1</sup><https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46007.1382>

<sup>2</sup> PhD Graduated, Faculty of Physics, University of Tabriz, Tabriz, Iran. (Corresponding Author) Email: d.nobahar@tabrizu.ac.ir

<sup>3</sup> Associate Professor, Research Institute for Applied Physics and Astronomy, University of Tabriz, Tabriz, Iran. Email: skhorram@tabrizu.ac.ir



Research Paper

# Topological Phase Transition of InSb and InBi Under Nonhydrostatic Lattice Expansion<sup>1</sup>

Saba Ahmadvand<sup>2</sup> and Shirin Namjoo<sup>\*3</sup>

Received: 2024.03.11

Revised: 2024.05.23

Accepted: 2024.07.03

## Abstract

This study investigated the topological phase transition of InSb and InBi under a non-hydrostatic lattice using density functional theory and the WIEN2K code. The results of examining the band structure of InSb and InBi employing the mBJGGA exchange-correlation potential indicate that InSb is a semiconductor with a small band gap and normal band order at the  $\Gamma$  point. At the same time, InBi is a metal with band inversion at the Brillouin zone center. To transform these compounds into topological semiconductors, the lattice of these compounds is subjected to non-hydrostatic lattice expansion. Non-hydrostatic lattice expansion is applied in two ways. Firstly, the lattice constants are expanded in the ab plane while keeping the lattice constant along the c-axis constant. Then, the lattice constant is expanded along the c-axis while keeping the lattice constant in the ab plane constant. The calculations indicate that under the influence of both types of non-hydrostatic lattice expansion, with the breaking of cubic symmetry, a transition towards topological semiconductors occurs.

**Keywords:** *Density Functional Theory, Topological Semiconductors, Band Inversion, III-V Compounds, Non-hydrostatic Lattice Expansion.*

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46666.1397>

<sup>2</sup> M. Sc. Graduated, Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Lorestan, Iran. Email: saba.sa259@gmail.com

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Lorestan, Iran. (Corresponding Author) Email: namjoo.sh@lu.ac.ir

<https://jap.alzahra.ac.ir>



## Research Paper

# Designing Slow Light Waveguides Consisting of Two-dimensional Photonic Crystals and Investigating its Tunability<sup>1</sup>

Taymaz Fathollahi – Khalkhali\*<sup>2</sup>, Maziyar Amraei<sup>3</sup> and Ali Aghamohammadi<sup>4</sup>

Received: 2024.02.10

Revised: 2024.04.26

Accepted: 2024.06.22

## Abstract

The purpose of this research is to investigate the group velocity of tunable two-dimensional photonic crystals. The first step considers a square lattice consisting of dielectric rods in the liquid crystal background. In the next step, this structure was rotated by 45 degrees and its photonic band structure was investigated. Then, by removing a row of dielectric material (silicon) rods a waveguide is made in the photonic crystal. The waveguide mode and the related group velocity of the waveguide mode were investigated. In the following, the effect of applying an external voltage and changing the refractive index of the background material on the group velocity was studied. Afterward, by applying geometrical changes to the size of waveguide side rods, the effect of mentioned geometrical change on the properties of the waveguide mode and the group velocity was investigated. The calculation results show that the group velocity is reduced and as a result, the group index is increased. The investigations carried out show that quantitatively, by applying an external voltage in the ordinary waveguides, the range of changes in the group index is between 7 and 10, but by applying changes in modified waveguides, this quantity changes in the range of 14 to 27, which can be adjusted by applying an external electric field.

**Keywords:** *Two-dimensional Photonic Crystal, Group Index and Velocity, Liquid Crystal, Plane Wave Expansion Method.*

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46413.1390>

<sup>2</sup>Associate Professor, Photonics and Quantum Technologies Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. (Corresponding Author). Email: tfathollahi@aeoi.org.ir

<sup>3</sup> PhD Student, Department of Physics, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran. Email: mazyar\_amraie@yahoo.com

<sup>4</sup>Associate Professor, Department of Physics, Sanandaj Branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran. Email: aliaghamohammadi@gmail.com



Research Paper

## Two-dimensional Analysis of the Bright Points Velocity in the Solar Transition Region with the Local Correlation Tracking Method<sup>1</sup>

Ehsan Tavabi<sup>2</sup>, Masoumeh Tareh<sup>3</sup> and Sima Zeighami<sup>\*4</sup>

Received: 2024.01.25

Revised: 2024.04.01

Accepted: 2024.05.18

### Abstract

Our knowledge about the origin and transformation mechanisms of the bright points in the solar network has a significant role in understanding the ejection of materials and the transfer of energy into the solar corona. Outside the active region of the Sun (AR), although it is called the Quiet Sun (QS), various types of small-scale bright phenomena constantly occur within the boundary of the super granular cells above the magnetic network. Knowing the bright points is an effective key in considering the solar spicules. In this research, we study the solar transition region bright points and examine their apparent velocities with the local correlation tracking Fourier (FLCT) method. The results illustrate that these points differ in apparent velocity direction and brightness. Their lifetime and average horizontal velocity were estimated at 100 s and 4 kms<sup>-1</sup>, respectively. Recently, a new group of solar spicules has been observed, those lifetimes are around 100 s, and show a typical horizontal velocity of 3-4 kms<sup>-1</sup>. According to the analysis of the two-dimensional, apparent velocity of the bright points on the rosettes of the network, these points can be the disk counterpart of the type II spicules. In addition, the analysis of the two-dimensional field of velocities shows rotations that can cause the excitation of Alfvénic pulses.

**Keywords:** *Solar Bright Points, FLCT, Alfvénic Pulses.*

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46290.1387>

<sup>2</sup> Associate Professor, Physics Department, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran. Email: e\_tavabi@pnu.ac.ir

<sup>3</sup> M. Sc. Graduated, Abdor Rahman Sufi Razi Higher Education Institute, Zanjan, Iran. Email: pigeon\_547@yahoo.com

<sup>4</sup> Assistant Professor, Department of Physics, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran. (Corresponding Author). Email: zeighami@iaut.ac.ir

<https://jap.alzahra.ac.ir>



## Research Paper

# Red Phosphorus Nanoparticles in the Silicon Solar Cells for Higher Cell Efficiency and Converting the Ultraviolet to Visible Light Wavelength Range<sup>1</sup>

Saeed Salehpour<sup>2</sup>

Received: 2023.11.13

Revised: 2024.03.02

Accepted: 2024.04.05

## Abstract

Red phosphorus nanoparticles were synthesized on the surface of the silicon solar cell by PVD technique (condensation on the cell surface from the vapor phase). The red phosphorous deposition on the surface of the cells was repeated several times with different thicknesses of the phosphorous layer, and after each deposition procedure, the efficiency of the silicon solar cell was measured. The obtained results demonstrated that after the deposition of 340 nm of phosphorous, the efficiency of the cell increased from 5.86 to 7.08, and about a 21% relative increase in efficiency was achieved. Moreover, the layers' absorption spectra and photoluminescence spectrum show that red phosphorus nanoparticles absorbed UV light and emitted visible light in addition to UV. In other words, the phosphorous layer has shifted the UV light to the visible light wavelength. In this research, a monocrystalline silicon solar cell was used to increase efficiency, and amorphous red phosphorus was deposited on the surface of the silicon solar cell by the PVD technique. In addition, to perform optical spectroscopy, a glass slide was placed next to the cells in each deposition step. The results of optical spectroscopy of phosphorous layers also showed that the amount of UV light transmission in the sample with a 340 nm phosphorous layer is lower than the sample with a 50 nm phosphorous layer. And vice versa, the amount of UV light absorption is higher, in other words, thicker phosphorous layers pass UV light less and absorb it more.

**Keywords:** *V Nanoparticles, Silicon Solar Cell, Efficiency, Phosphorus.*

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45587.1366>

<sup>2</sup> Researcher, Shahrood University of Technology, Faculty of Physics, Solid State Physics Department, Shahrood, Iran. Email: sd.salehpour@gmail.com



Research Paper

# Investigation of Tunneling Between the Edge States of Phosphorene Nanoribbon with Zigzag Edge<sup>1</sup>

Mahdieh Hosseinnakhaei<sup>2</sup>, Mohsen Daeimohammad<sup>3\*</sup>, Morteza Soltani<sup>4</sup>, Mina Neqabi<sup>5</sup> and Gholamreza Rashedi<sup>6</sup>

Received: 2023.11.12

Revised: 2024.02.27

Accepted: 2024.03.31

## Abstract

In this paper, the transport properties of a phosphorene nanoribbon with zigzag edges are investigated. Although phosphorene is a two-dimensional structure with gaps, each zigzag edge of phosphorene nanoribbon acts like a one-dimensional quantum wire, so a nanoribbon with two edges is similar to two parallel quantum wires. We also show that by adding an impurity line between the upper and lower edges, we can create an impurity strip that can connect the upper edge to the lower edge. In other words, different inputs can be coupled to different outputs. To calculate coupling coefficients between inputs and outputs, we use the Lippmann-Schwinger formulation. The final results show that depending on the energy of the input state and the corresponding standing wave in the impurity band, the phenomenon of resonance or anti-resonance can be created in the dispersion between inputs and outputs. Besides the theoretical aspect of the proposed scheme presented in this article, it can be applied to make nanoswitches in practice.

**Keywords:** *Phosphorene, the Edge- State, Impurity Band, Lippmann-Schwinger Formulation.*

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45541.1365>

<sup>2</sup> PhD Student, Department of Physics, Faculty of Computer Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran. Email: mahdieh.hosseinnakhaei1355@gmail.com

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Computer Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran (Corresponding Autor) Email: m.daeimohammad@pco.iaun.ac.ir

<sup>4</sup> Associate Professor, Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Email: mo.soltani@sci.ui.ac.ir

<sup>5</sup> Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Computer Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran. Email: mphdneghabi@gmail.com

<sup>6</sup> Associate Professor, Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Email: rashedi@sci.ui.ac.ir

<https://jap.alzahra.ac.ir>





Research Paper

# Design and Construction of a Plasma Generation Device Using the Surface Dielectric Barrier Discharge (SDBD) Method in a Laboratory Scale<sup>1</sup>

Ameneh Kargarian<sup>2</sup>, Soolmaz Jamali<sup>3\*</sup> and Mehdi Bakhshzad Mahmoudi<sup>4</sup>

Received: 2023.12.23

Revised: 2024.03.15

Accepted: 2024.04.17

## Abstract

This article aims to design and construct a plasma generation device using the surface dielectric barrier discharge method (SDBD) on a laboratory scale to produce a stable and uniform atmospheric pressure plasma layer. For this purpose, a copper electrode with a thickness of 100 microns with a comb- like structure was designed and constructed for this system, and a mica sheet with a thickness of 0.5 mm and dimensions of  $10 \times 10$  cm was built to make the dielectric. According to the experimental data and analytical calculations of the constructed SDBD system in working conditions of 3 kV voltage and 12.5 kHz frequency, the consumption power of this system is calculated at 50 watts. Due to the production of stable and uniform plasma created on the dielectric surface and the measured power consumption, this system will be able to be used in various sciences and industries, including surface processing industries.

**Keywords:** *Uniform Plasma, SDBD, Consumption Power, Comb- like Structure.*

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45959.1379>

<sup>2</sup> Assistant Professor, Plasma and Nuclear Physics Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. Email: kargarian@aeoi.org.ir

<sup>3</sup> PhD Graduated, Plasma and Nuclear Physics Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. (Corresponding Author) Email: s.jamali62@yahoo.com

<sup>4</sup> M. Sc. Graduated, Plasma and Nuclear Physics Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Tehran, Iran. Email: bakhshzad@gmail.com



Research Paper

# Determining Trace Elements in Agricultural Products of Chogha Village of Arak, Iran<sup>1</sup>

Reza Pour Imani<sup>\*2</sup>, Mohammad Hossien Choopan Dastjerdi<sup>3</sup>,  
Saeed Ghahani<sup>4</sup> and Marziyeh Mashayekhi<sup>5</sup>

Received: 2023.12.23

Revised: 2024.03.16

Accepted: 2024.05.18

## Abstract

All human beings need healthy nutrition to grow, so the lack or excess of low-amount elements causes diseases in humans, for this reason, it is essential to know the presence of elements in food. Arak aluminum production factory is located next to Chogha village, so it is necessary to study the effects of this factory and other industries in the region on its agricultural products. In this study, the content of 11 elements was determined: aluminum, bromine, calcium, chlorine, iron, magnesium, manganese, potassium, sodium, scandium, and zinc in crops as wheat, barley, peas, beans and alfalfa prepared from the village of Chogha in the Arak region by neutron activation analysis, as well as 3 other elements, including arsenic, lead, and cadmium were determined by inductively coupled plasma analysis. Magnesium concentration from 1310 to 3970, manganese from 15.2 to 66.3, sodium from 14.2 to 1490, aluminum from 5.72 to 914, chlorine from 364 to 12000, calcium from 413 to 29600, bromine from 0.23 to 14.50, potassium from 4740 to 14700, iron from 10.1 to 1310.0, scandium from 0.033 to 4.02, zinc from 27.7 to 96.7, arsenic from 0.000 to 0.021, lead from 0.000 to 0.003 and cadmium from 0.00 to 0.02 mg/kg. The results show that the concentration of chlorine, manganese, magnesium, iron, sodium, aluminum, bromine, calcium, scandium, zinc, and lead in alfalfa, the concentration of potassium in pinto beans, the concentration of cadmium in barley, and the concentration of arsenic in wheat are higher than another analyzed sample.

**Keywords:** *Crops, Trace Elements, Neutron Activation Method, Inductively Coupled Plasma.*

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.45958.1380>

<sup>2</sup> Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Arak University, Arak, Iran. (Corresponding Author)  
Email: r-pourimani@araku.ac.ir

<sup>3</sup> Assistant of Professor, Reactor and nuclear safety research school, Nuclear Science and Technology Research Institute, Isfahan, Iran. Email: mdastjerdi@aeoi.org.ir

<sup>4</sup> M. Sc. graduated, Department of Physics, Faculty of Science, Arak University, Arak, Iran. Email: saeed.ghahani@gmail.com

<sup>5</sup> M. Sc. graduated, Department of Physics, Faculty of Science, Arak University, Arak, Iran. Email: marziyemashayekhi1@gmail.com

Research Paper

# A Numerical Generation of Gaussian and Non-Gaussian Isotropic/Anisotropic Rough Surfaces<sup>1</sup>

Zhaleh Ebrahiminenejad<sup>2</sup>

Received: 2023.12.22

Revised: 2024.03.23

Accepted: 2024.05.26

## Abstract

In the present study, the computer simulation has been used to generate the (1+1) and (2+1) surfaces with two types of correlation function Gaussian and correlation function Exponential forms. For this aim, a random number generator is used to generate the surfaces with Gaussian height distribution with zero mean, and their correlation functions were assumed to have Gaussian and exponential formulas. The calculations have been done for isotropic and anisotropic surfaces. For monofractal evaluation of rough surfaces, skewness and kurtosis values have been calculated for these (1+1) and (2+1) dimensional surfaces. Moreover, these values have been analyzed by the behavior of probability distribution of height. Also, the Hurst exponents of surfaces have been evaluated to study the irregularity and jaggedness of produced surfaces. Furthermore, the fractal dimension of these rough surfaces has been obtained to describe the complexity of the irregular fractal surfaces.

**Keywords:** *Correlation Function, Exponential, Gaussian, Skewness, Kurtosis.*

---

<sup>1</sup> <https://doi.org/10.22051/ijap.2024.46054.1383>

<sup>2</sup> Assistant Professor, Department of Physics, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.  
Email: zh1.ebrahimi@gmail.com



<https://jap.alzahra.ac.ir>



## Contents

<b>A Numerical Generation of Gaussian and Non-Gaussian Isotropic/Anisotropic Rough Surfaces</b> Zhaleh Ebrahiminenejad	<b>7-20</b>
<b>Determining Trace Elements in Agricultural Products of Chogha Village of Arak, Iran</b> Reza Pour Imani, Mohammad Hossien Choopan Dastjerdi, Saeed Ghahani and Marziyeh Mashayekhi	<b>21-40</b>
<b>Design and Construction of a Plasma Generation Device Using the Surface Dielectric Barrier Discharge (SDBD) Method in a Laboratory Scale</b> Ameneh Kargarian, Soolmaz Jamali and Mehdi Bakhshzad Mahmoudi	<b>41-52</b>
<b>Investigation of Tunneling Between the Edge States of Phosphorene Nanoribbon with Zigzag Edge</b> Mahdieh Hosseinnakhaei, Mohsen Daeimohammad, Morteza Soltani, Mina Neqabi and Gholamreza Rashedi	<b>53-64</b>
<b>Red Phosphorus Nanoparticles in the Silicon Solar Cells for Higher Cell Efficiency and Converting the Ultraviolet to Visible Light Wavelength Range</b> Saeed Salehpour	<b>65-74</b>
<b>Two-dimensional Analysis of the Bright Points Velocity in the Solar Transition Region with the Local Correlation Tracking Method</b> Ehsan Tavabi, Masoumeh Tareh and Sima Zeighami	<b>75-90</b>
<b>Designing Slow Light Waveguides Consisting of Two-dimensional Photonic Crystals and Investigating its Tunability</b> Taymaz Fathollahi – Khalkhali, Mazyar Amraei and Ali Aghamohammadi	<b>91-105</b>
<b>Topological Phase Transition of InSb and InBi Under Nonhydrostatic Lattice Expansion</b> Saba Ahmadvand and Shirin Namjoo	<b>106-121</b>
<b>The Effect of Plasma Sheath Turbulence on the Orbital Angular Momentum States of Bessel-Gaussian and Laguerre-Gaussian Beams</b> Davod Nobahar and Sirous Khorram	<b>122-134</b>
<b>Abstracts of Papers in English</b>	<b>IX-XVII</b>



<https://jap.alzahra.ac.ir>



Waves and Shock Absorption, *Proceeding of 12<sup>th</sup> International Seminar on Polymer Science and Technology*, Islamic Azad University, Tehran, 2-5 November, 2016.

- **Thesis**

- Doddapaneni V., *The Polymer-Based Nanocomposites for Electrical Switching Applications*, PhD Thesis, School of Engineering Sciences, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2017.

- **Patent**

- Chin D.A. and Irvin D.J., Actuator Device Utilizing a Conductive Polymer Gel, *US Pat. 6,685,442*, 2004.

- **Website**

- Mauritz K., Sol-gel, <http://www.psrc.usm.edu/mauritz/solgel.htm>, Available in 13 February 2005.

- **Standards**

- Standard Test Method for Solidification Point of BPA, Annual Book of ASTM Standard, **06.04**, D 4493-94, 2000.



1. The article should be provided in Farsi (Persian) and in Microsoft Word with maximum 20 A4 pages.
2. The main text of the article should be set with the B Zar font/size 12 pt.
3. The title of the article should be inserted with a Bold B Zar font/size 16 pt and the names of the authors of the article with a B Zar font/size 12 pt.
4. The English abstract should be prepared with Times New Roman font/size 12 pt.
5. The line separating is 1.5 and all pages are numbered accordingly.
6. Margins are selected 2.5cm from each side of the paper.
7. The manuscript doesn't exceed 20 pages.
8. Keywords (3 to 5 items) are provided at the ends of Persian and English abstracts.

*Figures and tables:* ensure that each figure is numbered properly and any illustration has a caption below the figure. Please, submit tables as editable text and not as images. Prepare a concise and descriptive caption for each table with a proper number above the table.

### **References**

Please, ensure that every reference, which is cited in the text, is also present in the reference list. The standard reference style of the references is described below (APA Style).

References are written at the end of the manuscript with Times New Romans Some examples are:

- **Book**

- Crano J.C. and Guglielmetti R.J., *Organic Photochromic and Thermochromic Compounds: Main Photochromic Families*, 1st ed. Kluwer Academic, Boston, **1**, 1-9, 2002.

- *Industrial Biofouling: Detection, Prevention and Control*, Walker J., Surman S. and Jass J. (Eds.), John Wiley and Sons, New York, 57-63, 2000.

- **Article**

- Keyvan Rad J., Mahdavian A.R., Salehi-Mobarakeh H., and Abdollahi A., FRET Phenomenon in Photoreversible Dual-Color Fluorescent Polymeric Nanoparticles Based on Azocarbazole/Spiropyran Derivatives, *Macromolecules*, **49**, 141-152, 2016, <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.5b02401>.

- **Proceedings**

- Khoubi-Arani Z. and Mohammadi N., Thermodynamically Controlled Assemblies of Hard/Soft Polymeric Nanoparticles for Mechanical

<https://jap.alzahra.ac.ir>





## Guide for Authors

### Ensure that the following items are present:

One author has been assigned as the corresponding author with contact details: Email address, full personal address.

All necessary files have been uploaded: the manuscript must be prepared in Microsoft office word format.

All authors' information, especially their affiliations, are provided in Persian and English.

### Ethics in publishing

IJAP subscribes to the principles of ethical publishing statements. The publication of an article in a peer-reviewed journal is a direct reflection of the quality of work of the author(s) and the institutions that support them. It is therefore important to agree upon standards of expected ethical behavior for all participants in the activity of publishing. Below you will find the major ethical policies useful for author(s).

- The manuscript should not be published elsewhere unless in the form of a short report, an abstract or a lecture.
- It must not be submitted in another journal simultaneously.
- Authors avoid submitting the accepted manuscript to another Persian scientific journal. (MSRT permits the double publication of a Persian published manuscript in another language, provided that the published paper is cited clearly and mentioned in acknowledgement.)
- Authors should disclose any conflict of interest.
- All sources of financial support for the work should be disclosed.
- Authors should ensure that they have critical contribution in the reported work and that any contribution in the manuscript have been considered properly.
- Authors are expected to consider carefully the list of authors and their order before submitting their manuscript. Any addition, deletion or rearrangement of authors' names after acceptance of the manuscript is impossible.

### Article structure

Manuscript should be prepared as described below.

#### *Language*

The manuscript should be prepared in Persian. The abstract and author name and affiliation must be written in Persian and English separately.

#### *Typesetting*





# IRANIAN JOURNAL OF APPLIED PHYSICS

Volume 14, Serial No. 38, Quarterly, Autumn 2024

**Alzahra University – Vice Chancellery for Research**

**Director in Charge: S. Shoari Nejad**, Associate Professor, Alzahra University

**Editor in Chief: A. Shafiekhani**, Professor, Alzahra University

## **Editorial Board**

**D. Dorrani**, Plasma Physics, Professor, Islamic Azad University

**M. Fattahi**, Geophysics, Associate Professor, Tehran University

**T. Kakavand**, Nuclear Physics, Professor, Imam Khomeini International University

**E. Mohajerani**, Physics of Photonic, Professor, Shahid Beheshti University

**A. Morteza Ali**, Condensed Matter Physics, Professor, Alzahra University

**M.R. Rohani**, Plasma physics, Associate Professor, Alzahra University

**Shafiekhahni**, Nanophysics, Professor, Alzahra University

**F. Shahshahani**, Physics of Laser, Associate Professor, Alzahra University

**F. Shojaei Baghini**, Gravitational Physics, Professor, Tehran University

**T. Vazifehshenas**, Condensed Matter Physics, Associate Professor, Shahid Beheshti University

Publisher: **Alzahra University – Vice Chancellery for Research**

Executive Director: **M. Amirykhah**

Editor: **F. Rostamian**

Page Designer: **M. Amirykhah**

Publication Frequency: **Quarterly**

**Address:** Alzahra University - Vice Chancellery for Research, Vanak, Tehran, Iran.  
1993893973

**Email:** [aujap@alzahra.ac.ir](mailto:aujap@alzahra.ac.ir)

E-ISSN 2783-1051

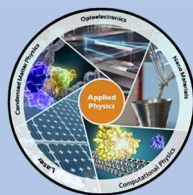
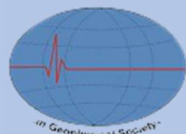
In the Name of God



**Alzahra University**

# **Iranian Journal of Applied Physics**

**Autumn 2024, Vol 14, Number 38**



# IRANIAN JOURNAL OF APPLIED PHYSICS

Volume 14/ Serial No. 38/ Quarterly/ Autumn 2024

<b>A Numerical Generation of Gaussian and Non-Gaussian Isotropic/Anisotropic Rough Surfaces</b> Zhaleh Ebrahimienejad	7-20
<b>Determining Trace Elements in Agricultural Products of Chogha Village of Arak, Iran</b> Reza Pour Imani, Mohammad Hossien Choopan Dastjerdi, Saeed Ghahani and Marziyeh Mashayekhi	21-40
<b>Design and Construction of a Plasma Generation Device Using the Surface Dielectric Barrier Discharge (SDBD) Method in a Laboratory Scale</b> Ameneh Kargarian, Soolmaz Jamali and Mehdi Bakhshzad Mahmoudi	41-52
<b>Investigation of Tunneling Between the Edge States of Phosphorene Nanoribbon with Zigzag Edge</b> Mahdiah Hosseinnakhaei, Mohsen Daeimohammad, Morteza Soltani, Mina Neqabi and Gholamreza Rashedi	53-64
<b>Red Phosphorus Nanoparticles in the Silicon Solar Cells for Higher Cell Efficiency and Converting the Ultraviolet to Visible Light Wavelength Range</b> Saeed Salehpour	65-74
<b>Two-dimensional Analysis of the Bright Points Velocity in the Solar Transition Region with the Local Correlation Tracking Method</b> Ehsan Tavabi, Masoumeh Tareh and Sima Zeighami	75-90
<b>Designing Slow Light Waveguides Consisting of Two-dimensional Photonic Crystals and Investigating its Tunability</b> Taymaz Fathollahi – Khalkhali, Mazyar Amraei and Ali Aghamohammadi	91-105
<b>Topological Phase Transition of InSb and InBi Under Nonhydrostatic Lattice Expansion</b> Saba Ahmadvand and Shirin Namjoo	106-121
<b>The Effect of Plasma Sheath Turbulence on the Orbital Angular Momentum States of Bessel-Gaussian and Laguerre-Gaussian Beams</b> Davod Nobahar and Sirous Khorram	122-134
<b>Abstracts of Papers in English</b>	IX-XVII