



بسم الله الرحمن الرحيم

بررسی وضعیت بوروفین در ایران و دنیا

فرصتی برای تحقق مرجعیت علمی

پاییز ۱۴۰۴

فهرست مطالب	۲
۱- خلاصه مدیریتی	۳
۲- معرفی و دلیل اهمیت بوروفین	۴
۱-۲- اهمیت مواد دوبعدی در بین حوزه‌های نوظهور و آینده‌ساز	۴
۲-۲- ساختار بوروفین	۴
۲-۳- جایگاه و اهمیت بوروفین در خانواده مواد دوبعدی	۵
۳- تاریخچه و روند رشد فعالیت‌ها در حوزه بوروفین	۷
۳-۱- دوران شروع (دهه ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵)	۷
۳-۲- نقطه عطف و شروع فعالیت‌های تجربی (از سال ۲۰۱۵)	۸
۳-۳- تحلیل نویسندگان برتر	۱۰
۳-۴- جایگاه ایران در حوزه مقالات	۱۱
۳-۵- برترین محققان ایرانی در حوزه بوروفین	۱۳
۳-۶- نمونه فعالیت‌های شاخص در کشور	۱۴
۴- بررسی احتمال اخذ جایزه نوبل در آینده	۱۸
۴-۱- تحلیل الگوی نوبل‌های مرتبط با مواد	۱۸
۴-۲- تطبیق الگو با بوروفین	۱۹
۵- پیشنهاد‌های سیاستی	۲۱
۶- جمع‌بندی	۲۶

۱- خلاصه مدیریتی

مرجعیت علمی و فناوری ایران در بین کشورهای مختلف جهان، همواره مورد توجه و دستورات مسئولان از جمله مقام معظم رهبری (مدظله العالی) بوده که از آن جمله می‌توان به «سیاست‌های کلی علم و فناوری ابلاغی مقام معظم رهبری» در شهریور سال ۱۳۹۳ اشاره کرد که در آن به‌صراحت بر «جهاد مستمر علمی با هدف کسب مرجعیت علمی و فناوری در جهان» تأکید شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که **بوروفین** به‌عنوان یک ماده نوظهور دوبعدی، پتانسیل بالایی برای ایجاد مرجعیت علمی و فناوری ملی و بین‌المللی دارد. این ماده می‌تواند با ویژگی‌های منحصر به فرد خود، امکان توسعه دستگاه‌ها و سیستم‌های پیشرفته، به خصوص در حوزه الکترونیک و اپتوالکترونیک مانند حسگرها، آشکارسازها، باتری‌ها، خازن‌ها، محصولات کوانتومی و حتی دیگر صنایع را فراهم کرده و بستر پروژه‌های تحقیقاتی و صنعتی پیشرفته را ایجاد کند.

از طرفی فعالیت‌های علمی و پژوهشی انجام شده تاکنون، نشان‌دهنده پیشرفت‌های ملموس و ظرفیت کشور در تولید دانش بومی در سطح جهانی است. لذا حمایت از فعالیت‌های انجام شده در کشور با همکاری دیگر گروه‌های تحقیقاتی داخل و خارج کشور می‌تواند موجب تثبیت موقعیت کشور در حوزه نوآوری، جذب سرمایه خارجی و در نهایت باعث ایجاد اعتبار بین‌المللی برای کشور و حتی مرجعیت علمی در این زمینه شود.

۲- معرفی و دلیل اهمیت بوروفین

۲-۱- اهمیت مواد دوبعدی در بین حوزه‌های نوظهور و آینده‌ساز

زمانی که یک نوآوری یا یک کشف علمی جدید در دنیا مطرح می‌شود بسته به اهمیت آن موضوع، توجهات مراکز مختلف به آن جلب خواهد شد. معرفی یک فناوری نوظهور، فرصت‌ها و تهدیدهایی را در پی خواهد داشت. بدترین حالت برای سازمان‌های پیشرو، غفلت از یک فناوری نوظهور است. در مقابل نیز ممکن است برخی از سازمان‌ها نتوانند یک ارزیابی درست از آن فناوری داشته و با اقدامات عجولانه و گمراه تحت تاثیر رسانه‌ها، متضرر شوند. اقدام هوشمندانه آن است که بتوان به موقع یک فناوری را شناسایی و برنامه‌های متناسب با آن را اتخاذ کرد. با علم به این موضوع، هدف از رصد فناوری را می‌توان ورود هوشمندانه به حوزه‌های نوظهور و آینده‌ساز دانست.

به منظور یک فعالیت منسجم و ساختارمند و با هدف هوشمندی در ورود به حوزه‌های نوظهور و آینده‌ساز، فرآیند رصد فناوری شامل مراحل شناسایی، ارزیابی و انتخاب از سال ۱۴۰۰ در ستاد توسعه فناوری‌های نانو و میکرو شروع شد. به همین منظور، حوزه‌های نوظهور و آینده‌ساز از چند منبع مهم شامل بیش از ۱۰ نهاد آینده‌پژوهی، ۱۰ نهاد توسعه فناوری از کشورهای مختلف، ۲ کتاب آینده‌پژوهی و همچنین بیش از ۱۴۰۰ کسب‌وکار نوپا و شرکت فعال در حوزه نانو بررسی و منجر به شناسایی ۳۰۰ حوزه مهم شد. سپس با استفاده از آنالیز ابر کلمات، ادبیات کلان روند و همچنین ارتباط با نانو تعداد حوزه‌ها کاهش و نهایتاً با تعیین ماتریس اولویت گارتر، ۸ حوزه برتر و همگرا با فناوری نانو انتخاب شدند که یکی از آن‌ها «مواد دوبعدی» است که دارای ارتباط مستقیم و بیشترین همگرایی با فناوری نانو می‌باشد.^۱

از جمله مراکزی که این مواد را به عنوان یکی از حوزه‌های نوظهور و آینده‌ساز معرفی کردند می‌توان به مجمع جهانی اقتصاد، موسسه علم و فناوری ناتو، موسسه لوکس، موسسه مکنزی و کتاب ۲۰ تغییر بزرگ تکنولوژی تا سال ۲۰۵۰ اشاره کرد. بنابراین در قدم اول، اهمیت جایگاه بوروفین به عنوان یک ماده نوظهور در خانواده مواد دوبعدی است که این خانواده به صورت کلان مورد توجه و نظر مثبت مراکز آینده‌پژوهی قرار گرفته است. همچنین مرور مقالات نشان می‌دهد که بوروفین به عنوان یکی از سه ماده دوبعدی نوظهور مهم (شامل مکسین و فسفورین و به عنوان جدیدترین آن‌ها)، مورد توجه قرار گرفته و دارای جایگاه خاصی است که در ادامه بیشتر بدان پرداخته شده است.^۲

۲-۲- ساختار بوروفین

بوروفین، ساختار دوبعدی متشکل از اتم‌های بور (عکس زیر)، یکی از نوآورانه‌ترین مواد برای نسل آینده دستگاه‌های الکترونیکی محسوب می‌شود.^۳ برخلاف بور بالک که خاصیت عایقی دارد، بوروفین‌ها رسانایی فلزی قابل توجهی از خود نشان می‌دهند.^۴ با توجه به انرژی آزاد بالاتر نسبت به بور بالک، ساخت بوروفین دو بعدی همواره چالش‌هایی داشته است.^۵ مطالعات پیشین با استفاده از رشد

¹ https://nanomeghyas.ir/article_721458.html

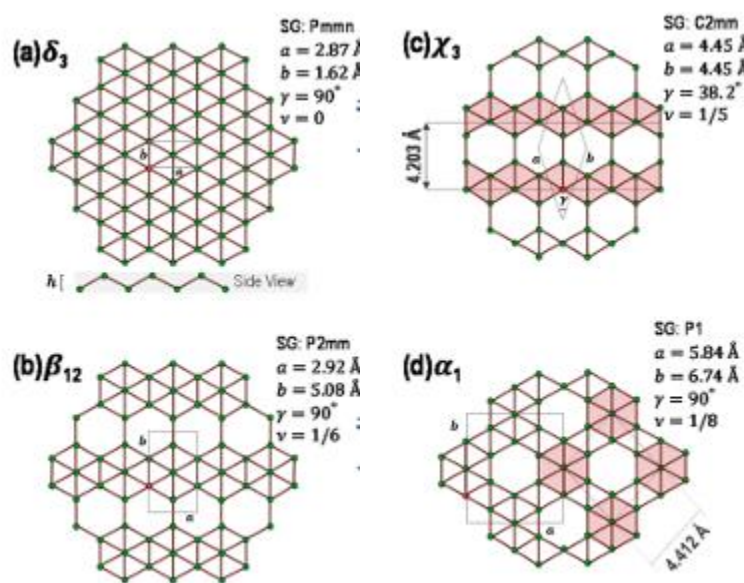
² DOI: 10.1038/nnano.2016.213, DOI: 10.1039/D0CS00794A, DOI: 10.3389/fchem.2020.00462, DOI: 10.1021/acsnano.5b05853

³ <https://doi.org/10.1039/C7CS00261K>

⁴ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.096401>

⁵ <https://doi.org/10.1002/anie.201505425>

اپیتاکسی مولکولی، علاقه‌مندی گسترده‌ای به کاربردهای بالقوه بوروفین‌ها ایجاد کرده‌اند^۶، اما نبود روش‌های رشد ساده، تحقیقات تجربی را محدود کرده است.^۷



شکل ۱ - ساختارهای مختلف بوروفین

۲-۳ جایگاه و اهمیت بوروفین در خانواده مواد دوبعدی

اهمیت بوروفین به‌عنوان یک ماده دوبعدی نوظهور از ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن در رسانایی، انعطاف‌پذیری و قابلیت‌های سطحی ناشی می‌شود. برخلاف گرافین که ساختار شش‌ضلعی متقارن دارد، بوروفین دارای ساختارهای چندفازی با ناهمسانگردی الکترونی است که امکان مهندسی خواص را در سطحی فراتر از گرافین فراهم می‌سازد. این ساختار باعث ایجاد ویژگی‌های متمایزی از این ماده به خصوص در مقایسه با گرافین می‌شود که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

- عدد اتمی بور (۵) کمتر از کربن (۶) است و این تفاوت باعث می‌شود شبکه بوروفین دارای الکترون‌های π ناقص باشد. این ویژگی، حساسیت بالای ماده به تغییرات محیطی و امکان تعامل با یون‌ها و مواد دیگر را افزایش می‌دهد، که برای حسگرهای پیشرفته و ذخیره انرژی بسیار مهم است.
- برخلاف گرافین که رسانای همسانگرد است، بوروفین به دلیل ساختار الکترونی خاص، دارای رسانندگی غیرهمسانگرد است^۸؛ این ویژگی امکان طراحی ترانزیستورها، حسگرها و قطعات الکترونیکی با منحصر بفرد را فراهم می‌کند.
- چگالی بار سطحی بالاتر، ظرفیت ذخیره‌سازی یون تا ۸ برابر گرافین، و رفتار اهمی پایدار تحت کرنش‌های مکانیکی، بوروفین را برای کاربردهایی مانند ابرخازن‌ها، باتری‌ها، و ادوات الکتروشیمیایی بسیار مناسب کرده است.^۹

⁶ <https://doi.org/10.1038/nchem.2491>

⁷ <https://doi.org/10.1021/acsami.0c22580>

⁸ <https://doi.org/10.1039/C9CP05597E>

⁹ <https://doi.org/10.1021/acsmaterialslett.2c00475>

- مدول یانگ (شاخص سختی مکانیکی) آن بسیار بالا و نسبت استحکام به وزن آن در مقایسه با گرافین بسیار بالا است. در نتیجه از منظر پایداری مکانیکی، شبکه بوروفین بسیار مقاوم و محکم است و دانشمندان بر این باور هستند که جایگزین مناسبی برای گرافین در کاربردهای مکانیکی و مواد است.
- بوروفین به دلیل ساختار ناهمسانگرد و پاسخ دی الکتریک قابل کنترل، در ساخت ادوات نوری مانند آشکارسازهای نوری، فتوولتائیک ها و فیلترهای نانومقیاس عملکرد بهتری نسبت به گرافین دارد.
- برخی فازهای بوروفین دارای نقاط دیراک با پاشندگی خطی هستند، مشابه گرافین، اما با قابلیت تنظیم موقعیت این نقاط نسبت به تراز فرمی. این ویژگی امکان طراحی ادوات کوانتومی و نانوالکترونیکی با کنترل دقیق بر خواص الکترونی را فراهم می‌سازد^{۱۰}.

علاوه بر خواص قابل ملاحظه بوروفین نسبت به گرافین، محاسبات عددی و اندک پژوهش‌های تجربی نشان می‌دهد که بوروفین با دو ماده دوبعدی نوظهور دیگر یعنی مکسین و فسفورین نیز کاملاً قابل مقایسه است که برتری بوروفین در اغلب موارد کاملاً در جدول زیر مشهود است^{۱۱}.

جدول ۱- مقایسه بین مهم‌ترین مواد دوبعدی نوظهور

ویژگی	Borophene	MXene	Phosphorene
رسانایی الکتریکی	بسیار بالا	بالا ولی معمولاً کمتر از بوروفین، بسته به فلز والد	نیمه‌رسانا با باندگپ $\approx 1-2\text{ eV}$
پایداری شیمیایی	ضعیف‌تر، بسیار واکنش‌پذیر به اکسیژن و رطوبت	بالا، به‌ویژه پس از پوشش سطحی (termination)	متوسط؛ اکسیداسیون در هوا در دمای اتاق
خواص مکانیکی	مدول یانگ بالاتر از گرافین؛ استحکام کششی زیاد	بالا اما کمتر از بوروفین	پایین‌تر و شکننده‌تر
انعطاف‌پذیری و فرم‌پذیری	بالا، مناسب برای لایه‌های انعطاف‌پذیر	خوب	محدودتر
کاربردهای انرژی	در الکترودهای Li-ion و سوپرجاذب‌ها بسیار مؤثر	بسیار قوی در باتری و ابرخازن‌ها	بیشتر در ترانزیستورهای نوری و حسگرها
ساختار الکترونیکی	رفتار فلزی با Dirac cones و خاصیت کوانتومی ویژه	فلزی تا نیمه‌فلزی	نیمه‌رسانا با باند مستقیم

¹⁰ <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.118.096401>

¹¹ DOI: 10.1039/D0CS00794A, DOI: 10.3389/fchem.2020.00462, DOI: 10.1021/acsnano.5b05853

با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد اشاره شده و خواص قابل مقایسه با دیگر مواد، این ماده دوبعدی به یک ماده نوظهور و آینده‌ساز تبدیل شده که حول این مفهوم و مفاهیم مشابه مانند برافکن^{۱۲}، غیر منتظره^{۱۳} و تحول‌آفرین^{۱۴} در مقالات مختلف^{۱۵} و حتی مراکز آینده پژوهی از جمله PreScouter بحث شده است^{۱۶}. این موسسه یک شرکت آمریکایی در حوزه مشاوره نوآوری و هوش پژوهشی^{۱۷} است که در سال ۲۰۱۰ توسط گروهی از فارغ‌التحصیلان دانشگاه نورث‌ورثن^{۱۸} در ایالت ایلینوی آمریکا تأسیس شد. دفتر مرکزی شرکت در شیکاگو قرار دارد، بیش از ۵۰۰ کارمند تمام‌وقت و بیش از ۴۰۰۰ پژوهشگر متخصص از سراسر جهان در شبکه‌ی آن فعالیت دارند و مشتریان آن شامل شرکت‌های بین‌المللی مانند GE Healthcare, BAE Systems, Coca-Cola, Whirlpool و Volvo هستند. این موسسه از سال ۲۰۱۴ به انتشار گزارش‌هایی مشهور مانند *“Nine Disruptive Technologies Changing the World”* و تحلیل آینده‌ی مواد چون گرافین و بوروفین پرداخته است. این گزارش‌ها در رسانه‌ها و مجلات صنعتی به‌عنوان مرجع ارزیابی فناوری‌های آینده‌ساز مورد استفاده قرار می‌گیرند، و جایگاه PreScouter را میان مؤسسات پیش‌بینی فناوری^{۱۹} تثبیت کرده‌اند. در نتیجه، این موسسه ترکیبی از یک شرکت مشاوره استراتژیک فناورانه و یک نهاد پژوهشی بین‌المللی است که با شبکه‌ای از متخصصان دانشگاهی و صنعتی همکاری می‌کند تا شرکت‌ها را در شناسایی، ارزیابی و بهره‌گیری از فناوری‌های تحول‌آفرین یاری دهد.

در مقاله‌ای که این موسسه در سال ۲۰۲۴ با موضوع « فراتر از گرافین: آیا بوروفن ماده شگفت‌انگیز بعدی برای راه‌حل‌های انرژی است؟»، به ابعاد مختلف و مقایسه بوروفین با دیگر مواد پرداخته شده و به دلائلی که قبلاً نیز اشاره شد از جمله رسانایی الکتریکی و جهت‌دار، استحکام بالا نسبت به وزن، قابلیت ابررسانایی با هدف کاربرد در محاسبات کوانتومی و همچنین کاربرد بی‌رقیب در باتری لیتیوم-یون، بوروفین در نهایت به عنوان ماده آینده‌ساز شناخته شده است. در رابطه با ویژگی آخر لازم به ذکر است که محاسبات تئوری نشان داده‌اند بوروفین می‌تواند ظرفیت باتری لیتیوم-یون را تا ۵۲۶۸ میلی‌آمپر ساعت بر گرم رسانده که بالاترین ظرفیت نظری در بین تمامی مواد است.

۳- تاریخچه و روند رشد فعالیت‌ها در حوزه بوروفین

۳-۱- دوران شروع (دهه ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵)

مفهوم بوروفین از مطالعات محاسباتی آغاز شد که نشان داد خوشه‌های کوچک بور می‌توانند ساختارهای شبه‌صفحه‌ای پایدار تشکیل دهند، بر خلاف ساختارهای معمول بور مانند فولرن‌ها یا نانولوله‌ها^{۲۰}. این یافته‌ها منجر به پیش‌بینی مدل‌هایی از ورق‌های بوروفین، بوروسفرن و نانولوله‌های بورین شد^{۲۱}. تحقیقات نظری انواع متفاوتی از آلوتروپ‌های بوروفین مانند ساختارهای مثلثی برجسته، ساختارهای هگزاگونی و ترکیبی مثلثی و هگزاگونی را با ویژگی‌های فلزی و تنوع ساختاری بالا پیش‌بینی کردند. همزمان، روش‌های

¹² disruptive

¹³ breakthrough

¹⁴ revolutionary

¹⁵ doi:10.1016/j.progsolidstchem.2023.100416, doi:10.1002/sml.202006891

¹⁶ <https://www.prescouter.com/2024/06/borophene-next-wonder-material>

¹⁷ Innovation & Research Intelligence Consulting

¹⁸ Northwestern University

¹⁹ Tech Foresight

²⁰ https://doi.org/10.1007/978-3-030-49999-0_2

²¹ DOI: 10.1038/srep45516

مختلف سنتز بور نیز بررسی شد و مطالعات پایداری ترمودینامیکی انجام شد تا شرایط مناسب برای تولید ماده تعیین شود.^{۲۲} در سال ۲۰۱۵، این تحقیقات به نتیجه رسید و پیش‌بینی تئوری بوروفین به صورت کامل و با محاسبات عددی ارائه شد.^{۲۳}

۳-۲- نقطه عطف و شروع فعالیت‌های تجربی (از سال ۲۰۱۵)

سال ۲۰۱۵ نقطه عطفی در تاریخچه بوروفین بود، زیرا دو گروه تحقیقاتی مستقل شامل دانشگاه براون^{۲۴} به سرپرستی مانهاتان و همکاران و همچنین دانشگاه ایالت پنسیلوانیا^{۲۵} موفق به سنتز ورق‌های بوروفین روی زیرلایه نقره (Ag)(۱۱۱)) شدند. این سنتز با استفاده از روش «اپیتاکسی مولکولی در خلأ بالا»^{۲۶} انجام شد که در آن اتم‌های بور به آرامی بر روی سطح نقره رسوب داده شدند. این دو گروه توانستند ساختارهای متفاوت بوروفین، مخصوصاً دو فاز شاخص β_{12} و χ_3 را مشاهده کنند که با پیش‌بینی‌های نظری قبلی تطابق داشتند. پس از سنتز، پژوهشگران با استفاده از میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی^{۲۷} و طیف‌سنجی انرژی اتمی^{۲۸}، شبکه بوروفین را مشخصه‌یابی کردند. این بررسی‌ها نشان داد که ماده نه تنها از نظر ساختاری پایدار است، بلکه خواص الکترونی قابل انتظار از پیش‌بینی‌های تئوری را دارد. این موفقیت، نقطه عطفی در تاریخچه بوروفین محسوب می‌شود، زیرا پیش‌بینی‌های تئوری سال ۲۰۱۴ به اثبات تجربی رسید و مسیر توسعه تیپ‌های نانویی، لایه‌ای و کامپوزیتی و ورود به کاربردهای صنعتی هموار شد. بررسی روند مقالات منتشرشده در حوزه بوروفین^{۲۹} (شکل ۲) نشان می‌دهد که فعالیت تجربی در سال ۲۰۱۵ موجب تحریک فعالیت‌های علمی از این سال به بعد شد. به طوری که تعداد مقالات منتشرشده از ۳ عدد در سال ۲۰۱۵ به ۴۰ عدد در سال ۲۰۱۶ رسیده و از آن زمان تاکنون با یک سیر صعودی به مجموع ۱۵۴۰ مقاله رسیده است. همچنین ۸۲٪ فعالیت‌های حول بوروفین به صورت پژوهشی و حدود ۹٫۵٪ نیز مروری بوده است (شکل ۳).

²² <https://doi.org/10.1002/anie.201505425>

²³ DOI: 10.1126/science.aad1080

²⁴ Brown University

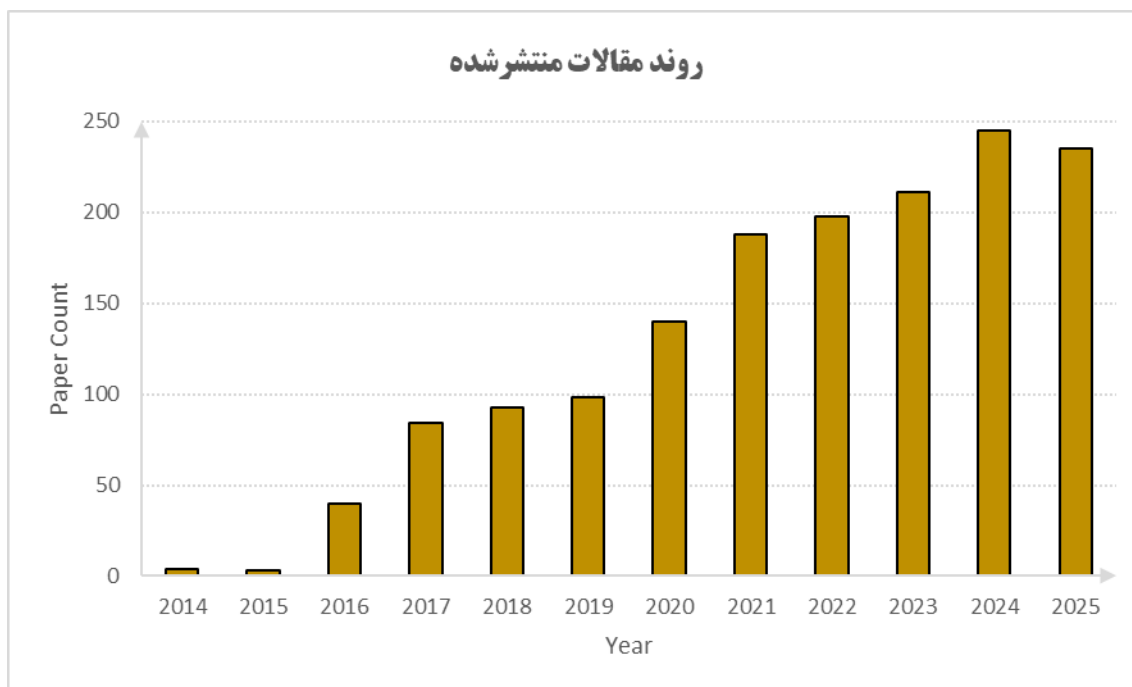
²⁵ Pennsylvania State University

²⁶ Molecular Beam Epitaxy - MBE

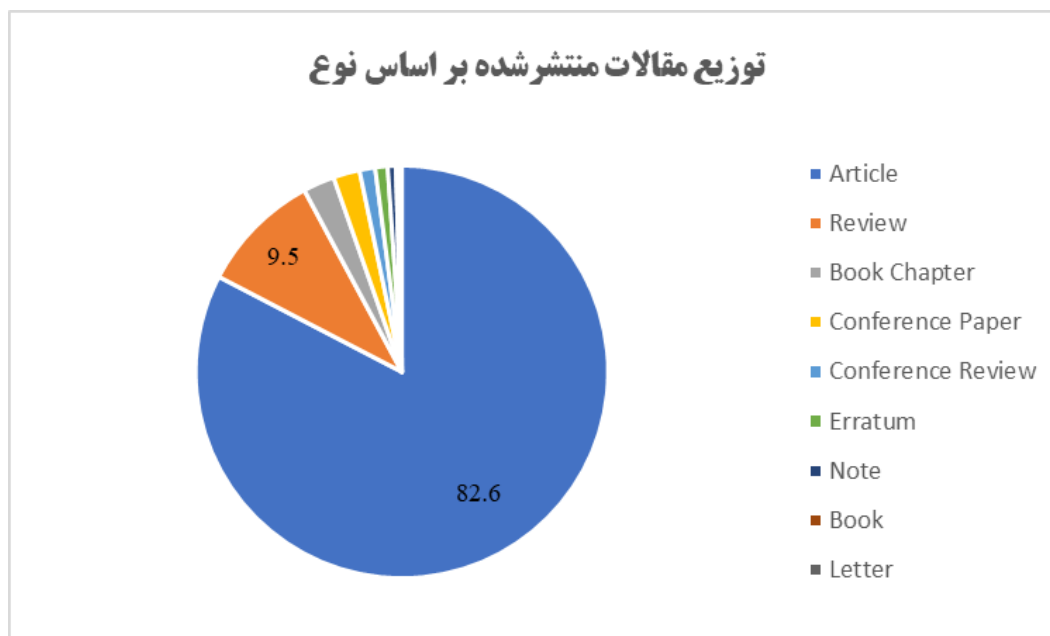
²⁷ STM

²⁸ XPS

²⁹ جهت پایش مقالات، واژه borophene در عنوان، کلیدواژه و همچنین چکیده مقالات در پایگاه داده اسکوپوس جستجو شده و آنالیزهای مختلف حاصل از استخراج مقالات آورده شده است.



شکل ۲ - روند انتشار مقالات مرتبط با بوروفین از تولد تا کنون



شکل ۳ - توزیع انتشارات مرتبط با بوروفین بر اساس نوع (بر حسب درصد)

از سال ۲۰۱۵ به بعد، مطالعات متعددی بر روی خواص الکترونیکی، مکانیکی و شیمیایی بوروفین، کارایی آن در ذخیره‌سازی انرژی، حسگرهای گازی، و ادوات اپتوالکترونیک انجام شده‌اند^{۳۰}. با این حال، اکثر این مطالعات مبتنی بر شبیه‌سازی‌های نظری بوده‌اند و تا سال ۲۰۲۱ میلادی هیچ نمونه تجربی عملیاتی از بوروفین در قالب یک محصول واقعی، حتی در مقیاس آزمایشگاهی، گزارش نشده

³⁰ DOI: 10.1038/s41565-018-0157-4 , DOI: 10.1002/adfm.201904349, DOI: 10.1021/acsami.6b05747, DOI: 10.1021/acsami.7b03676

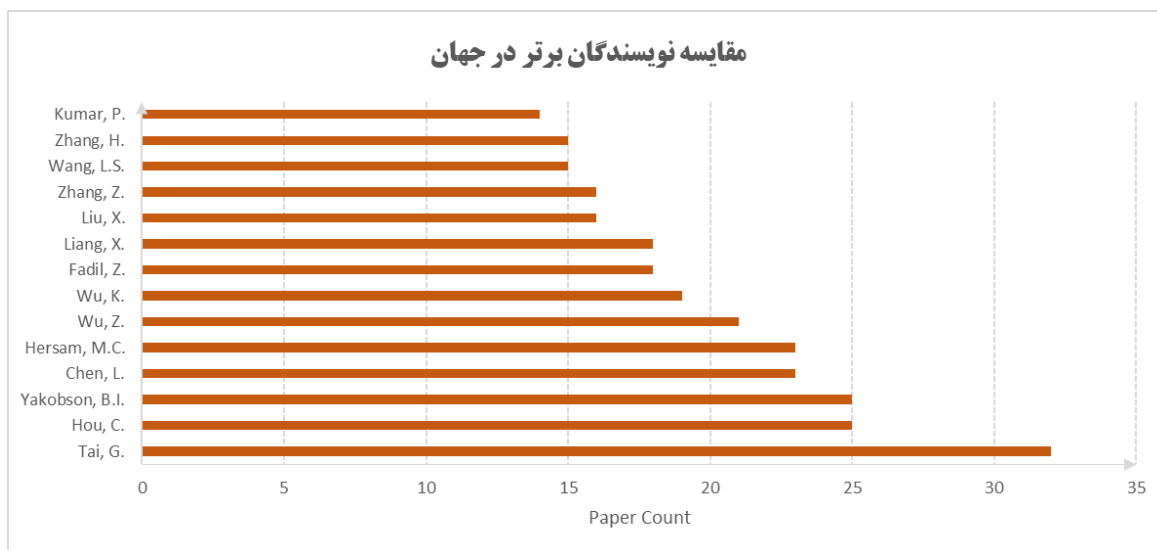
بود. دلیل اصلی این محدودیت، وابستگی روش‌های سنتز اولیه بر پایه اپیتاکسی مولکولی بود که وابسته به زیرلایه فلزی است، که مانع جداسازی بوروفین و انتقال آن به بسترهای عایق برای استفاده در ادوات کاربردی می‌شود. به صورت خلاصه مهم‌ترین فعالیت‌های صورت گرفته که در نشریات نیچر و ساینس تا سال ۲۰۲۵ به چاپ رسیده‌اند در جدول زیر آورده شده‌اند.

جدول ۲ - فهرست و مشخصات مهم‌ترین مقالات در حوزه بوروفین

نواوری و دلیل اهمیت	نوع فعالیت	سال	عنوان مقاله	نشریه
برای اولین بار بوروفین با ساختار شبه گرافین روی بستر فلزی سنتز شد	تجربی	2015	<i>Synthesis of borophenes: Anisotropic, two-dimensional boron polymorphs</i>	Science
برای اولین بار دو پلی مورف بوروفین با ساختار متفاوت از گرافین سنتز شد	تجربی	2016	<i>Experimental realization of two-dimensional boron sheets</i>	Nature Chemistry
مروری بر پیشرفت‌ها و چالش‌های تولید بوروفین	مروری	2018	<i>Borophene as a prototype for synthetic 2D materials development</i>	Nature Nanotechnology
برای اولین بار ورقه‌های تک‌بلوری بزرگ (تا صدها نانومتر تا میکرومتر) از بوروفین روی فلز رشد داده شد	تجربی	2018	<i>Large-area single-crystal sheets of borophene on Cu(111) surfaces</i>	Nature Nanotechnology
برای نخستین بار موفق به سنتز بوروفین دوتایی (bilayer) شدند	تجربی	2021	<i>Borophene synthesis beyond the single-atomic-layer limit</i>	Nature Materials
نشان دادند که می‌توان ساختارهای پایدار bilayer با نظم بلوری به دست آورد	تجربی	2022	<i>Synthesis of bilayer borophene</i>	Nature Chemistry
به‌روزرسانی منابع و تمرکز بر چالش‌های عملیاتی	مروری	2025	<i>Progress and future directions in borophene research</i>	Nature

۳-۳- تحلیل نویسندگان برتر

در شکل زیر، مقایسه بین تعداد مقالات نویسندگان برتر این حوزه مشخص شده است.



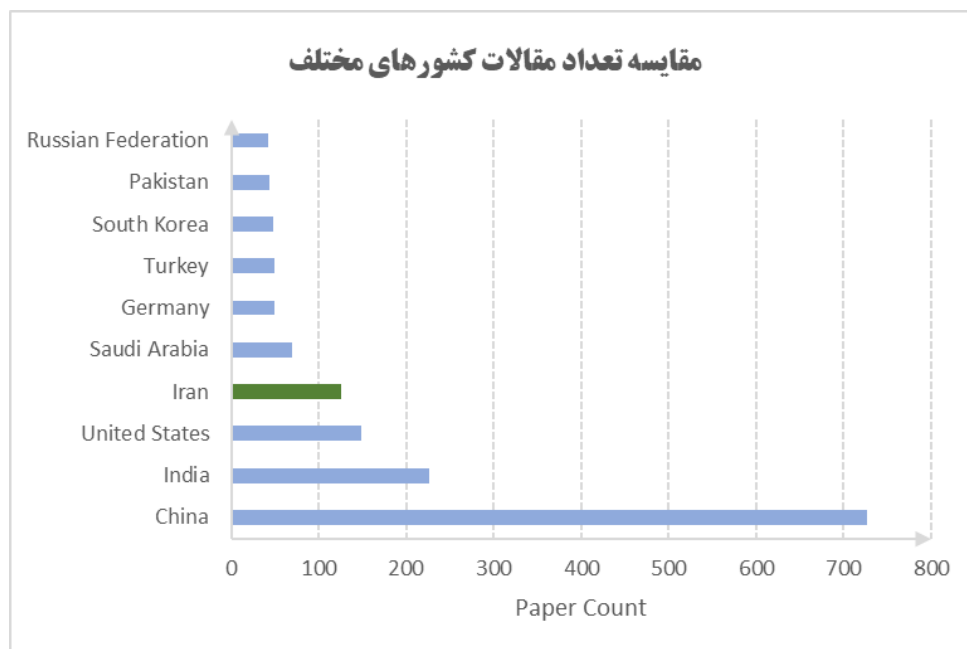
شکل ۴ - نویسندگان برتر تولیدکننده مقاله در حوزه بوروفین

با توجه به شکل ۴ مشخص است که دانشمند چینی به نام Tai, G که در دانشگاه هوانوردی و فضانوردی نانجینگ^{۳۱} فعالیت دارد، بیشترین آمار مقالات را با ۳۲ عدد به خود اختصاص داده و اختلاف قابل توجهی با دیگر افراد دارد. بررسی مقالات نشان داد که ایشان فقط در سال ۲۰۲۳، ۸ مقاله منتشر شده در حوزه بوروفین دارد که قابل توجه است. به طور متوسط نیز می‌توان گفت که ایشان از سال ۲۰۱۷ که اولین مقاله خود را در زمینه بوروفین منتشر کرده تا به امروز، به طور متوسط سالی ۴ عدد مقاله به چاپ رسانده‌اند. همچنین نفر دوم تا پنجم نیز به طور متوسط از زمان فعالیت به ترتیب سالی ۳،۵، ۲،۵، ۲،۵ و ۲ مقاله چاپ کرده‌اند.

۴-۳- جایگاه ایران در حوزه مقالات

جهت بررسی جایگاه ایران در این حوزه نوظهور، تعداد مقالات منتشر شده برای ۱۰ کشور برتر در شکل ۵ نمایش داده شده است.

³¹ Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (NUAA)



شکل ۵ - کشورهای برتر صاحب مقالات در حوزه بوروفین

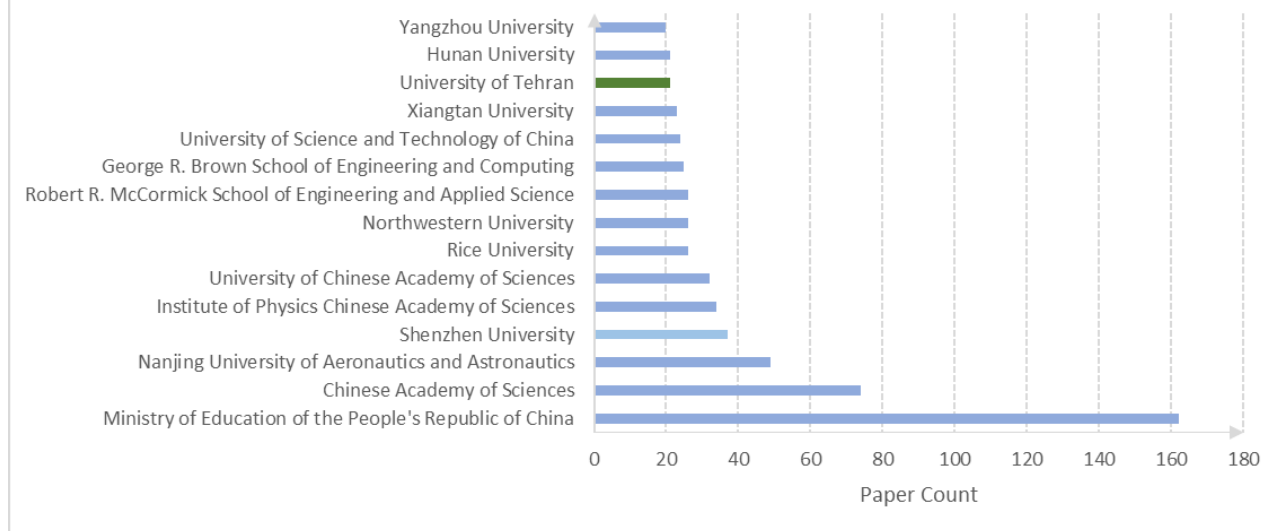
همانطور که از این شکل ملاحظه می‌شود، کشور چین با سهم حدود ۴۰٪ از کل مقالات، بیشترین آمار را به خود اختصاص داده و با اختلاف قابل توجه نسبت به دیگر کشورها در جایگاه نخست قرار دارد. پس از چین، کشورهای هند، آمریکا و ایران در رتبه‌های بعدی هستند. بنابراین در نگاه اول جایگاه ایران بسیار مناسب و با ۱۲۵ مقاله، چشمگیر است.

علاوه بر جایگاه دوم کشور هند، حضور عربستان سعودی، ترکیه و پاکستان و عدم حضور کشورهایی مانند ژاپن در بین ۱۰ کشور اول نیز قابل توجه است که این موضوع نیاز به تحلیل دقیق‌تری دارد.

تحلیل کلمات کلیدی نشان داد که کلمات مرتبط با فعالیت‌های عددی نظیر DFT, first-principles, molecular dynamics به مراتب بیشتر از کلمات مرتبط با روش‌های تجربی است به طوری که با تخمین بسیار خوبی می‌توان گفت حدود ۷۵٪ از مقالات به صورت عددی و ۲۵٪ تجربی بوده است. در نتیجه غالب فعالیت‌های انجام شده حول بوروفین تاکنون به صورت عددی بوده است. از آنجایی که در مقایسه با آزمایش‌های گران‌قیمت سنتز و شناسایی، تحقیقات نظری (کامپیوتری) در کشورهای در حال توسعه به خصوص آسیایی مانند ایران و هند دسترس پذیرتر است، در نتیجه جایگاه کشورهای آسیایی در این مقطع زمانی می‌تواند به این علت باشد.

همچنین مقایسه بین ۱۵ مرکز برتر در انتشارات مقالات، در شکل زیر آورده شده است.

مراکز برتر در زمینه انتشار مقاله



شکل ۶ - مراکز برتر تولیدکننده مقاله در حوزه بوروفین

با توجه به شکل مشخص است که اولاً ۶ جایگاه اول متعلق به کشور چین است و فعال‌ترین موسسه آمریکایی، دانشگاه Rice و Northwestern هستند که با ۲۶ مقاله در جایگاه هفتم و هشتم قرار دارند. همچنین دانشگاه تهران با ۲۱ مقاله در رتبه ۱۳ ام قرار دارد که کاملاً مناسب است.

با توجه به اینکه هر دو شکل فوق، کشور ایران و همچنین دانشگاه تهران از وضعیت بسیار مطلوبی نسبت به سایر کشورها و موسسات قرار دارند، مقالات متعلق به ایران به صورت دقیق‌تری بررسی شد و نتایج نشان داد که بخش کمی از آثار ایران تجربی بوده و اکثر فعالیت‌ها عددی هستند که این موضوع در بخش بعد بیشتر توضیح داده شده است.

۳-۵- برترین محققان ایرانی در حوزه بوروفین

همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، هیچ پژوهشگر ایرانی در میان ۱۵ نویسنده برتر جهان حضور ندارد. براساس شکل ۷، جایگاه نخست برترین نویسندگان ایرانی در حوزه بوروفین با ۹ مقاله به آقای دکتر عبدی^{۳۲} تعلق می‌گیرد و جایگاه دوم تا پنجم به خانم دکتر سحر ایزدی^{۳۳} با ۸ مقاله، آقای دکتر حوری^{۳۴} با ۷ مقاله، خانم دکتر طیبه مولاروی^{۳۵} با ۷ مقاله، آقای دکتر فرهاد ستاری^{۳۶} با ۷ مقاله و دکتر جعفری^{۳۷} با ۷ مقاله و اختصاص یافته است.

^{۳۲} دانشکده فیزیک دانشگاه تهران

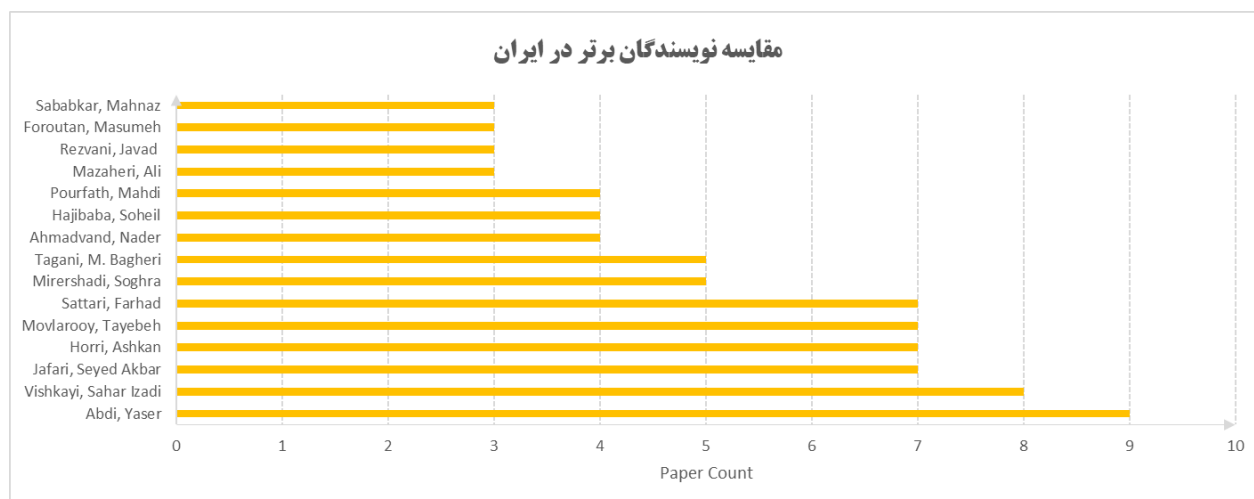
^{۳۳} موسسه تحقیقات بنیادی

^{۳۴} دانشگاه آزاد اسلامی-اراک

^{۳۵} دانشگاه صنعتی شاهرود

^{۳۶} دانشگاه محقق اردبیلی

^{۳۷} دارای سه وابستگی علمی شامل دانشگاه اخن، کنت و صنعتی شریف.



شکل ۷ - نویسندگان برتر ایرانی در حوزه بوروفین

۳-۶- نمونه فعالیت‌های شاخص در کشور

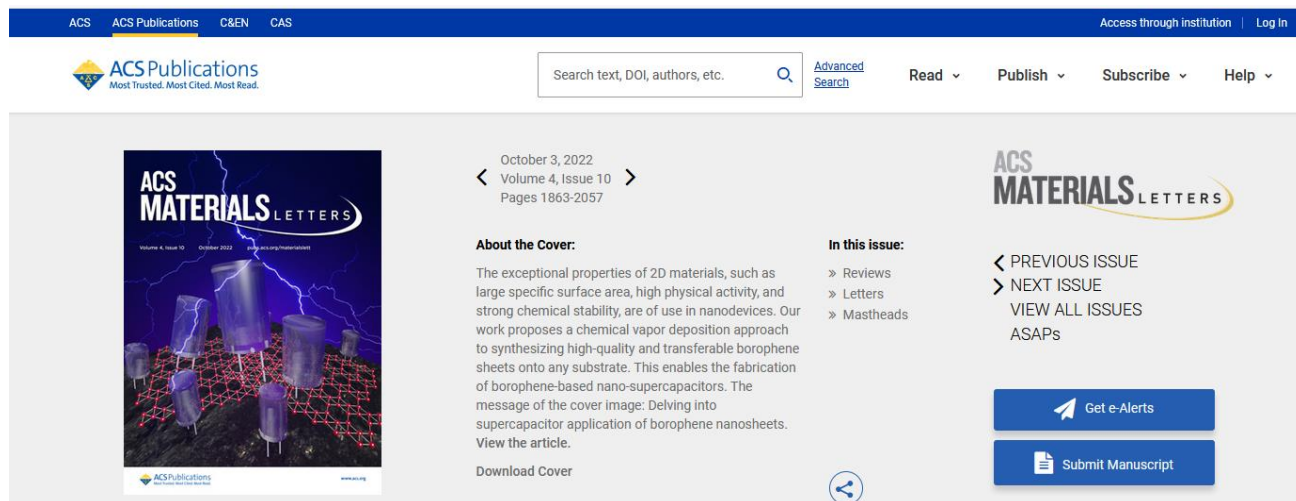
یکی از فعالیت‌های بسیار مناسب کشور در زمینه تجربی مرتبط با فعالیت آقای دکتر عبدی و همکاران است. ایشان توانستند در سال ۲۰۲۱ **نقطه عطفی** در حوزه بوروفین ایجاد کنند. گروه تحقیقاتی دکتر عبدی با بهره‌گیری از تجزیه حرارتی دی‌بوران در فرآیند رسوب‌دهی شیمیایی بخار (CVD)، برای نخستین بار رشد موفق ورقه‌های بوروفین با ضخامت اتمی را گزارش می‌دهد، که راه را برای تولید مقیاس‌پذیر و بررسی تجربی این ماده نوظهور هموار می‌سازد.^۵ به بیان دیگر، ایشان برای نخستین بار در دنیا موفق شدند بوروفین را به روشی سنتز کنند که وابسته به زیر لایه نباشد، نیاز به خلا فوق بالا نداشته باشد و امکان انتقال بوروفین به زیرلایه های دلخواه فراهم شود. این دستاورد بسیار مهم است، زیرا تا پیش از آن بوروفین تنها در شرایطی قابل سنتز بود که به سطح زیرلایه (زیرلایه های فلزی تک کریستال مانند نقره و طلا) متصل باقی می‌ماند و این موضوع محدودیت جدی برای استفاده واقعی از آن در فناوری‌ها و صنایع ایجاد می‌کرد. دکتر عبدی با انتخاب روش لایه‌نشانی بخار شیمیایی^{۳۸}، که یکی از پرکاربردترین و صنعتی‌ترین روش‌های تولید لایه‌های نازک است، توانست نه تنها بوروفین را سنتز کند بلکه شرایطی فراهم آورد که این ماده به‌طور مستقل جداسازی و مشخصه‌یابی شود.

اهمیت انتخاب روش CVD در این است که این فناوری سال‌هاست در صنایع نیمه‌هادی و پوشش‌دهی مورد استفاده قرار می‌گیرد و توانایی تولید لایه‌های نازک با کیفیت بالا، خلوص بسیار زیاد و یکنواختی ساختاری را دارد. به همین دلیل، موفقیت دکتر عبدی در استفاده از این روش برای تولید بوروفین نشان داد که این ماده نوظهور می‌تواند از همان ابتدا با فناوری‌های صنعتی موجود سازگار شود و امید به قابلیت تجاری‌سازی و تولید انبوه در آینده را خواهد داشت. مشخصه‌یابی‌هایی که ایشان و تیمشان در همان سال انجام دادند، از جمله تصویربرداری با میکروسکوپ الکترونی عبوری و پراش الکترونی برای اولین بار ساختار واقعی بوروفین را به‌طور مستقل آشکار کرد. نتایج این تحقیقات در سال ۲۰۲۱ در قالب مقاله‌ای در مجله معتبر [ACS Applied Materials & Interfaces](https://doi.org/10.1021/acsami.1c01234)

³⁸ Chemical vapor deposition(CVD)

منتشر شد و در جامعه علمی مورد توجه قرار گرفت. به طوری که از آن پس روش‌های مبتنی بر CVD برای رشد بوروفین گسترش یافت و همگی مقالات منتشر شده در این زمینه به مقاله ایشان ارجاع دادند.

در ادامه این مسیر، دکتر عبدی و گروه تحقیقاتی ایشان در سال ۲۰۲۲ دستاورد بزرگ دیگری در کاربردی‌سازی بوروفین رقم زدند. ایشان برای نخستین بار در جهان موفق شدند بوروفین خالص و بدون زیرلایه را در یک ابرخازن به کار ببرند و اثرات عملی این ماده را در یک دستگاه واقعی گزارش کنند. این دستاورد اهمیت مضاعفی دارد، زیرا بسیاری از مواد دوبعدی در مرحله سنتز باقی می‌مانند و تنها در سطح مقالات تئوری یا آزمایشگاهی معرفی می‌شوند، اما دکتر عبدی توانست بوروفین را مستقیماً وارد حوزه عملکرد دستگاه‌های انرژی کند. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از بوروفین ظرفیت ابرخازن را تا سه و نیم برابر افزایش داده است که یک جهش بسیار قابل توجه نسبت به فناوری‌های موجود به شمار می‌رود. این نتایج در مجله [ACS Materials Letters](#) منتشر شد و به دلیل اهمیت بالا و نوآوری برجسته، تصویر روی جلد آن شماره از مجله به این فعالیت اختصاص یافت (شکل ۸).



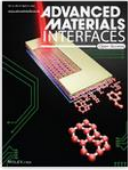
شکل ۸ - تصویر روی جلد مجله با مقاله آقای دکتر عبدی و همکاران

شایان ذکر است که مجلاتی که در عنوان آن‌ها واژه **Letters** به کار رفته است، معمولاً به انتشار پژوهش‌های پیشگامانه، نتایج بدیع و یافته‌هایی اختصاص دارند که از اولویت انتشار بالا و ضرورت اطلاع‌رسانی سریع در جامعه علمی برخوردارند. از این رو، این دسته از مجلات از جایگاه ویژه‌ای در نظام نشر علمی برخوردارند. بر این اساس، انتخاب یک مقاله به عنوان تصویر روی جلد چنین مجلاتی از سوی سردبیر، بیانگر برجستگی علمی قابل توجه این پژوهش، بازتاب گسترده آن در جامعه بین‌المللی و اهمیت مضاعف نتایج حاصل از تحقیقات دکتر عبدی است.

در سال اخیر (۲۰۲۵) دکتر عبدی و تیم تحقیقاتی ایشان دو دستاورد ارزشمند دیگر را رقم زدند که یکی از آنها در ادامه کاربردی سازی بوروفین است که این بار هم روی جلد مجله [Advanced Materials Interfaces](#) قرار گرفت (شکل ۹) و برای اولین بار استفاده از بوروفین در ساخت آشکارسازهای نوری را مطرح ساخت و دیگری که در مجله معتبر [Advanced Functional Materials](#) چاپ شد، نشان داد که علاوه بر خواص شناخته شده بوروفین، خواص منحصر بفرد کوانتوم اپتیکی غیرهمسانگرد هم

برای بوروفین اثبات می شود. این تحقیق که با همکاری محققانی از دانشگاه کیل آلمان انجام شده است نوید استفاده از بوروفین در فناوری کوانتومی را می دهد که در کشور ما نیز توجه ویژه ای به آن می شود.

[HOME](#) | [ABOUT](#) | [AUTHORS](#) | [BROWSE](#) | [SPECIAL FEATURES](#)



Advanced Materials Interfaces: Volume 12, Issue 8

April 21, 2025

[Previous Issue](#) | [Next Issue](#)

[GO TO SECTION](#)

Sign up for email alerts

Enter your email to receive alerts when new articles and issues are published.

Email address

Continue

[Export Citation\(s\)](#)

Cover Picture

[Open Access](#)

Borophene-Based Ultrasensitive and Broadband Photodetectors (Adv. Mater. Interfaces 8/2025)

Yaser Abdi, Alireza Eskandari, Zahra Alavi, Anousha Khamsavi, Mahsa Etminan, Mobina Zahedi, Masoud Taleb, Nahid Talebi

[Submit an article](#)

[Journal Metrics](#)



Advertisement

شکل ۹ - تصویر روی جلد مجله با مقاله آقای دکتر عبدی و همکاران

یکی دیگر از مقالات بسیار خوب کشور، فعالیت آقای دکتر جعفری و همکاران است که در نشریه Communication Physics چاپ شده است.^{۳۹}

[communications physics](#)

[View all journals](#) | [Search](#) | [Log in](#)

[Explore content](#) | [About the journal](#) | [Publish with us](#)

[Sign up for alerts](#) | [RSS feed](#)

[nature](#) > [communications physics](#) > [articles](#) > [article](#)

Article | [Open access](#) | Published: 15 March 2023

Tunning the tilt of the Dirac cone by atomic manipulations in 8Pmmn borophene

[Yasin Yekta](#), [Hanif Hadipour](#) & [Seyed Akbar Jafari](#)

[Communications Physics](#) **6**, Article number: 46 (2023) | [Cite this article](#)

4034 Accesses | 28 Citations | 1 Altmetric | [Metrics](#)

[Download PDF](#)

Sections | [Figures](#) | [References](#)

[Abstract](#)

[Introduction](#)

[Results](#)

[Conclusions](#)

[Methods](#)

[Data availability](#)

[References](#)

[Acknowledgements](#)

[Author information](#)

[Ethics declarations](#)

Abstract

Two dimensional quantum materials possessing Dirac cones in their spectrum are fascinating due to their emergent low-energy Dirac fermions. In 8Pmmn borophene the Dirac cone is furthermore tilted, which is a proxy for spacetime geometry, since the future light-cone depends on the underlying metric. Therefore it is important to understand the microscopic origin of the tilt. Here, based on ab-initio calculations, we decipher the atomistic mechanism of the formation of tilt. First, nearest-neighbor hopping on a buckled honeycomb lattice forms an upright Dirac cone. Then, the difference in the renormalized anisotropic second-neighbor hopping, formed by virtual hoppings on one-dimensional chains of atoms, tilts the Dirac cone.

شکل ۱۰ - تصویر مرتبط با مقاله آقای دکتر جعفری و همکاران

³⁹ <https://www.nature.com/articles/s42005-023-01161-9>

این مقاله به بررسی یکی از ویژگی‌های بنیادین بوروفین یعنی پدیده «مخروط دیراک»^{۴۰} می‌پردازد. منشأ اتمی این پدیده در مواد دوبعدی، وجود مخروط دیراک به معنای حضور حامل‌های بار با رفتار شبه‌نسبیتی است، اما در بوروفین این مخروط‌ها علاوه بر وجود، دارای انحراف (tilt) هستند که ماهیت رفتار الکترون‌ها را به‌طور اساسی تغییر می‌دهد.

هدف اصلی مقاله، پاسخ به این سؤال کلیدی است که این انحراف دقیقاً از کجا در سطح اتمی ناشی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در ساده‌ترین حالت، برهم‌کنش بین اتم‌های نزدیک (nearest-neighbor hopping) یک مخروط دیراک معمولی ایجاد می‌کند، اما برهم‌کنش‌های پیچیده‌تر بین اتم‌های دورتر (second-neighbor hopping) که از طریق ساختارهای زنجیره‌ای در شبکه شکل می‌گیرند، باعث ایجاد انحراف می‌شوند.

مقاله همچنین نشان می‌دهد که ساختار بوروفین را می‌توان به دو زیرسیستم انرژی بالا و پایین تفکیک کرد و با حذف مؤثر درجات آزادی پرانرژی، یک مدل دقیق برای توصیف رفتار الکترونی به‌دست آورد. این تحلیل منجر به ساخت یک مدل tight-binding می‌شود که امکان درک و پیش‌بینی رفتار ماده را فراهم می‌کند. نکته مهم‌تر این است که این ویژگی صرفاً یک پدیده ثابت نیست، بلکه می‌توان آن را از طریق دستکاری اتمی (مثلاً جایگزینی برخی اتم‌های بور با کربن) به‌صورت کنترل‌پذیر تغییر داد. از منظر فیزیکی، این انحراف اهمیت بسیار عمیق‌تری دارد و انحراف مخروط دیراک به‌عنوان یک نماینده (proxy) از هندسه مؤثر فضا-زمان در ماده تفسیر می‌شود. به بیان دیگر، رفتار الکترون‌ها در این سیستم معادل حرکت ذرات در یک فضا-زمان تغییرشکل‌یافته است و این موضوع بوروفین را به یک «ماده کوانتومی هندسی» تبدیل می‌کند.

این ویژگی‌ها پیامدهای مهمی نیز دارند. به‌عنوان مثال، وجود انحراف باعث افزایش چگالی حالت‌ها و در نتیجه افزایش پاسخ ماده به میدان‌های خارجی می‌شود، که برای کاربردهای الکترونیکی و اپتوالکترونیکی بسیار ارزشمند است.

در مجموع، این مقاله نشان می‌دهد که در بوروفین، رابطه بین ساختار اتمی و رفتار الکترونی به‌صورت مستقیم و قابل مهندسی برقرار است. اهمیت آن در این است که برای نخستین بار یک مکانیسم دقیق و قابل‌کنترل برای تنظیم یکی از پیشرفته‌ترین ویژگی‌های مواد کوانتومی ارائه می‌دهد. این موضوع بوروفین را از یک ماده جالب علمی، به یک پلتفرم مهندسی برای طراحی مواد با رفتارهای الکترونی دلخواه تبدیل می‌کند و جایگاه آن را در مرز فناوری‌های آینده تثبیت می‌نماید.

⁴⁰ Dirac cones

۴- بررسی احتمال اخذ جایزه نوبل در آینده

هدف از این بخش، بررسی احتمال موفقیت در دریافت جایزه نوبل در حوزه بوروفین و ارائه یک چارچوب تحلیلی مبتنی بر الگوریتم نوبل مواد است. برای این منظور، برندگان نوبل در حوزه مواد از سال ۲۰۰۰ تاکنون مورد بررسی قرار گرفتند و دلایل موفقیت آنها تحلیل شد. سپس، با فرض احتمالی اختصاص جایزه به محققان فعال در زمینه بوروفین در سال‌های آینده، جایگاه کشور و احتمال موفقیت در این زمینه ارزیابی گردیده است. علاوه بر این، این بخش شامل چند پیشنهاد عملی است که می‌تواند این احتمال را در دریافت جایزه نوبل افزایش دهد.

۴-۱- تحلیل الگوی نوبل‌های مرتبط با مواد

از سال ۲۰۰۰ تا کنون، چندین جایزه نوبل فیزیک و شیمی به مواد نوظهور اختصاص یافته که مشخصات این مواد و برندگان نوبل مرتبط با آن، در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۳- مقایسه بین مهم‌ترین مواد دوبعدی نوظهور

ماده	سال نوبل	برندگان	توضیح نقش برندگان
پلیمرهای رسانا	۲۰۰۰	Alan J. Heeger, Alan G. MacDiarmid, Hideki Shirakawa	کشف و توسعه شیمیایی برای سنتز و توسعه پلیمرهای رسانا (nobelprize.org)
لایه‌های مغناطیسی GMR	۲۰۰۷	Albert Fert, Peter Grünberg	بررسی بنیادی و کشف اثر و مفاهیم فیزیکی آن (nobelprize.org)
گرافن	۲۰۱۰	Andre Geim, Konstantin Novoselov	سنتز تک‌لایه گرافن؛ بررسی بنیادی شناسایی خواص الکترونیکی دوبعدی (nobelprize.org)
شبه کریستال	۲۰۱۱	Dan Shechtman	کشف و شناسایی ساختار غیرتکراری و غیرمعمول در آلایه‌ها، تأیید تجربی وجود شبه‌کریستال‌ها و تعریف مفهوم جدید در ساختار مواد (nobelprize.org)
باتری لیتیوم-یون	۲۰۱۹	M. Whittingham, John B. Goodenough, Akira Yoshino	Whittingham: کشف و سنتز الکترودهای اولیه با انرژی بالا، ایجاد ساختار شیمیایی پایه برای باتری‌های لیتیوم-یونی Goodenough: توسعه کاتدهای ولتاژ بالاتر (LiCoO ₂ , NCM) برای افزایش ظرفیت و ولتاژ باتری Yoshino: ساخت اولین باتری لیتیوم-یونی تجاری ایمن با استفاده از آند گرافیت برای تجاری‌سازی و کاربرد عملی (nobelprize.org)
کوانتوم‌دات	۲۰۲۳	Moungi G. Bawendi, Louis E. Brus, Aleksey I. Ekimov	Ekimov: کشف و سنتز اولیه نانوکریستال‌ها Brus: بررسی خواص بنیادی کوانتومی اندازه-وابسته Bawendi: توسعه روش شیمیایی تولید با کنترل دقیق اندازه (nobelprize.org)

Robson: کشف و طراحی شیمیایی	Susumu Kitagawa,	۲۰۲۵	چارچوب‌های
Kitagawa: بررسی خواص فیزیکی و انعطاف‌پذیری	Richard Robson, Omar		فلز-آلی
Yaghi: کاربردها در ذخیره‌سازی گاز و واکنش‌های شیمیایی	M. Yaghi		
(nobelprize.org)			

با توجه به جدول فوق، می‌توان استنباط کرد که سه مسیر اصلی در تعیین برندگان نقش کلیدی داشته‌اند:

۱. کشف اولیه (Discovery): برندگان این مسیر نخستین سنتز یا شناسایی ماده جدید را انجام داده‌اند که می‌توان به Heeger برای کشف پلیمرهای رسانا و Geim برای گرافان اشاره کرد. این نقش اهمیت زیادی دارد، زیرا کشف ماده نوظهور زمینه‌ساز تحقیقات بعدی در سایر نقش‌ها می‌شود.
۲. بررسی پدیده‌های بنیادی (Fundamental Physics/Chemistry): محققان در این مسیر به مطالعه خواص اساسی ماده پرداخته و پدیده‌های علمی جدید را معرفی می‌کنند. حتی بدون سنتز ماده، این نقش شانس نوبل را افزایش می‌دهد. از این دسته می‌توان به Grünberg برای بررسی لایه‌های مغناطیسی و Brus برای بررسی کوانتوم‌دات اشاره کرد.
۳. مقیاس‌پذیری و کاربرد صنعتی (Engineering / Application): برندگان توانسته‌اند ماده نوظهور را به مرحله کاربرد عملی برسانند. موفقیت در این حوزه شامل تولید در مساحت وسیع، سنتز صنعتی و پیاده‌سازی ماده در دستگاه‌ها است. افرادی مانند Yaghi جهت توسعه چارچوب‌های فلز-آلی و Bawendi جهت توسعه کوانتوم‌دات در این دسته قرار می‌گیرند.

همچنین این جدول نشان می‌دهد که در گذشته، برندگان نوبل هر دو نقش کشف و بررسی اثرات بنیادی را باهم داشته‌اند در حالی که در هر سه مورد اخیر، هر برنده نوبل یک نقش جداگانه در این زمینه داشته و به خصوص هموارسازی مسیر کاربرد و صنعتی‌سازی کاملاً مورد توجه بوده است.

۴-۲- تطبیق الگو با بوروفین

با توجه به این الگوی سه‌گانه اگر چنانچه جایزه نوبل در آینده به فعالین در حوزه بوروفین اهدا شود، آنگاه می‌توان پیش‌بینی کرد که افراد زیر برنده این جایزه خواهند شد:

❖ کشف اولیه:

در چارچوب احتمالی اعطای جایزه نوبل به حوزه بوروفین، بخش مربوط به «کشف اولیه» به احتمال بسیار زیاد به پژوهشگرانی اختصاص خواهد یافت که نخستین سنتز آزمایشگاهی این ماده را به صورت قابل تکرار محقق کردند. Andrew J. Mannix و همکاران در سال ۲۰۱۵ با رشد تک‌لایه بوروفین بر روی زیرلایه Ag(111) و شناسایی ساختارهای چندریخت آن از طریق روش‌های پیشرفته میکروسکوپی و طیف‌سنجی، مبنای تجربی شکل‌گیری این حوزه را بنیان گذاشتند. در ادامه نیز Baojie Feng و همکاران نیز با سنتز مستقل گونه‌های دیگر بوروفین و تعیین فاز β_{12} ، قابلیت کنترل‌پذیری فاز و شرایط رشد را تثبیت کردند. این مجموعه مطالعات، که مبتنی بر تبخیر

کنترل شده بور در شرایط خلأ فوق بالا و تحلیل ساختاری دقیق فازهای مختلف بود، ضرورتاً نقش آغازین و زیرساختی در توسعه پژوهش‌های بنیادی و کاربردی بوروفین ایفا کرده و از این رو محتمل‌ترین مصداق برای شاخه «کشف اولیه» محسوب می‌شود.

❖ بررسی پدیده‌های بنیادی:

نقش دوم به پژوهشگرانی اختصاص دارد که به تبیین و اثبات ویژگی‌های بنیادی بوروفین پرداخته و بنیان فیزیکی این ماده را آشکار کرده‌اند. در حوزه تجربی، Baojie Feng و همکارانش با استفاده از روش‌هایی نظیر ARPES، STM و STS، وجود حالت‌های الکترونیکی شبه‌دیپراکی، ساختارهای باندهای ویژه و رفتارهای انتقالی غیرایزوتروپ را گزارش کرده‌اند؛ یافته‌هایی که نشان می‌دهد بوروفین واجد ویژگی‌های الکترونی منحصر به فرد و قابل تمایز از یک لایه فلزی معمولی است. در کنار این نتایج، گروه‌های نظری پیشرو همچون B. I. Yakobson و پژوهشگران همکار وی با ارائه مدل‌های محاسباتی پیشرفته، فازهای ساختاری پایدار، مخروط‌های دیراک، مسیرهای انتقالی ناهمسان‌گرد و سناریوهای احتمالی نظیر ظهور ابررسانایی یا حالات توپولوژیک را پیش‌بینی کرده‌اند. هم‌افزایی این دو جریان (اثبات تجربی و چارچوب نظری) بستر فیزیکی لازم برای مطالعات بعدی بوروفین را فراهم ساخته و این نقش را به یکی از عناصر ثابت و تعیین‌کننده در الگوی تاریخی نوبل مواد تبدیل کرده است.

❖ مقیاس‌پذیری و کاربرد صنعتی:

گروه‌هایی که در این نقش قرار می‌گیرند شامل پژوهشگرانی هستند که توانسته‌اند مسیرهای رشد مساحت‌بالا، بهبود پایداری شیمیایی و امکان انتقال یا یکپارچه‌سازی در دستگاه‌ها را برای بوروفین توسعه دهند. برای نمونه، کارهای Wu, Božović, Gozar و همکاران، تولید ورق‌های تک کریستال با مساحت بزرگ روی Cu(111) و تدوین مسیرهای رشد یکنواخت را گزارش کرده است که یش‌نیازی کلیدی برای هر نوع کاربرد واقعی است. همچنین گروه‌هایی مانند Auwärter, Cuxart و Duesberg روش‌هایی برای بهبود امکان جداسازی (decoupling)، انتقال به بسترهای دوم و افزایش پایداری از جمله passivation یا hydrogenation ارائه کرده‌اند که مشکل بنیادی ناپایداری بوروفین را هدف قرار می‌دهد. این مجموعه فعالیت‌ها موجب شد نخستین گام‌ها برای یکپارچه‌سازی بوروفین در ساختارهای آزمایشی و مسیرهای دستگاهی فراهم شود.

با توجه به این نوع از تقسیم‌بندی، تنها گزینه مناسب جهت پیگیری در کشور مرتبط با بخش «مقیاس‌پذیری و کاربرد صنعتی» است. برای تثبیت جایگاه ایران در نقش سوم، یعنی نقشی که تمرکز اصلی آن بر مقیاس‌پذیری، پایداری و قابلیت کاربرد عملی بوروفین است، ضروری است مجموعه‌ای از اقدامات هدفمند و هماهنگ دنبال شود.

نخستین محور، توسعه و انتشار یک مقاله شاخص در سطح «شاهد صنعتی» است که توانایی تولید بوروفین در ابعاد بزرگ (در حد سانتی‌متر)، یکنواختی ساختاری، تکرارپذیری بالا و سازگاری با فرآیندهای صنعتی را نشان دهد. هرچند روش CVD کنونی گامی اساسی در سنتز بوروفین بوده است، اما کمیته‌های نوبل معمولاً به دنبال دستاوردهایی هستند که نشان‌دهنده گذار ماده از مرحله آزمایشگاهی به سطح صنعتی و کاربردی باشد.

دومین محور، غلبه بر چالش بنیادی ناپایداری بوروفین در شرایط محیطی است که بزرگ‌ترین مانع در مسیر مقیاس‌پذیری و کاربرد عملی این ماده به شمار می‌رود. بوروفین به سرعت در هوا اکسید می‌شود و این محدودیت، امکان ذخیره، انتقال یا استفاده عملی از

آن در دستگاه‌ها را دشوار می‌سازد. ارائه یک راهکار پایدارسازی و اثبات طول عمر ماده برای هفته‌ها یا ماه‌ها در دمای اتاق، اهمیت حیاتی در مسیر نوبل دارد. چنین دستاوردی، مشابه آنچه در مورد گرافن و مواد نقاط کربنیرخ داده است، نشان‌دهنده توانایی ماده در ورود به مراحل عملی و صنعتی می‌باشد.

سومین محور، ارائه یک دستگاه عملکردی با کارایی برجسته و بی‌رقیب است. هرچند استفاده از بوروفین در ابرخازن‌ها با افزایش ظرفیت ۳,۵ برابری یک دستاورد قابل توجه است، اما کمیته نوبل معمولاً به دنبال جهش‌های بزرگ‌تر در حوزه‌هایی نظیر حسگرهای فوق حساس، ترانزیستورهای فرکانس بالا، باتری‌های شارژ سریع، سامانه‌های نانوالکترونیکی سبک و مقاوم، یا هتروساختارهای دوبعدی نوظهور است. ارائه یک دستگاه با عملکرد چندبرابر بهتر از فناوری‌های موجود، مانند یک سامانه ذخیره انرژی مبتنی بر بوروفین با کارایی بیش از ۱۰ برابر استانداردهای فعلی، می‌تواند جایگاه نقش سوم را به‌طور کامل تثبیت کند.

در مجموع، تحقق این سه محور یعنی تولید مقیاس‌پذیر و یکپارچه، پایدارسازی در شرایط محیطی و نمایش عملکرد دستگاهی برجسته، نمایانگر مجموعه‌ای از دستاوردهای مورد توجه کمیته نوبل است. اجرای هماهنگ و موفق این اقدامات، جایگاه ایران را در نقش سوم تقویت کرده و حداقل یکی از پژوهشگران ایران را به عنوان یکی از نامزدهای برجسته برای دریافت جایزه نوبل در حوزه بوروفین معرفی می‌کند.

۵- پیشنهاد‌های سیاستی

با توجه به اهمیت ماده دوبعدی بوروفین، به نظر می‌رسد با اتخاذ یک رویکرد سیاستی صحیح، مستمر و بلندمدت، می‌توان به مرجعیت علمی ایران در زمینه بوروفین امیدوار بود.

در ادامه پیشنهاد‌های کلان برای رسیدن به این هدف نیز ارائه می‌شود که عبارتند از:

❖ تثبیت جایگاه علمی جهانی (افق ۳ ساله)

• انتشار مستمر مقالات در مجلات بسیار سطح بالا مانند *Nature*, *Advances Science*, *Nature Materials*

Nanotechnology

• ثبت پتنت‌های بین‌المللی برای روش‌های سنتز بوروفین و کاربردهای آن.

❖ ایجاد تحول علمی یا فناوری بنیادین (افق ۵ ساله)

• توسعه همکاری با پژوهشگران مطرح جهانی در آمریکا، اروپا و شرق آسیا.

• توسعه یک روش پایدار و صنعتی برای سنتز بوروفین در ابعاد بزرگ.

• ارائه یک محصول تحول‌آفرین بر پایه بوروفین.

❖ رهبری علمی بین‌المللی (افق ۷ ساله)

• تشکیل کنفرانس جهانی تحقیقات بوروفین با رهبری ایران.

• برگزاری کنفرانس بین‌المللی بوروفین در ایران با حضور چهره‌های نوبلی و صاحب‌نام.

• هدایت پروژه‌های بین‌المللی چندملیتی (EU-China-Iran) در زمینه مواد دوبعدی.

❖ فعال سازی دیپلماسی علمی و دیده شدن راهبردی (افق ۱۰ ساله)

- معرفی رسمی پژوهشگران برتر کشور به کمیته های نوبل از طریق شبکه های علمی بین المللی.
- تنظیم همکاری ها و مقالات مشترک با دانشمندان نوبلی یا کاندیداهای جدی نوبل.
- تولید محتوای رسانه ای معتبر (علمی، داستانی، مستند) پیرامون پروژه های برتر.
- برندسازی بین المللی از ایران به عنوان مرکز نوآوری در بوروفین.

جهت اجرایی نمودن پیشنهادهای فوق، بایستی از تمام ظرفیت نهادهای پشتیبان کلیدی در کشور استفاده شود. به همین منظور، پیشنهادهای اجرایی و مرتبط با هر دستگاه در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۴- نقش دستگاه های متولی جهت رسیدن به مرجعیت علمی در زمینه بوروفین

دستگاه متولی	نوع حمایت
ستاد توسعه فناوری های نانو و میکرو	• تدوین استاندارد بین المللی • همکاری فعالانه با دانشگاه های مطرح دنیا • فعالیت رسانه ای و ترویج موضوع با هماهنگی دیگر دستگاه ها • برگزاری نشست و کنفرانس های تخصصی
بنیاد ملی علم	• راهبری حمایت ها • حمایت از تعداد زیادی پروژه در یک سال و استقرار تجهیزات لازم • حمایت از طرح های بین المللی در میان مدت و بلندمدت
شبکه فناوری های راهبردی	• حمایت سالانه با تخفیف ۱۰۰ درصدی به مدت ۵ سال • پیگیری تعمیر دستگاه های تست و آنالیز به صورت خاص • خرید، نصب و راه اندازی تجهیزات جدید از جمله لیتوگرافی لیزری
کانون مدیریت دارایی های فکری	حمایت ثبت اختراع در معاهده PCT و فاز ملی بدون ارزیابی تجاری

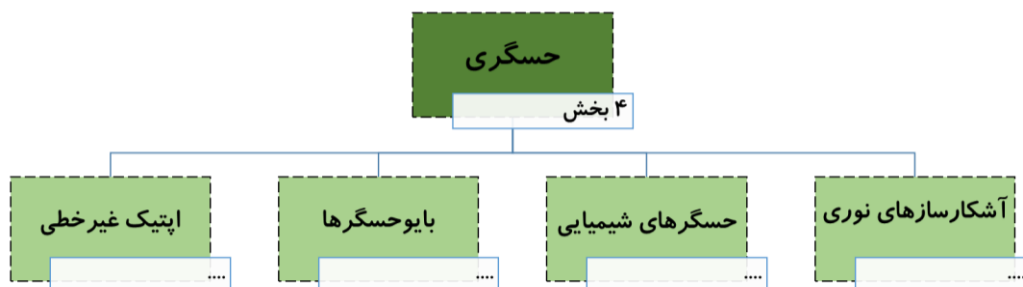
از بین نهادهای فوق، بنیاد ملی علم نقش کلیدی جهت رسیدن ایران به مرجعیت علمی در زمینه بوروفین را دارد. در همین راستا، پیشنهاد می شود که در قالب یک برنامه ویژه، برخی از تجهیزات لازم مانند لیتوگرافی لیزری با حمایت این نهاد خریداری و در یکی از آزمایشگاه های کشور مستقر شود. استقرار چنین تجهیزاتی می تواند علاوه بر تسریع بخشیدن به فعالیت های پژوهشی، کیفیت آن ها را نیز افزایش داده و به خصوص به چاپ مقاله در نشریات معتبری مانند نیچر امیدوار بود.

همچنین لازم است تا در یک سال، تعداد زیادی طرح پژوهشی و به صورت همزمان در زمینه بوروفین حمایت شوند تا ایران بتواند به جایگاه بالایی در این زمینه دست یابد. این راهبرد به دو دلیل اهمیت دارد. اول اینکه کشور ایران بتواند در زمان بسیار کوتاهی فاصله فعالیت های تجربی خود را با دیگر کشورها و به خصوص چین کاهش دهد. ثانیاً انتشار تعداد زیادی مقاله در یک سال، تاثیر رسانه ای داشته و به شناخته شدن ایران در این زمینه بسیار کمک خواهد کرد که در راستای هدف مرجعیت علمی است.

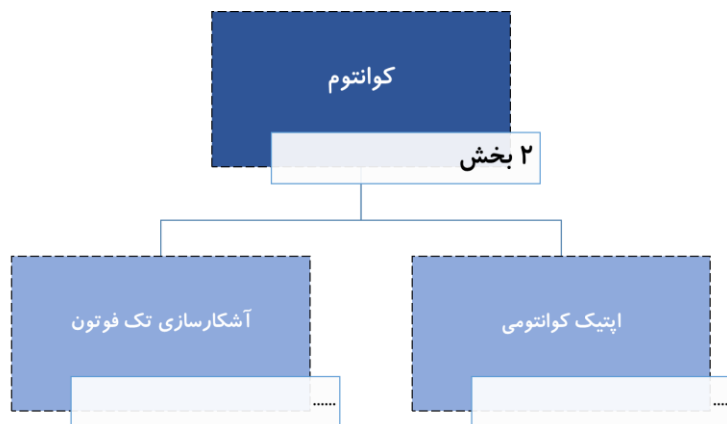
لذا پیشنهاد می‌شود تا حداقل ۱۳ پروژه دوساله در پنج محور ذخیره‌سازی انرژی، حسگری، کوانتوم، ابرسانایی و مطالعات نظری، توسط بیناد ملی علم حمایت شوند که لیست این پروژه‌ها در شکل‌های ۱۱ تا ۱۵ آورده شده است.



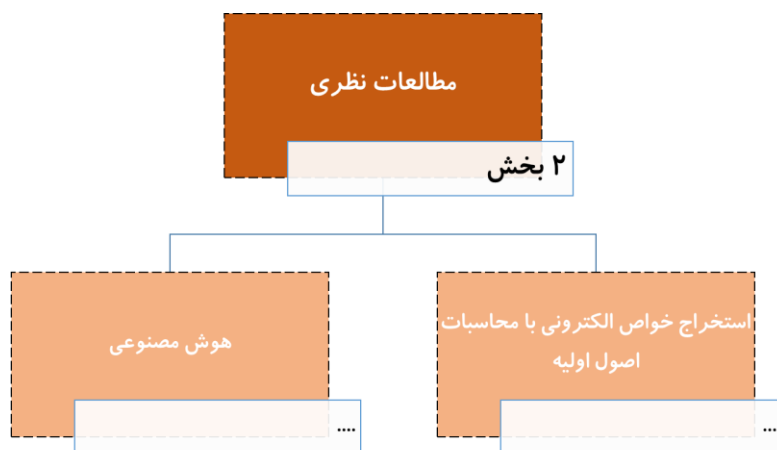
شکل ۱۱ - زیرشاخه‌های مرتبط با حوزه ذخیره‌سازی انرژی و افراد مناسب پیشنهادی جهت همکاری



شکل ۱۲ - زیرشاخه‌های مرتبط با حوزه حسگری



شکل ۱۳ - زیرشاخه‌های مرتبط با حوزه کوانتوم



شکل ۱۴ - زیرشاخه‌های مرتبط با مطالعات نظری



شکل ۱۵ - زیرشاخه مرتبط با ابرسانایی

همچنین لازم است تا علاوه بر فعالیتهای پژوهشی، ارتباطات در حوزه بین الملل از قبیل شرکت در کنفرانسهای مرتبط و معرفی فعالیتهای به دیگر کشورها، برگزاری نشستهای داخلی و همچنین فعالیتهای رسانه‌ای از قبیل ساخت ویدیو و موشن‌گرافیک نیز در دستور کار نیز قرار بگیرد.

با توجه به این موارد، هزینه‌های تخمینی این برنامه ملی دوساله به تفکیک در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۵- لیست هزینه‌های مورد نیاز

نوع برنامه	نام برنامه	دستگاه متولی	بودجه مورد نیاز
توسعه زیرساخت	استقرار و تعمیر تجهیزات لازم	شبکه آزمایشگاهی	خرید یک عدد دستگاه لیتوگرافی لیزری به قیمت ۱۵۰ هزار دلار و تعمیر دستگاه HRTEM
فعالیت پژوهشی	طرح‌های پژوهشی داخل کشور	بنیاد ملی علم	۲۰ پروژه تا سقف ۱,۵ میلیارد (مجموعاً تا سقف ۳۵ میلیارد تومان)
	طرح‌های پژوهشی با همکاری خارج از کشور	بنیاد ملی علم	۶ سفر ۵۰۰۰ دلاری شامل بلیط هواپیما و اقامت
توسعه ارتباطات بین الملل	شرکت در کنفرانس‌های خارجی	بنیاد ملی علم	۶ سفر ۳۰۰۰ دلاری شامل بلیط هواپیما و اقامت
	شرکت در نمایشگاه‌های بین المللی	بنیاد ملی علم	۲ سفر ۳۰۰۰ دلاری شامل بلیط هواپیما و اقامت
فعالیت رسانه‌ای	آموزش هوش مصنوعی و بهبود سئوی جستجوی گوگل	ستاد توسعه فناوری نانو و میکرو	یک میلیارد تومان
	ساخت کلیپ و موشن گرافیک	ستاد توسعه فناوری نانو و میکرو	یک میلیارد تومان
تجاری سازی	افزایش سطح بلوغ محصولات و توسعه کسب و کار	ستاد توسعه فناوری نانو و میکرو	۱۰ میلیارد تومان
حفاظت دارایی‌های فکری	ثبت اختراع PCT	کانون مدیریت دارایی‌های فکری	۱۰ اختراع ۲۰۰۰ دلاری
مجموع هزینه‌ها			۹۰ میلیارد تومان ^{۴۱}

^{۴۱} با توجه به افزایش نرخ ارز و بازه دوساله این فعالیت، نرخ ارز معادل ۲۰۰ هزار تومان در نظر گرفته شده است

۶- جمع‌بندی

با توجه به مطالب قسمت‌های قبل می‌توان به این جمع‌بندی رسید که ماده دوبردیی بوروفین، دارای اهمیت بوده و ایران کاملاً ظرفیت تبدیل ایران به یکی از مهم‌ترین مراکز علمی و تحقیقاتی در این زمینه را دارد. کسب اعتبار علمی برای کشور، مستلزم حمایت‌های مستمر و همه‌جانبه است. با توجه به اختلاف تعداد مقالات کشور با نفرا ت برتر و به طور کلی جایگاه نسبتاً پایین ایران در فعالیت‌های تجربی نسبت به عددی، لازم است تا در یک بازه زمانی بسیار کوتاه، این فاصله جبران شود. به لحاظ کیفیت نیز لازم است برنامه‌ریزی لازم از قبیل تجهیز امکانات آزمایشگاهی صورت گیرد تا بتوان در نشریات معتبرتر از قبیل نیچر، چندین مقاله به چاپ رساند.

به همین منظور پیشنهاد می‌شود که در یک طرح کلان، حداقل ۱۰ پروژه با رویکرد کاربردی سازی بوروفین توسط بنیاد ملی علم حمایت شود تا دو سال بعد از آن ۲۰ مقاله تجربی با هویت ایران در دنیا و همگی در یک سال به انتشار برسند.

این امر باعث می‌شود تا کشور ایران در یک زمان بسیار کوتاهی فاصله خود را با کشورهای پیشرو و به خصوص چین به حداقل رسانده و جایگاه خود را تثبیت نماید. علاوه بر این، انتشار این تعداد از مقالات و همگی در یک سال، اثر مضاعف بر جایگاه ایران گذاشته و منجر به شناخته شدن در عرصه جهانی خواهد شد. به لحاظ کیفیت نیز در همین بازه زمانی لازم است برنامه‌ریزی لازم از قبیل تجهیز امکانات آزمایشگاهی صورت گیرد تا بتوان در نشریات معتبرتر از قبیل نیچر، چندین مقاله به چاپ رساند.

به نظر می‌رسد با رویکرد پیشنهادی و به علت مقطع حساس زمانی که در آن قرار داریم، بخش «کاربردی سازی صنعتی»

از زمین بازی کل بوروفین که کشور ایران شروع کننده آن بوده است، به نام ایران تمام خواهد شد. لذا اگر چنانچه این

اقدامات با سرعت بالایی انجام شود حتی می‌توان به اخذ جایزه نوبل در بلندمدت امیدوار بود. برای افزایش احتمال این موفقیت نیز پیشنهاد می‌شود که مسیر کاربردی سازی بوروفین را ویژه با تمرکز بر گلوگاه‌هایی مانند پایداری ماده تثبیت شود، برخی از پدیده‌های بنیادی آزمایش نشده به صورت تجربی اثبات شده و به خصوص یک کاربرد بسیار مهم یا تحول آفرین برای بوروفین در عمل توسط ایران مطرح و به صورت عملی نشان داده شود.