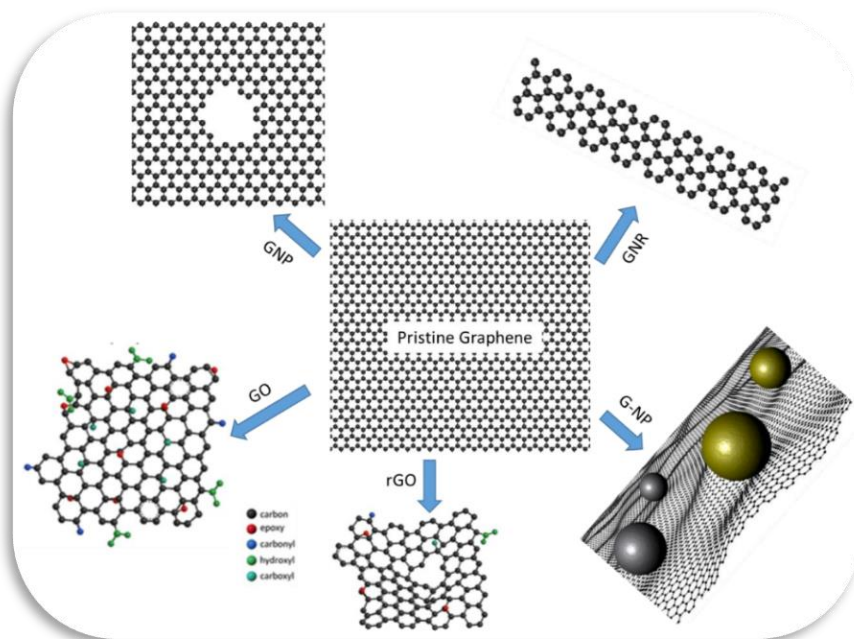




ریاست جمهوری
معاونت علمی و فناوری
سازمان توسعه فناوری نانو

بسم الله الرحمن الرحيم

بررسی ارزیابی وضعیت گرافن در بین فناوری‌های نوظهور



آبان ماه ۱۴۰۰

فهرست مطالب

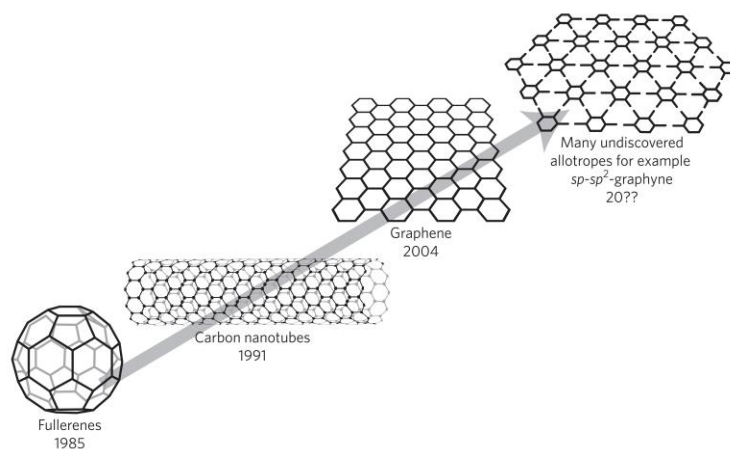
چکیده.....	۳
۱ معرفی گرافن، خواص و کاربردهای مهم امروزی آن	۴
۲ برنامه‌های مراکز مهم در نقاط مختلف دنیا.....	۸
۳ بررسی مطالعات انجمن مشاوران گرافن.....	۱۸
۴ بررسی بازار و برخی بازیگران اصلی.....	۳۸
۵ تحلیل منحنی اشتیاق فناوری و ماتریس اولویت.....	۴۳
۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....	۴۵
۷ مراجع.....	۴۸

چکیده

گرافن یکی از جذاب‌ترین و سودمندترین مواد شناخته‌شده است که ضخامت آن تنها به اندازه یک اتم کربن اما هزاران بار مستحکم‌تر از فولاد بوده و دارای انعطاف‌پذیری بالایی می‌باشد. از زمان سنتز گرافن در سال ۲۰۰۴، تعداد ثبت اختراعات بین‌المللی در حوزه‌های مختلف کاربردی هر ساله به صورت نمایی در حال افزایش بوده است. در مطالعه حاضر، پس از معرفی گرافن و طرح خواص و کاربردهای مهم آن، ابتدا به برنامه‌های مراکز مهم در کشورهای مختلف دنیا پرداخته شده است. در ادامه، مطالعات انجمن مشاوران گرافن به عنوان یکی از بزرگترین مراجع فعال در حوزه مطالعات کاربردی گرافن، به طور مبسوط ارائه شده است. سپس، با نگاهی اجمالی به بررسی بازار گرافن و شناسایی بازیگران اصلی آن در حوزه تجاری پرداخته شده است. در نهایت، پیش از جمع‌بندی و ارائه نتیجه‌گیری‌های کلی، منحنی اشتیاق فناوری و ماتریس اولویت مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

۱ معرفی گرافن، خواص و کاربردهای مهم امروزی آن

کربن به عنوان عنصری که امکان حیات بر روی کره خاکی را فراهم کرده است، از کاربرد گسترده‌ای در فناوری‌های مختلف از تولید دارو تا مواد سنتزی مختلف برخوردار است. این امر به قابلیت کربن برای برقراری پیوند با چندین اتم کربن دیگر و تقریباً تمامی عناصر جدول تناوبی با تنوع نامحدود باز می‌گردد. تنوع ساختاری مولکول‌ها و ترکیبات آلی ایجاد شده با طیف وسیعی از خواص شیمیایی و فیزیکی همراه است. طراحی این خواص با کنترل ترکیب اجزای سازنده و گروه‌های عاملی در سیستم‌های مورد نظر جدید با استفاده از ابزار مدرن سنتز شیمیایی امکان‌پذیر می‌باشد. کربن عنصری به صورت دو دگرشکل طبیعی یعنی الماس و گرافیت در طبیعت وجود دارد که به شکل شبکه‌های گسترده‌ای از اتم‌های کربن هیبریدی هستند. هر کدام از این ساختارهای کربنی دارای خواص فیزیکی منحصر به فردی از جمله سختی، رسانایی حرارتی یا الکتریکی و رفتار روان‌کنندگی ویژه‌ای می‌باشند. با تغییر تناوب میان واحدهای تکرارشونده در ساختار گرافیت و الماس می‌توان دگرشکل‌های مختلفی از کربن به وجود آورد. با این حال، تا کشف تصادفی و پیش‌بینی نشده فولرین^۱ در سال ۱۹۸۵، الماس و گرافیت تا مدت‌ها به عنوان تنها دگرشکل‌های کربن شناخته می‌شدند. پس از کشف فولرین، خانواده دگرشکل‌های مصنوعی کربن با سنتز نانولوله‌های کربنی در سال ۱۹۹۱ و گرافن در سال ۲۰۰۴ به رشد خود ادامه داده است. ساختار دگرشکل‌های کربن در شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- سیر کشف دگرشکل‌های سنتزی کربن شامل فولرین، نانولوله‌های کربنی و گرافن

^۱ Fullerene

گرافن عبارت از صفحات تکی و جدا از هم گرافیت بوده و از این رو زیرمجموعه نانومواد دوبعدی طبقه‌بندی می‌شود. این ماده به‌عنوان مثال بارزی از کربن آروماتیک گسترده‌شده، تا سال‌ها صرفاً به‌صورت یک ماده نظری و انتزاعی در نظر گرفته می‌شد. برای ورقه‌ورقه‌شدن گرافیت و سنتز موفقیت‌آمیز لایه‌های جدا از هم گرافن از روش‌های ساده مکانیکی یا شیمیایی استفاده می‌شود. آندره گیم و کنستانتین نووسلوف^۱ به خاطر کشف روشی برای ورقه‌ورقه‌کردن گرافیت و نیز انجام تحقیقات موثر در زمینه بررسی خواص الکترونی گرافن به‌طور مشترک برنده جایزه نوبل فیزیک در سال ۲۰۱۰ شدند. گرافن به‌عنوان جوان‌ترین عضو از خانواده سه‌نفره دگرشکل‌های کربن، از نظر ساختاری یکنواخت‌ترین آن‌ها محسوب می‌شود، چرا که تنها توسیع‌های صفحه‌ای و ماهیت لبه‌های آن متغیر است.

صفحات گرافن با ضخامت یک اتم دارای خواص مکانیکی و الکترونی بسیار برجسته‌ای است که در عین ضخامت و وزن بسیار اندک خود از چقرمگی و انعطاف‌پذیری فوق‌العاده‌ای برخوردار است. این ماده دارای نسبت سطح به حجم بسیار بالایی بوده و خاصیت جذب سطحی گاز خوبی از خود نشان می‌دهد. رشد گرافن به‌دلیل ماهیت رسانای الکتریکی و حرارتی خود نسبت به مولکول‌های مختلف نفوذناپذیر است، به‌طوری که جریان الکترون‌ها بر روی سطح آن با سرعت بیشتری نسبت به سیلیکون انجام می‌شود. رسانایی الکتریکی و نوری گرافن و شناخته‌شدن آن به‌عنوان یک رسانای شفاف نویدبخش آینده بسیار درخشانی برای آن در کاربردهای مختلف است. در واقع، گرافن نماینده‌ای از فلزات آلی پایدار است که ایجاد تحرک بسیار بالای حامل‌های بار در آنها مستلزم فعال‌سازی بیشتر، آرایش^۲ توسط عناصر دیگر و یا انتقال بار نمی‌باشد. روش‌های مختلفی برای عامل‌دار کردن شیمیایی صفحات گرافن ابداع شده است و حاصل آن ظهور فناوری‌های مبتنی بر گرافن و بروز کاربردهای بالقوه بسیاری بر پایه آن بوده است. بنا به اظهار نظر فرانک ویلچک^۳ برنده نوبل فیزیک سال ۲۰۰۴، گرافن احتمالاً تنها سیستمی است که با استفاده از آن ایده‌های نظریه میدان کوانتومی منجر به کاربردهای بالقوه‌ای خواهد شد. ایده استفاده از گرافن در الکترونیک دیجیتال در سال ۲۰۰۴ با تحقق ترانزیستورهای اثر میدان بر پایه گرافن شکل گرفت. از ویژگی‌های فوق‌العاده این ترانزیستورها می‌توان به تحرک بسیار بالای حامل‌های بار در دمای اتاق، ظرفیت بسیار زیاد حامل بار و ضخامت بسیار اندک صفحات گرافن اشاره نمود. نشان داده شده است که صفحات

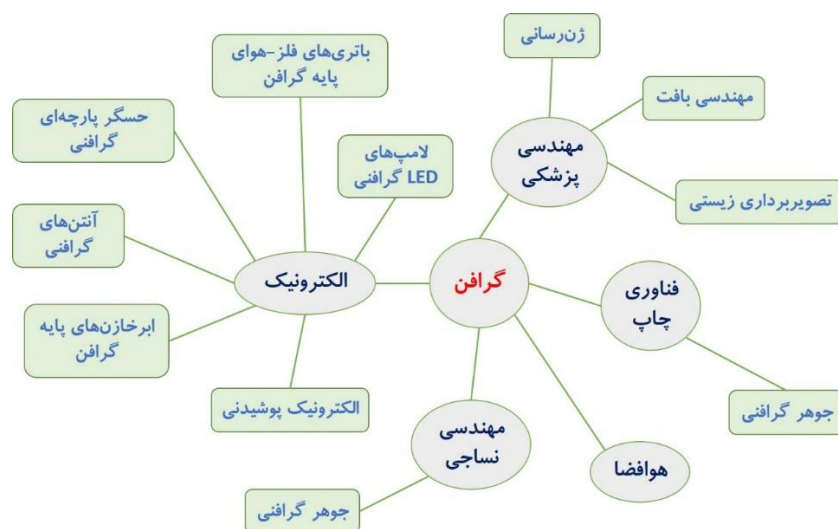
^۱ Andre Geim & Konstantin Novoselov

^۲ Doping

^۳ Frank Wilczek

گرافن می‌تواند الزامات الکتریکی و نوری مربوط به الکترودهای مورد استفاده در نمایش‌گرها و صفحه نمایش لمسی را برآورده کند. در مقایسه با مواد متداول مانند اکسید قلع ایندیم، الکترودهای گرافنی دارای انعطاف‌پذیری بیشتر و خواص مکانیکی بهتری هستند. به‌منظور پیشرفت دستاوردهای مرتبط با کاربردهای گرافن و تولید انبوه آن، عامل‌دار کردن شیمیایی صفحات گرافن ابزار قدرتمندی برای حل چالش‌های متعدد موجود در این حوزه از جمله بهبود حلالیت و فرایندپذیری، پایداری شیمیایی در محلول، جدایش و خالص‌سازی و نیز تولید ادوات مبتنی بر آن می‌باشد و

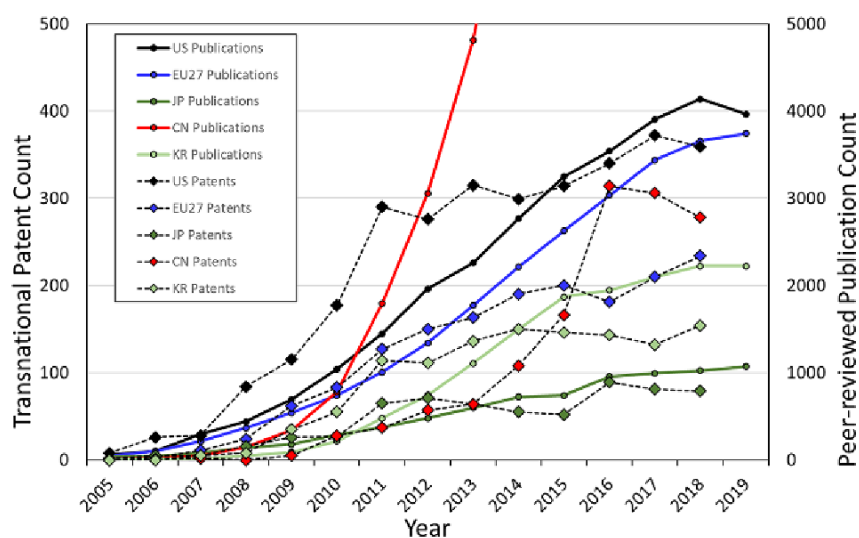
گرافن علاوه بر استفاده به‌عنوان ماده افزودنی برای تولید نانوکامپوزیت‌های متنوع با خواص ویژه، دارای کاربردهای مختلفی در حوزه‌های مهندسی پزشکی، الکترونیک، فناوری چاپ، مهندسی نساجی و صنایع هوافضا می‌باشد که به‌طور خلاصه در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- شمایی از حوزه‌های کاربردی گرافن و نمونه‌هایی از کاربرد گرافن در آنها.

با توجه به اهمیت این ماده، از زمان معرفی آن تاکنون فعالیت‌های علمی و کاربردی فراوانی در این حوزه انجام شده است. شکل زیر تعداد مقالات و پتنت‌های ثبت شده توسط کشورهای مختلف را در یک دهه اخیر نشان می‌دهد. داده‌های مربوط به مقالات در این نمودار از پایگاه آنلاین داده Scopus و داده‌های مربوط به پتنت‌ها از پایگاه داده PATSTAT متعلق به دفتر ثبت اختراع اروپا (EPO) و پایگاه داده آنلاین «شاخص ثبت اختراعات» (WPI) اقتباس شده است. پایگاه داده PATSTAT داده‌های مربوط به ۵۰ دفتر ثبت اختراع در سراسر جهان را پوشش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، مقالات علمی با نرخ ۸ تا ۱۰ برابر بیشتر از ثبت اختراعات در زمینه

حوزه‌های مختلف گرافن منتشر می‌شود. جالب اینکه تعداد پتنت‌ها در سال‌های اولیه با پویایی بالاتری در حال افزایش بوده و در سال‌های اخیر نیز به روند صعودی خود به خصوص در کشور چین، ادامه داده است. این در حالی است که تعداد مقالات منتشر شده نیز روز به روز در حال افزایش بوده اما روند آن از حالت نمایی به حالت خطی تبدیل شده است.



شکل ۳- نمودار رشد تعداد مقالات و پتنت‌ها در زمینه گرافن از سال ۲۰۰۵ تاکنون برای کشورهای مختلف شامل کره (KR)، ژاپن (JP)، اتحادیه اروپا (EU)، چین (CN)، و آمریکا (US). نمودارهای خط چین مربوط به ثبت اختراعات و نمودارهای توپر مربوط به مقالات پژوهشی منتشر شده هستند.

۲ برنامه‌های مراکز مهم در نقاط مختلف دنیا

❖ اتحادیه اروپا

برنامه پرچمدار گرافن اتحادیه اروپا^۱ (EGF) که منابع مالی آن توسط کمیسیون اروپا تأمین می‌شود، سال‌هاست برنامه‌هایی را با هدف ایجاد انقلاب فنتوری در دستور کار خود دارد و یکی از محورهای اصلی آن، خارج کردن گرافن از فضای آزمایشگاهی و وارد کردن آن به حوزه کاربردهای تجاری است. این موسسه نزدیک به ۱۷۰ همکار دانشگاهی و صنعتی را از ۲۲ کشور جهان گرد هم آورده است تا کلیه جنبه‌های مختلف گرافن و مواد مرتبط با آن را مورد مطالعه و بررسی قرار دهند. تاکنون، این برنامه توانسته است تعداد بسیاری از طرح‌های پژوهشی را با بودجه با بودجه ۱ میلیارد یورویی به سطح تجاری برساند. اخیراً کمیسیون اروپا با سرمایه‌گذاری اضافی ۲۰ میلیون یورویی، هزینه ایجاد خط آزمایشی برای تولید قطعات الکترونیکی پایه گرافن، قطعات اپتوالکترونیکی، و نانوحسگرها را تأمین کرده است. این برنامه سال‌هاست که در حال تجاری‌سازی محصولات پایه گرافن است که از مهم‌ترین دستاوردهای آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- پوشش‌های حرارتی مقاوم به سایش و عایق حرارت با نام تجاری RIXON-003
- حسگرهای گرافن هال با نام تجاری GHX-1
- کلوئیدهای پایدار گرافن با نام تجاری Sixonia's G-DISP
- جوهرهای رسانای نانوساختار با نام تجاری GXT
- روان‌کننده‌های صنعتی پایه گرافن با نام تجاری GXT
- راکت‌های تنیس با انعطاف‌پذیری بالا با نام تجاری Vibor-A
- کلاه ایمنی موتورسیکلت مبتنی بر گرافن
- آشکارساز آرایه خطی VIS-SWIR
- هدفون با نام تجاری Mediadevil CB-01

^۱ European Graphene Flagship

- لاستیک‌های انعطاف پذیر و مستحکم با نام تجاری AvanGRM

- واحد خنک کننده هوا با نام تجاری Elesia

- کیسه‌های تخلیه الکترواستاتیک برای قطعات الکترونیکی با نام تجاری GXT

این برنامه هم اینک روی تجاری‌سازی یازده محصول جدید کار می‌کند و نزدیک به ۱۵ بسته تشویقی نیز برای آنها در نظر گرفته است.

برنامه پرچمدار گرافن اتحادیه اروپا حوزه‌های کاربردی خوش‌آتیه گرافن را در نقشه راه ۱۰ ساله خود به چهار بخش تقسیم کرده است (شکل ۴ را ببینید).

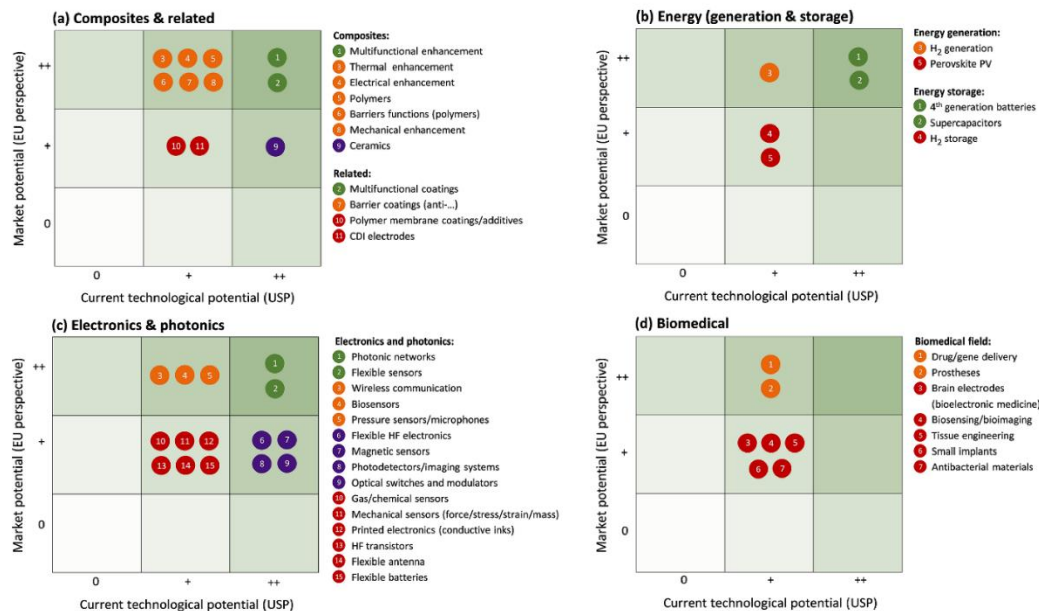
(۱) **ساخت نانوکامپوزیت‌های نوین:** می‌توان از گرافن به عنوان افزودنی مناسب به زمینه‌های مختلف جهت اصلاح خواص استفاده کرد. این اصلاح خواص می‌تواند با هدف ایجاد یک خاصیت جدید در کامپوزیت (مانند ایجاد رسانایی حرارتی و الکتریکی) یا ارتقای خاصیت موجود (مانند بهبود خاصیت مکانیکی) انجام شود. مباحث مهمی که در این حوزه کاربردی وجود خواهد داشت عبارت است از عامل‌دار کردن صفحات گرافن جهت ایجاد کلئوئید پایدار و یکنواخت یا توزیع مناسب در زمینه فلزی، پلیمری یا سرامیکی، مخاطرات زیست محیطی و بهداشتی، و نسبت فایده به هزینه. از کاربردهای دیگر گرافن می‌توان به افزودن آن به محلول‌ها و سیالات، غشاهای کاربردی مانند غشاهای مورد استفاده برای شیرین‌سازی آب یا تصفیه آن، و کاربردهای فوتوکاتالیستی در کنار اکسید تیتانیوم اشاره کرد.

(۲) **تولید و ذخیره‌سازی انرژی:** بخش تولید انرژی حوزه بسیار وسیعی است که در صورت نسبت فایده به هزینه مناسب، گرافن می‌تواند راه خودش را برای کاربردهای نانوالکترونیکی جدید باز کند. از مهم‌ترین کاربردهای این حوزه می‌توان به استفاده از گرافن به عنوان افزودنی به الکترودهای باتری‌های لیتیوم-یون، باتری‌های نسل چهارم (شامل باتری‌های لیتیوم-گوگرد، لیتیوم-هوا، و جریان اکسایش-کاهش)، و ابرخازن‌ها اشاره کرد. تاکنون کشورهای آسیایی بر بازار رو به رشد ذخیره‌سازی و تولید انرژی مسط بوده‌اند اما برای بهبود زیرساخت‌های مورد استفاده باید از گرافن استفاده شود. در این مورد، کشورهای اروپایی پیش‌تاز هستند و قطعات و تجهیزات الکترونیکی خاصی را برای ذخیره انرژی با بهره‌گیری از گرافن و سایر نانو ساختارهای کربنی توسعه می‌دهند. یکی دیگر از حوزه‌های مهم مربوط به ذخیره انرژی،

استفاده از گرافن در ساخت الکتروکاتالیست‌های مورد استفاده در پیل‌های سوختی است چرا که اگر بتوان گرافن را با نسبت فایده به هزینه بالا جایگزین فلزات نجیب مانند پلاتین کرد، هزینه ساخت تجهیزات به شدت کاهش پیدا می‌کند. در زمینه تولید انرژی‌های تجدیدپذیر نیز گرافن می‌تواند به عنوان جمع‌کننده بار الکتریکی در سیستم‌های فوتوولتائیک و سلول‌های خورشیدی پروسکایتی مورد استفاده قرار گیرد.

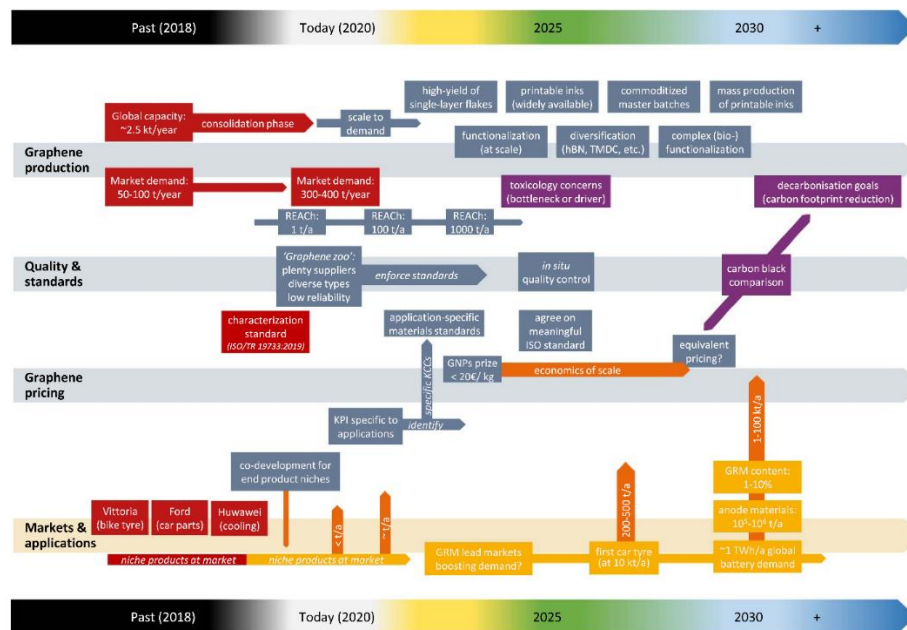
(۳) **نانوالکترونیک و نانوفوتونیک:** گرافن در حوزه نانوالکترونیک می‌تواند کاربردهای بسیار گسترده‌ای داشته باشد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به تجهیزات ارتباط از راه دور (Telecommunication)، حسگرها، قطعات اپتوالکترونیک، قطعات فوتونیک، ادوات محاسباتی، و الکترونیک پریتی و انعطاف‌پذیر (Wearable electronics) اشاره کرد. برای نمونه، از گرافن در ساخت بسته‌بندی‌های مورد استفاده در ساخت نیمه‌هادی‌ها و زیرساخت‌های نانوالکترونیک ارتباط از راه دور با سرعت بالا (۵G به بالا) استفاده می‌شود. از سوی دیگر، مشابه مواد دوبعدی نانوساختار، از گرافن نیز می‌توان در ساخت مدارات منطقی الکترونیک به منظور کاهش اندازه ادوات استفاده کرد.

(۴) **زیست‌پزشکی:** از گرافن در ساخت بخش‌های مختلف ادوات زیست پزشکی استفاده می‌شود که از مهم‌ترین آنها می‌توان به ساخت ادوات پزشکی با پوشش‌های پایه گرافن، کامپوزیت‌های تقویت شده با گرافن، و حسگرها اشاره کرد. همچنین اخیراً تلاش‌هایی برای استفاده از گرافن در حوزه دارورسانی هدفمند، ساخت برخی از داروها، و ادوات الکترونیک پوشیدنی در حال انجام است.



شکل ۴. تصویر کلی از کاربردهای خوش آتیه گرافن براساس نقشه راه موسسه پرچمدار گرافن اتحادیه اروپا.

این برنامه از سال ۲۰۱۸ نقشه راهی را برای توسعه گرافن در حوزه‌های مختلف صنعتی توسعه داده است. شمایي از نقشه راه سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۱۹، و ۲۰۲۰ این موسسه در شکل ۵ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مسیر صنعتی‌سازی گرافن از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ سیاست انقباضی داشته است بدین معنی که بیشتر بر روی ایجاد زیرساخت‌ها و بهبود کیفیت مسیر توسعه تمرکز شده تا افزایش کمیت تولید محصولات پایه گرافن. این محدوده زمانی با نوار قرمز در شکل ۴ نشان داده شده است. از سال ۲۰۲۰ تقاضای بازارهای جهانی برای چنین محصولاتی افزایش یافته اما نه با سرعتی که قبلاً توسط این موسسه پیش بینی می‌شد. به همین دلیل، تولیدکنندگان نیز از ابتدای سال ۲۰۲۰ تامین محصولات پایه گرافنی خود را افزایش داده‌اند و امروز فهرست بلندبالایی از این محصولات وجود دارد. برای نمونه، کارشناسان این موسسه پیش بینی می‌کنند شرکت خودروسازی فورد و شرکت هواوی در آینده نزدیک از جمله تولیدکنندگانی باشند که ترکیبات گرافنی را در تایر و وسایل الکترونیکی خود اضافه خواهند کرد تا از خواص مکانیکی و رسانایی الکتریکی آن در ساخت محصولات خودشان بهره ببرند.



شکل ۵. نقشه راه سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۳۰ موسسه پرچمدار گرافن اتحادیه اروپا برای صنعتی سازی تولید گرافن و محصولات پایه گرافنی.

❖ ایالات متحده آمریکا

۱) مرکز پوشش های چند منظوره نازک در مقیاس اتمی^۱ (ATOMIC) سه دفتر در ایالت های مختلف آمریکا دارد که تخصصی ترین آن در دانشگاه رایس مستقر شده است و به مطالعه پیرامون مواد دوبعدی از جمله گرافن می پردازد. این مرکز توسط هیات مشاوران صنعتی (Industry Advisory Board یا IAB) که به دنبال تجاری سازی نتایج پژوهشی است، حمایت و مدیریت می شود. این مرکز مجهز به چندین واحد مطالعاتی با تجهیزات پیشرفته است که از مهم ترین آنها می توان به واحد مشخصه یابی پیشرفته مواد دو بعدی، واحد نانو ساخت (nanofabrication)، و واحد شبیه سازی و محاسبات اشاره کرد. مهم ترین فعالیت این مرکز، ارتباط با ۴۰۰ شرکت در آمریکا و جهان و دریافت مشکلات فنی و صنعتی آنها در زمینه مواد دو بعدی و گرافن و تحقیق بر روی آنها به منظور حل چالش های پیش رو بوده است.

^۱ Center for Atomically Thin Multifunctional Coatings

(۲) مرکز تحقیقات مواد کرنل^۱ (CCMR) از تحقیق و توسعه بین‌رشته‌ای مواد در دانشگاه کرنل پشتیبانی می‌کند و میزبان بیش از ۱۰۰ نفر از اعضای هیئت علمی از چهار کالج مختلف است که بر روی پروژه‌های مختلف کار می‌کنند. این مرکز در حال حاضر سه گروه تحقیقاتی بین رشته‌ای دارد: گروه پژوهشی غشاهای اتمی، گروه پژوهشی مواد پیشرفته الکترونیکی، و گروه پژوهشی دستکاری مواد مهندسی. فعالیت غالب گروه مواد پیشرفته الکترونیکی، تجاری‌سازی مواد دوبعدی مانند گرافن در کاربردهای مختلف است. همچنین، غشاهای اتمی ساخته شده در این مرکز اغلب بر پایه صفحات گرافنی هستند.

(۳) مرکز تحقیقاتی توماس جی واتسون^۲ در سال ۱۹۶۱ تأسیس شده است و تحت نظر مرکز IBM (بزرگترین سازمان تحقیقاتی صنعتی جهان) به حمایت از پژوهش‌های صنعت‌محور می‌پردازد. یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد بررسی این مرکز، گرافن و کاربردهای مواد دوبعدی در صنعت است. این مرکز دوازده آزمایشگاه در شش قاره جهان دارد.

❖ انگلستان

(۱) مرکز نوآوری فرآیند^۳ (CPI) یک مرکز نوآوری در بریتانیا است که برای حمایت از صنعت تولید انگلستان تأسیس شده است. این مرکز با دانشگاه‌ها، شرکت‌های کوچک و متوسط، و شرکت‌های بزرگ تولید کننده همکاری می‌کند و چالش‌های نوآوران را در قالب پروژه تحقیق و توسعه، دریافت و با استفاده از تیم پژوهشی خود، آنها را رفع می‌کنند. اخیراً یکی از حوزه‌های همکاری این مرکز، کار بر روی طیف گسترده‌ای از فناوری‌های مرتبط با گرافن بوده است. این مرکز از ایده تا تجاری‌سازی و حتی تولید صنعتی و مداخله در زنجیره تامین محصول مشارکت می‌کند.

(۲) مرکز نوآوری مهندسی گرافن^۴ (GEIC) یک مرکز مهندسی چند ملیون پوندی وابسته به دانشگاه منچستر است که به جرات یکی از بزرگترین مراکز پژوهشی در زمینه گرافن می‌باشد. این مرکز تلاش می‌کند محصولات واقعی پایه گرافن را به بازار عرضه کند. هدف از تأسیس این مرکز، توسعه سریع و افزایش مقیاس

^۱ Cornell Center for Materials Research (CCMR)

^۲ Thomas J. Watson Research Center

^۳ Center for Process Innovation

^۴ Graphene Engineering Innovation Centre (GEIC)

گرافن و سایر مواد دوبعدی در کاربردهای صنعتی بوده است. این مرکز با انجمن مشاوران گرافن ارتباط نزدیکی دارد. تاکنون تمرکز این مرکز بر روی کاربردهای صنعتی زیر برای گرافن بوده است:

- کامپوزیت‌ها
- تولید و ذخیره انرژی
- غشاها
- جوهرها، فورمولاسیون‌ها و پوشش‌ها
- تولید صنعتی و مقیاس بالای گرافن
- توسعه روش‌های جدید برای مشخصه‌یابی گرافن و اندازه‌گیری خواص آن

❖ ایتالیا

مرکز آینده دانش‌بنیان ایتالیا^۱ (FBK) برترین موسسه تحقیقاتی در ایتالیا است که در سه حوزه علمی رتبه اول را در ایتالیا به دست آورده است. یکی از این حوزه‌ها مواد دوبعدی از جمله گرافن است. این مرکز با نزدیک به ۴۰۰ پژوهشگر، ۱۴۰ دانشجوی دکتری، ۲۰۰ دانشجوی فرصت مطالعاتی، و ۷۰۰ دانشجوی فعال دیگر، به فعالیت خود ادامه می‌دهد و سعی دارد با حمایت از بخش تحقیق و توسعه صنعت ایتالیا، موانع تولید را رفع کند.

❖ اسپانیا

مرکز ICFO یک موسسه تحقیقاتی نوپا است که با بیش از ۱۲ تیم دانشگاهی فعال، بر روی مواد دوبعدی مانند گرافن مطالعه می‌کند و هدف آن، رفع محدودیت‌های علمی حوزه فوتونیک و نور است. یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد پژوهش در این مرکز، تولید نور لیزر و قابلیت استفاده از مواد دوبعدی در فرآیند تشکیل آن است. این مرکز بودجه ۱ میلیارد دلاری از سازمان پرچمدار گرافن اتحادیه اروپا دریافت کرده است.

^۱ Future Built On Knowledge (FBK)

❖ استرالیا

مرکز رشد تولید پیشرفته^۱ یک سازمان صنعتی در کشور استرالیا است که از تجاری سازی محصولات دانش بنیان و پیشرفته پشتیبانی می کند و مرکزی را تاسیس کرده است که بر توسعه تجاری گرافن تمرکز دارد. این مرکز تاکنون بیش از ۲۳۶۱ شغل به وجود آورده و بیش از ۱,۲ میلیون دلار پروژه صنعتی را به نتیجه رسانده است و تلاش می کند گرافن را به حوزه تولید رنگ ها، روان کننده ها، و باتری وارد کند. یکی از پروژه های موفق که این مرکز انجام داده و به مرحله تجاری سازی رسانده، ساخت گرافن مایع است. در این محصول، گرافن به صورت یکنواخت و پایدار در زمینه حلال پخش شده (شکل ۶) تا بتواند در کاربردهای صنعتی به سهولت مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۶. گرافن مایع ساخته شده توسط مرکز رشد تولید پیشرفته

❖ مالزی

شرکت نانومالزی^۲ در سال ۲۰۱۱ به عنوان یک نهاد تجاری با هدف تجاری سازی فناوری نانو با پیشنهاد شورای ملی نوآوری زیر نظر وزارت علوم، فناوری و نوآوری این کشور آغاز به کار کرد. از مهمترین فعالیت های این نهاد می توان به موارد زیر اشاره کرد (منبع: <http://www.nanomalaysia.com.my/NanoMalaysia-Programmes/National-Graphene-Action-Plan>):

- تجاری سازی فعالیت های تحقیق و توسعه در حوزه فناوری نانو

^۱ Advanced Manufacturing Growth Centre

^۲ NanoMalaysia Bhd

- صنعتی سازی فناوری نانو
 - تسهیل فرایند سرمایه گذاری در فناوری نانو
 - توسعه و تقویت سرمایه انسانی در فناوری نانو
- شرکت نانومالزی تحت چهار برنامه کاملاً مشخص، خدمات نوآوری و تجاری سازی خود را به صنایع مختلف، دانشگاه ها و موسسات پژوهشی ارائه می کند. برنامه عملیاتی ملی گرافن^۱ (NGAP) یکی از برنامه های چهارگانه تجاری سازی موردنظر در حوزه فناوری نانو است که با تمرکز بر روی کاربردهای گرافن و تولید ارزش افزوده حاصل از آن ها در پنج حوزه کاربردی زیر توسط این شرکت تدوین شده است:

- آبرخازن ها یا آندهای باتری لیتیوم-یونی
- جوهرهای رسانا
- افزودنی های لاستیکی
- نانوسیال ها

برنامه ملی گرافن در سال ۲۰۱۴ و با هدف بهبود و توسعه کاربردهای پایین دستی ملی و توانمندسازی زیست بوم گرافن برای تسریع در پذیرش آن در صنایع پایین دستی آغاز به کار کرده است. هدف این برنامه اینطور بوده است که تا سال ۲۰۲۰، نزدیک به ۵ میلیارد دلار به درآمد ناخالص ملی افزوده و بیش از ۹۰۰۰ شغل برای مردم مالزی به ارمغان آورده است.

❖ سایر مراکز دنیا

علاوه بر مراکز متعددی که در بخش قبلی مرور شدند، مراکز بی شمار دیگری نیز هستند که هرکدامشان براساس سیاست تعریف شده توسط بخش های دولتی، پژوهش های عمیقی را در زمینه گرافن و توسعه آن در کاربردهای صنعتی انجام می دهند. از مهم ترین این مراکز می توان به موارد زیر اشاره کرد:

^۱ National Graphene Action Plan

- موسسه تحقیقات و مطالعات پیشرفته کاتالان^۱ (ICREA) اسپانیا
- موسسه میکروالکترونیک با کارایی بالا^۲ (IHP) آلمان
- مرکز IMEC^۳ بلژیک
- موسسه علوم مهندسی شیمی (ICE-HT) یونان^۴
- موسسه علم و فناوری کره (KIST)^۵
- آزمایشگاه ملی لارنس لیورمور، ایالات متحده^۶
- مرکز تحقیقاتی MackGraphe برزیل
- موسسه ملی علوم مواد^۷ (NIMS) ژاپن
- سازمان زیرساخت‌های هماهنگ ملی فناوری نانو (NNCI) ایالات متحده آمریکا^۸
- دپارتمان علوم مواد وزارت انرژی ایالات متحده آمریکا
- برنامه توسعه و تولید مواد پیشرفته یوتا (UAMMI) ایالات متحده آمریکا^۹

^۱ Catalan Institution for Research and Advanced Studies

^۲ Leibniz Institute for High Performance Microelectronics

^۳ Interuniversity Microelectronics Centre

^۴ Institute of Chemical Engineering Sciences

^۵ Korea Institute of Science and Technology

^۶ Lawrence Livermore National Laboratory

^۷ National Institute for Materials Science (NIMS)

^۸ National Nanotechnology Coordinated Infrastructure (NNCI)

^۹ Utah Advanced Materials and Manufacturing Initiative (UAMMI)

۳ بررسی مطالعات انجمن مشاوران گرافن

انجمن مشاوران گرافن^۱ یکی از بزرگترین مجموعه‌های بین‌المللی فعال در حوزه تحقیق، توسعه و مطالعات کاربردی برای تجاری‌سازی گرافن و مواد پیشرفته مرتبط با آن در سطح دنیا به شمار می‌رود. اطلاعات اولیه برای تحلیل زیست‌بوم این حوزه به‌طور مستقیم از بیش از ۳۰ هزار محقق، متخصص، مهندس و توسعه‌دهنده کاربرد گرافن توسط این انجمن استخراج می‌شود که حدود یک سوم آن‌ها در بخش‌های دانشگاهی و آکادمیک و دو سوم آن‌ها در بخش‌های تجاری فعال هستند.

یکی از برنامه‌های این انجمن، ارائه خدمات مشاوره به تیم‌های پژوهشی دانشگاهی، صنعتی و بخش‌های تحقیق و توسعه شرکت‌های تولید کننده محصولات پایه گرافن است تا بتوانند با دقت بالایی مواد خود را مشخصه‌یابی کرده و بتوانند در مسیر تجاری‌سازی قرار گیرند. همچنین برنامه‌ای تحت عنوان Verified Graphene Product نیز توسط این تیم بین‌المللی در حال اجرا است که در آن تلاش می‌شود نتایج تجربی تیم‌های پژوهشی به مرحله تولید محصول و عرضه به بازار برسد.

استدلال انجمن مشاوران گرافن برای راه‌اندازی برنامه Verified Graphene Product به شرح زیر است:

بازار گرافن یک محیط شلوغ و گیج‌کننده است و حداقل ۳۰۰ شرکت در سراسر جهان ادعا می‌کنند که مواد گرافنی با درجه و مورفولوژی‌های مختلف را تولید و عرضه می‌کنند. این درحالی است که بررسی‌های این انجمن بر روی ۳۰۰ محصول تجاری نشان می‌دهد که در کل، بیش از ۴۵ ویژگی مختلف برای این محصولات توسط تولیدکنندگان آنها ذکر شده است، اما هیچ یک از این خواص با یکدیگر مشترک نیست. به عبارت دیگر، کمتر از ۷۵ مورد از محصولات مورد بررسی از بین ۳۰۰ محصول، دارای مشخصات ذکر شده مشترک هستند. این امر باعث می‌شود که یک خریدار نتواند مواد را از تأمین‌کنندگان مختلف، بدون آزمایش هر نمونه و مقایسه آن با خواص محصولات شرکت‌های رقیب تهیه کند. نکته جالب‌تر این‌که مشخصه‌یابی کامل یک نمونه گرافنی در سطح جهان تقریباً ۱۲ تا ۱۵ هزار دلار هزینه دارد. به همین دلیل، انجمن گرافن، برنامه‌ای تحت عنوان Verified Graphene Producer را ایجاد کرده است تا به شرکت‌های معتبر گرافن کمک کند که وجه تمایز و برتری

^۱ Graphene Consultants Incorporation

محصولشان را نسبت به رقبای خود مشخص کنند و شفافیت زنجیره تامین را برای خریداران صنعتی فراهم نمایند. روش‌هایی که برای مشخصه‌یابی محصولات گرافنی در این برنامه در نظر گرفته شده است، مبتنی بر آخرین تحولات استانداردهای شناخته شده جهانی در حوزه گرافن، نظرسنجی از تولیدکنندگان گرافن، محققان و کاربران نهایی است. به بیان دیگر، مسیر مطالعه یک محصول گرافنی شامل بازرسی حضوری از خط تولید گرافن، نمونه‌برداری رندوم و تصادفی از محصولات گرافنی، مشخصه‌یابی آنها، و اعلام نظر مستقل در خصوص آنها توسط آزمایشگاه‌های شناخته شده و بین‌المللی است

یکی دیگر از خدمات این انجمن ایجاد بستری برای برقراری ارتباط موثر بین تولیدکنندگانی است که به دنبال بازارهای جدید هستند، و خریدارانی که به دنبال بهترین منبع گرافن در بازار هستند. از سوی دیگر، این مجموعه دفاتری را دایر کرده است و وظیفه آنها گرد هم آوردن تیم‌های فناور دانشگاهی است که در حوزه سنتز محصولات گرافنی فعالیت می‌کنند، شرکای تجاری که به دنبال تیم‌های فناور ماهر هستند، و سرمایه‌گذارانی که به دنبال مشارکت در تولید محصولات پربازده هستند. این انجمن ارتباط تنگاتنگی با مرکز مهندسی و نوآوری گرافن دانشگاه منچستر انگلستان (GEIC)^۱ دارد.

انجمن گرافن از سال ۲۰۱۳ کارگروهی را برای تدوین استانداردهای بین‌المللی برای محصولات گرافنی تشکیل داده است و هم‌اکنون بخش زیادی از استانداردهای ISO و ASTM توسط این کارگروه نوشته و به روزرسانی می‌شود. از مهم‌ترین این استانداردها که امروزه در سطح صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد می‌توان به ISO/TR ۱۹۷۳۳:۲۰۱۹(E)، ISO/TS ۸۰۰۰۴-۱۳:۲۰۱۷(E) و ISO/TS ۲۱۳۵۶-۱:۲۰۲۱(E) اشاره کرد.

اولین مطالعه جهانی در زمینه اکوسیستم گرافن در سال ۲۰۱۶ توسط انجمن گرافن انجام شد. در سال ۲۰۲۰، جامعه گرافن توسط این انجمن مورد مطالعه و بررسی مجدد قرار گرفت و شرکت‌هایی که هنوز از گرافن استفاده نمی‌کنند اما در عین حال، ظرفیت استفاده از آن را مورد ارزیابی قرار می‌دهند، در این اکوسیستم گنجانده شدند. بیش از ۸۰۰ شخص و سازمان در تدوین ویرایش نهایی این مطالعه مشارکت داده شدند و بازخورد آنها مجموعه‌ای غنی از اطلاعات و دیدگاه‌های مرتبط با این حوزه را فراهم کرده است. تدوین این مجموعه داده‌ها به درک هر چه بهتر جایگاه کنونی بازار گرافن بسیار کمک کرده است.

^۱ The University of Manchester's Graphene Engineering and Innovation Centre

گستره کاربردهای بالفعل و بالقوه گرافن در صنایع مختلف به طور شگفت‌انگیز و انکارناپذیری در سراسر این مطالعه قابل مشاهده است که منشا آن بدون تردید به خصوصیات عملکردی بسیار وسیع این ماده باز می‌گردد. در واقع، می‌توان مدعی شد که گرافن تنها ماده‌ای است که به‌طور همزمان نازک‌ترین، با استحکام‌ترین، رساناترین ماده از نظر الکتریکی و حرارتی و دارای بهترین خواص حفاظتی و روان‌کنندگی می‌باشد. گستره کاربردی گرافن شامل پوشش‌ها، پلاستیک‌ها، ذخیره انرژی، نساجی، فیلتراسیون، کامپوزیت‌ها، چاپ قطعات الکترونیکی، مواد زیستی، حفاظت الکترومغناطیسی، کنترل خوردگی، لایه‌های نازک، روان‌کنندگی، انتقال حرارت و غیره می‌شود. با بهبود کیفیت، تولید انبوه، کنترل فراورش و کاهش هزینه تولید گرافن، این ماده در سال ۲۰۲۱ در حال نزدیک شدن به نقطه عطف خود است.

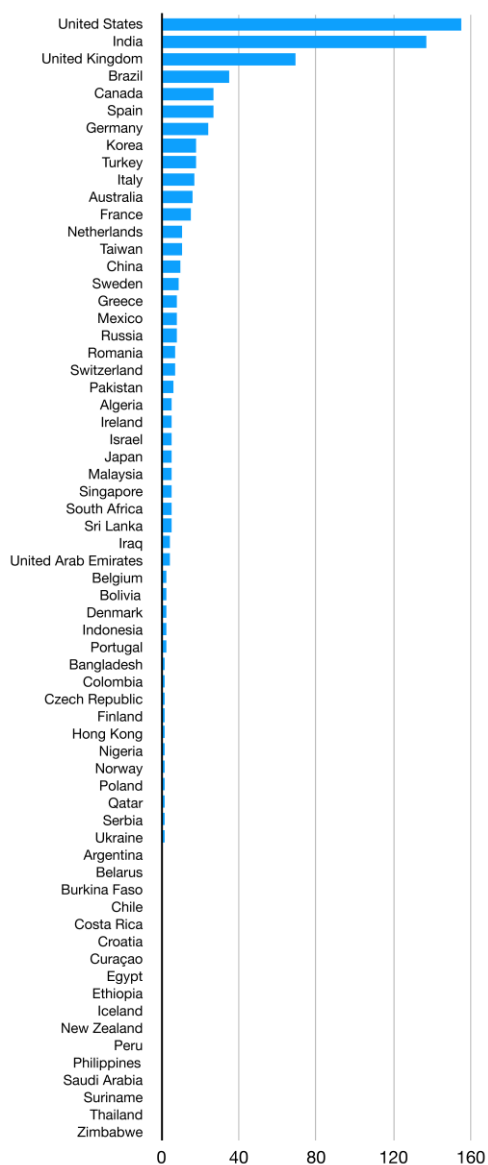
از مهمترین اهداف اولیه این مطالعه پاسخ به سوالات زیر است:

- کدام یک از اشکال مختلف گرافن برای کدام کاربرد موردنظر مناسب‌تر است؟
- خواص عملکردی گرافن چه ارتباط معناداری با کاربرد موردنظر دارد؟
- در میان کاربردهای گرافن، کدام یک متداول‌ترین و مهمترین کاربرد است؟
- کدام یک از استانداردها، ضوابط نظارتی یا دستورالعمل‌های صنعتی مهم‌تر و مناسب‌تر هستند؟
- موانع موجود بر سر راه پذیرش تجاری بیشتر گرافن کدامند؟
- گرافن از سال ۲۰۱۶ تاکنون چه مسیری را پیموده است؟

❖ وضعیت کشورها در بازار گرافن

در این مطالعه ۶۵ کشور، از آمریکا تا یونان، با در نظر گرفتن فراوانی داده‌های به دست آمده از کشورهای با بیشترین توجه و تجربه در حوزه مواد گرافنی مشارکت داشته‌اند. توزیع وسیع کشورهای درگیر در این حوزه نشان‌دهنده آن است که گرافن به‌عنوان یک ماده متداول تجاری به شکل بین‌المللی در حال بلوغ است. شرکت‌کنندگان نوع فعالیت خود پیرامون گرافن را که بیشترین مطابقت را با اهداف سازمانی آن‌ها داشت، مشخص

کردند که بسته به موضوع فعالیت‌شان می‌توانست چندین پاسخ را شامل شود. برای نمونه، یک دانشگاه یا یک تولیدکننده تجاری گرافن ممکن است علاوه بر تولید انواع مختلف گرافن، به‌طور همزمان در حال انجام پژوهش و توسعه کاربردهای مختلفی از آن نیز باشد. نمودار فراوانی شرکت‌کنندگان به تفکیک کشورها در شکل ۷ آورده شده است. تمامی شرکت‌کنندگان از میان اعضای انجمن گرافن، سازمان‌ها و جامعه جهانی گرافن انتخاب شده‌اند که شامل شرکت‌های بزرگ چندملیتی، موسسات برجسته دانشگاهی و طیف وسیعی از تولیدکنندگان عمده فعال در حوزه گرافن و شرکت‌های واسطه می‌شوند.



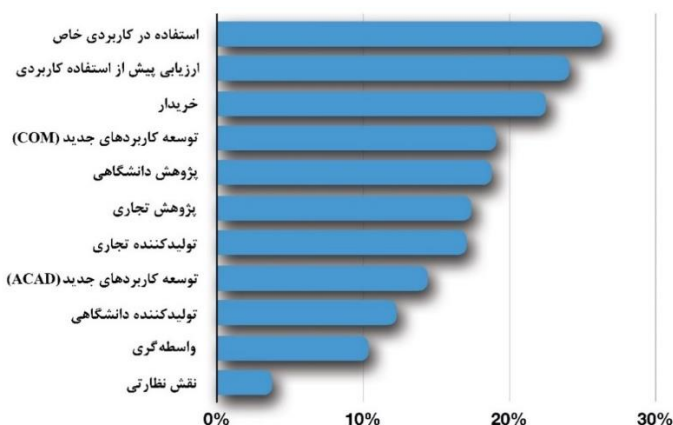
شکل ۷. نمودار فراوانی متخصصین و نهادهای فعال در حوزه گرافن شرکت‌کننده در این مطالعه به تفکیک کشورها.

نمودار توزیع فراوانی نهادهای تجاری در مقایسه با سازمان‌های دانشگاهی (شکل ۸) آینه تمام‌عیاری از توزیع نهادهای تجاری و دانشگاهی در جامعه جهانی فعال در حوزه گرافن است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، از میان ۸۰۰ شرکت و نهاد تجاری و دانشگاهی، دو سوم از آن‌ها جزو نهادهای تجاری و یک سوم از آن‌ها جزو موسسات دانشگاهی یا دولتی هستند. از میان ۳۰ هزار متخصص فعال در حوزه گرافن نیز همین نسبت یک سوم به دو سوم برای توزیع فراوانی متخصصین دانشگاهی و فعالین تجاری مشاهده شد.



شکل ۸. نمودار توزیع فراوانی نهادهای تجاری در مقایسه با سازمان‌های دانشگاهی فعال در حوزه گرافن.

داده‌های جمع‌آوری شده بر اساس نحوه سروکار داشتن افراد با گرافن طبقه‌بندی شدند؛ اینکه آیا آن را تولید می‌کنند، آیا از آن برای کاربردی خاص استفاده می‌کنند، آیا بر روی آن پژوهش انجام می‌دهند، به دنبال توسعه کاربردهای بالقوه‌ای برای آن هستند و غیره. دسته بخصوصی از شرکت‌کنندگان نیز وجود دارد که هنوز با گرافن کار نمی‌کنند، اما استفاده از آن را برای پاسخ به نیازها و تامین منویات خود مورد ارزیابی قرار می‌دهند. خاطر نشان می‌شود که کمک به درک نیاز مشتریان بالقوه و مصرف‌کنندگان آتی گرافن بسیار حائز اهمیت است. بر این اساس، نمودار توزیع فراوانی از نوع سروکار داشتن شرکت‌کنندگان با گرافن در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۹. نمودار توزیع فراوانی برای نوع سروکار داشتن متخصصین و نهادهای فعال علمی و تجاری در حوزه گرافن.

همان‌طوری که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، ۲۶ درصد متخصصین و نهادهای فعال در حوزه گرافن دست‌کم از آن در کاربردهای مشخص تجاری و توسعه‌ای استفاده می‌کنند. این امر به‌وضوح موید آن است که مواد گرافنی در حال حرکت از آزمایشگاه به قلمرو تجاری است. همچنین، ۲۴ درصد فعالان با آنکه در حال حاضر هنوز از گرافن استفاده نمی‌کنند، اما علاقه‌مند به استفاده از آن بوده و در حال ارزیابی و تحقیق در زمینه ظرفیت‌های بالقوه استفاده از آن در کاربردهای موردنظر خود هستند. این آمار شاخص بسیار مهمی از پذیرش بالقوه گرافن در آینده‌ای نزدیک است و در صورت پیوستن آن‌ها به فعالان حال حاضر، سطح کاربرد گرافن را تا ۵۰ درصد افزایش خواهد داد. شاخص قدرتمند دیگری از میزان فعالیت تجاری در حوزه گرافن عبارت از آن است که ۲۳ درصد از تمامی فعالین مشارکت‌کننده در این مطالعه جزو خریداران مواد گرافنی هستند.

نگاه به میزان فعالیت‌های پژوهشی در شکل ۹ نشان می‌دهد که سازمان‌ها و موسسات دانشگاهی که در حال پژوهش روی گرافن هستند، ۱۹ درصد کل فعالان این حوزه را تشکیل می‌دهند. از میان ۲۵۰ سازمان و موسسه دانشگاهی مورد مطالعه، بیش از ۷۸ درصد از آن‌ها در حال پژوهش بر روی مواد گرافنی و کاربردهای مختلف آن هستند. سازمان‌های تجاری (شامل تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان مواد گرافنی) فعال در حوزه فعالیت‌های پژوهشی مرتبط با گرافن، ۱۷ درصد از کل فعالان و ۳۹ درصد از کل سازمان‌های تجاری مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند که درصد نسبتاً بالایی به شمار می‌رود. تحقیقات انجام‌شده و یا در حال انجام از سوی واحدهای تجاری که به‌صورت جدی بر روی توسعه کاربردهای تجاری گرافن تمرکز کرده‌اند، دارای ارزش و تاثیرگذاری به‌مراتب بیشتری هستند.

نتایج نشان داده شده در شکل ۹ حاکی از آن است که در زمینه توسعه کاربردهای جدید مرتبط با گرافن، بیش از ۱۹ درصد از فعالان این حوزه در سطح تجاری و ۱۴ درصد از آن‌ها در سطح دانشگاهی (مجموعاً ۳۳ درصد از کل فعالان این حوزه) بر روی توسعه کاربردهای جدید گرافن هدف‌گذاری کرده‌اند که تنها اندکی پایین‌تر از میزان فعالیت‌های پژوهشی است. انتظار می‌رود که با ادامه رشد و بلوغ گرافن، تعداد سازمان‌هایی که بر روی توسعه کاربردی گرافن متمرکز شده‌اند، از تعداد سازمان‌هایی که تمرکز اصلی آن‌ها روی فعالیت‌های پژوهشی است، پیشی خواهد گرفت. این اتفاق به‌ویژه با رفع موانع متعدد بر سر راه تولید انبوه، مدیریت، توزیع و قیمت‌گذاری محصولات مرتبط با گرافن در آینده‌ای نزدیک قابل‌پیش‌بینی است.

به همین ترتیب، تولیدکنندگان گرافن نیز به دو گروه تجاری و دانشگاهی دسته‌بندی شده‌اند که به‌ترتیب ۱۷ و ۱۲ درصد از کل فعالان مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند. تفکیک تولیدکنندگان به دو دسته دانشگاهی و تجاری از آن حیث حائز اهمیت است که بسیاری از موسسات دانشگاهی، گرافن تولیدی خود را اساساً صرف انجام فعالیت‌های تحقیق و توسعه کاربردی خود می‌کنند و لذا عملاً فروشی ندارند. از طرف دیگر، برخی از تولیدکنندگان تجاری گرافن نیز در واقع، تمامی گرافن تولیدی خود را به‌صورت داخلی برای تولید محصولات دارای ارزش افزوده یا تهیه مسترَبِج با فرمولاسیون مختلف مورد استفاده قرار می‌دهند و لذا میزان فروش گرافن تولیدی آن‌ها به‌عنوان ماده اولیه صفر است.

همان‌طوری که در نمودار شکل ۹ مشاهده می‌شود، ۱۰ درصد از فعالان مورد مطالعه به‌عنوان سازمان‌های واسطه مشخص شده‌اند که شامل تولیدکنندگان مواد خام یا کالاهای نیم‌ساخته، ارائه‌دهندگان خدمات عامل‌دار کردن و دیگر فرایندهای اصلاح گرافن می‌شوند. در نهایت، ۴ درصد از فعالان این حوزه را نیز ارگان‌های نظارتی تشکیل می‌دهند که شامل سازمان‌های تدوین‌کننده استانداردها، نهادهای نظارتی و ادارات دولتی هستند.

❖ نگاه کاربردی به بازار گرافن

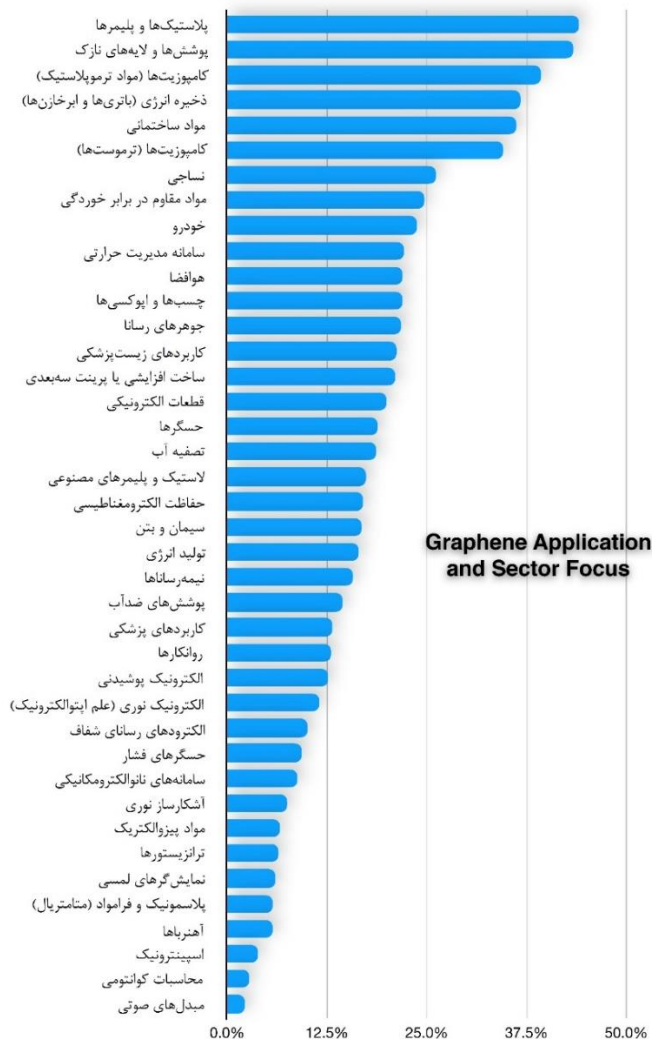
مواد گرافنی دارای تنوع بسیار زیادی بوده و تاکنون بیش از ۴۰ حوزه کاربردی مشخص برای آن‌ها تعریف شده است. منشا کاربرد گسترده این مواد عبارت از وجود ترکیب منحصر به فردی از خواص گوناگون شامل استحکام، رسانایی الکتریکی و حرارتی، مدول خمشی، خواص حفاظتی و غیره برای آن است. علاوه بر این، با وجود آنکه گرافن اغلب به‌دلیل برخورداری از ویژگی خاصی در یک کاربرد مشخصی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مشاهده می‌شود که ماهیت چندعملکردی گرافن، خواص ثانویه پیش‌بینی‌نشده و سودمندی به آن می‌بخشد.

برای مثال، در صنعت استخراج معدن، گرافن با هدف محافظت از قطعات فلزی زیرین به آستر فداشونده از جنس پلی‌یورتان افزوده می‌شود. هدف اولیه افزودن گرافن عبارت از توانایی آن برای بهبود مقاومت به سایش سطح قطعات به میزان ۳۵ درصد بوده است. با این حال، اضافه‌شدن مقدار اندک گرافن به آستر فداشونده پلیمری موجب افزایش مقاومت آن در برابر اشتعال می‌شود که پارامتر مهمی در تجهیزات جوشکاری به شمار می‌رود که معمولاً در مجاورت اجزای پلاستیکی به کار گرفته می‌شوند. به عنوان مثال دیگری از خواص ثانویه گرافن، مقادیر بسیار اندک آن (۰/۰۲ درصد وزنی) برای بهبود استحکام فشاری (به میزان ۳۵ درصد) و خمشی (۲۰ درصد) بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اینجا، بهبود استحکام فشاری و خمشی بتن به‌عنوان هدف اولیه از افزودن گرافن در نظر گرفته می‌شود. با این حال، افزودن گرافن تاثیر بسیار قابل‌ملاحظه‌ای در افزایش سرعت گیرش بتن و لذا صرفه‌جویی در زمان موردنیاز برای ساخت‌وساز از خود نشان می‌دهد. علاوه بر این، حضور گرافن باعث کاهش میزان نفوذپذیری آب پس از فرایند گیرش بتن و در نتیجه، افزایش طول عمر محصول نهایی به‌ویژه در محیط‌های دریایی می‌شود.

به عنوان مثال دیگری از خواص ثانویه گرافن، افزودن گرافن به مواد ترموپلاستیک، معمولاً به‌منظور افزایش استحکام آن، بهبود مقاومت آن در برابر تابش اشعه فرابنفش و یا افزایش نقطه تغییرشکل حرارتی^۱ آن انجام می‌شود. از آنجایی که این مواد در اغلب موارد تحت روزن‌رانی یا اکستروژن قرار می‌گیرد، حضور گرافن موجب افزایش سرعت فرایند اکستروژن و در نتیجه، افزایش بازده آن می‌شود.

نمودار توزیع فراوانی کاربردهای توسعه‌یافته برای گرافن در مقیاس شرکت‌ها و نهادهای مورد مطالعه در شکل ۱۰ آورده شده است. لازم به ذکر است که هزینه استفاده از گرافن به‌عنوان ماده افزودنی به ساختار مواد مختلف تنها یک روی سکه بوده و به‌دلیل افزودن مقادیر بسیار اندک آن، چنان که برخی می‌پندارند، چندان باعث افزایش هزینه تولید محصول نهایی نخواهد شد. نکته‌ای که مصرف‌کنندگان بالقوه گرافن بایستی برای استفاده از گرافن در کاربرد موردنظر خود بدان توجه کنند آن است که مزایای کلی استفاده از گرافن و موازنه قیمت-عملکرد آن را در نظر داشته باشند. استفاده از گرافن به‌عنوان افزودنی مستلزم ایجاد کمترین تغییر در تجهیزات اصلی موردنیاز یا فرایندهای مورد استفاده برای تولید محصول نهایی است. این بدان معنی است که موانع بسیار کمی بر سر راه استفاده از مواد گرافنی در صنایع مختلف وجود دارد.

^۱ Thermal deformation point



شکل ۱۰. نمودار توزیع فراوانی کاربردهای توسعه‌یافته در مقیاس شرکت‌ها و نهادهای فعال دانشگاهی و تجاری مورد مطالعه در حوزه گرافن.

❖ جایگاه اشکال مختلف گرافن تجاری از نگاه بازار

در این بخش با جزئیات بیشتری به بحث پیرامون اشکال مختلف گرافن تجاری موجود در بازار می‌پردازیم. در حالت کلی، می‌توان گرافن را به دو گروه بسیار گسترده گرافن بالک و گرافن تک‌لایه دسته‌بندی نمود. گرافن بالک به اشکالی از گرافن اطلاق می‌شود که با وجود آنکه شامل تک‌لایه‌های گرافنی هستند، معمولاً از گرافن

چندلایه تشکیل شده‌اند. نانوصفحات گرافن^۱ (GNPs)، اکسید گرافن^۲ (GO)، اکسید گرافن احیاشده^۳ (rGO) و اشکال دیگر گرافن که غالباً به شکل پودر سیاه عرضه می‌شوند، در گروه گرافن بالک قرار می‌گیرند. گرافن تک‌لایه شامل یک لایه اتمی تنها معمولاً با استفاده از فرایندهای موسوم به لایه‌نشانی شیمیایی از فاز بخار (CVD) تولید می‌شوند و به شکل یک صفحه بر روی یک زیرلایه یا ویفر و یا جدا از آن عرضه می‌شود.

به تجربه نشان داده شده است که هر یک از اشکال خاص گرافن برای استفاده در کاربردهای معینی مناسب‌تر هستند. البته ممکن است در برخی از کاربردها، هر دو شکل گرافن بالک و تک‌لایه مورد استفاده قرار گیرد. شکل گرافن متداول مورد استفاده در کاربردهای مختلف در جدول ۱ مشخص شده است.

جدول ۱- شکل مناسب گرافن برای کاربردهای مختلف آن.

کاربرد گرافن	شکل مناسب گرافن
ساخت افزایشی یا پرینت سه‌بعدی	بالک
هوافضا	بالک/تک‌لایه
خودرو	بالک
کاربردهای زیست‌پزشکی	بالک/تک‌لایه
کامپوزیت‌ها (ترموپلاستیک)	بالک
کامپوزیت‌ها (ترموست)	بالک
سیمان و بتن	بالک
جوهرهای رسانه	بالک
مواد مقاوم به خوردگی	بالک
قطعات الکترونیکی	تک‌لایه
حفاظت الکترومغناطیسی	بالک
تولید انرژی	بالک/تک‌لایه
ذخیره انرژی (باتری و ابرخازن)	بالک
چسب‌ها و اپوکسی‌ها	بالک
پوشش‌ها و لایه‌های نازک	بالک/تک‌لایه
روانکارها	بالک
آهنرباها	بالک
کاربردهای پزشکی	بالک/تک‌لایه

^۱ Graphene Nanoplatelets

^۲ Graphene Oxide

^۳ reduced Graphene Oxide

سیستم‌های نانو الکترومکانیکی	تک لایه
اپتوالکترونیک	تک لایه
آشکارساز نوری	تک لایه
مواد پیزوالکتریک	تک لایه
پلاسمونیک و فرامواد	تک لایه
پلیمرها و پلاستیک‌ها	بالک
حسگرهای فشار	تک لایه
محاسبات کوانتومی	تک لایه
لاستیک و پلیمرهای مصنوعی	بالک
نیمه‌رساناها	تک لایه
حسگرها	تک لایه
مبدل‌های صوتی	بالک
اسپینترونیک	تک لایه
مواد ساختمانی	بالک
نساجی	بالک
سامانه‌های مدیریت حرارتی	بالک
نمایش‌گرهای لمسی	تک لایه
ترانزیستورها	تک لایه
الکترودهای رسانای شفاف	تک لایه
تصفیه آب	بالک/تک لایه
پوشش‌های ضد آب	بالک
الکترونیک پوشیدنی	بالک/تک لایه

در حالت کلی، در کاربردهای الکترونیک و حسگری از شکل تک لایه گرافن استفاده می‌شود، در حالی که معمولاً گرافن بالک به عنوان افزودنی در کاربردهای دیگر به کار می‌رود. لازم به ذکر است که تقریباً در هیچ یک از موارد کاربردی مطرح شده در جدول ۱، از محصولات یا ادواتی که تماماً از گرافن ساخته شده باشد، استفاده نمی‌شود. حتی در مواردی که از گرافن تک لایه برای کاربردهای حسگری دقیق استفاده می‌شود نیز، گرافن تنها بخشی از سیستم است.

در ادامه به نکات کاربردی پیرامون استفاده از گرافن اشاره می‌کنیم:

- افزودن مقادیر بسیار اندک گرافن (کمتر از ۱ درصد یا حتی ۰/۱ تا ۰/۰۱ درصد وزنی) می‌تواند تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی عملکرد سیستم داشته باشد.
 - عوامل موثر بر میزان و نحوه عملکرد و تاثیر گرافن در کاربردهای مختلف عبارتند از مورفولوژی، شیمی سطح و وجود گروه‌های عاملی شیمیایی بر روی آن، عامل دار کردن و فاکتور شکل (حالت پودری، خمیری یا محلولی). تعیین صحیح گرافن مناسب برای کاربرد موردنظر بسیار دارای اهمیت است.
 - استفاده موفق از گرافن در یک کاربرد مشخص ارتباط تنگاتنگی با نحوه فرآوری و کنترل پارامترهای فرایندی از جمله استفاده از روش‌های پخش مناسب آن دارد. با وجود دسترسی گسترده به گرافن، کار با آن نیازمند تخصص، مهارت و تجربه فراوانی است.
 - علی‌رغم استفاده از گرافن با درصدهای وزنی اندک، در بسیاری از کاربردها حجم قابل‌توجهی از آن موردنیاز خواهد بود. بنابراین، انتخاب تولیدکنندگان و تامین‌کنندگانی که دارای ظرفیت تولید انبوه و تامین پیوسته گرافن با کیفیت تکرارپذیر باشند، بسیار حائز اهمیت است.
- انجمن گرافن با تولیدکنندگان عمده گرافن و توسعه‌دهندگان کاربرد آن از جمله مرکز نوآوری مهندسی گرافن^۱ (GEIC) در دانشگاه منچستر انگلستان همکاری می‌کند. هدف‌گذاری این مرکز عبارت از کمک به شرکت‌های مختلف برای طراحی، ساخت و ارزیابی سریع‌تر کارایی نمونه‌های اولیه مبتنی بر گرافن است. انجمن گرافن نیز به شیوه مشابهی با موسسه مک‌گراف^۲ واقع در دانشگاه مکنزی پرسبیتترین^۳ سن‌پائولوی برزیل در حال همکاری است. یکی از رسالت‌های این انجمن کمک به ایجاد ارتباط میان سازمان‌های علاقه‌مند به استفاده از خواص گرافن در تولید نسل جدید محصولات و کاربردهای خود و شرکای واجد شرایط بوده و آماده ارائه مشاوره به‌منظور صرفه‌جویی در وقت و هزینه‌های تحقیق و توسعه می‌باشد.

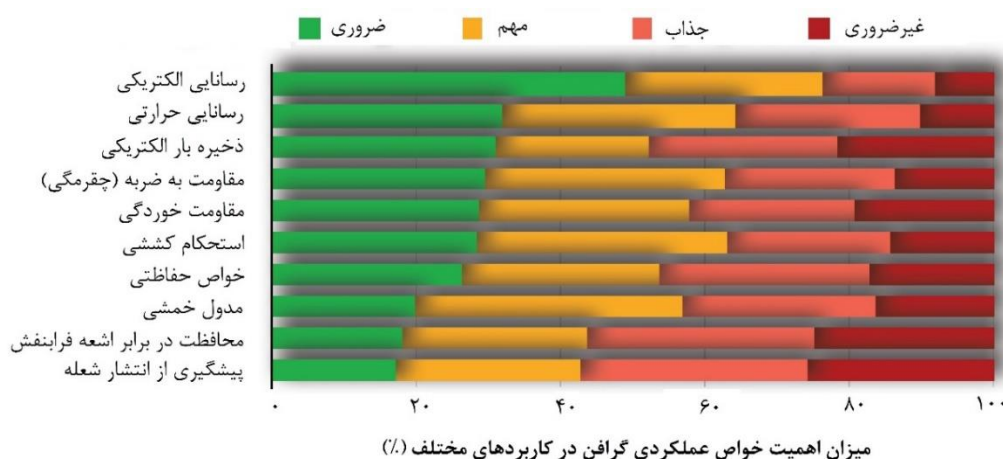
❖ اهمیت ویژگی‌های عملکردی گرافن از نگاه بازار

^۱ Graphene Engineering Innovation Centre

^۲ MackGraphe Institute

^۳ Mackenzie Presbyterian University

گرافن دارای چندین ویژگی بارز و سودمند است که در عمل به صورت همزمان خود را نشان می دهند. با این حال، برخی از خواص ویژه آن نسبت به کاربرد موردنظر دارای اهمیت و ظهور و بروز بیشتری است. تحلیل عمیق تر داده های جمع آوری شده از ارتباط میان خواص و کاربردهای گرافن، امکان تشخیص مناسب ترین خواص در کاربردهای موردنظر را فراهم می کند. خلاصه ای از متداول ترین و کاربردی ترین خواص عملکردی گرافن در شکل ۱۱ آورده شده است.



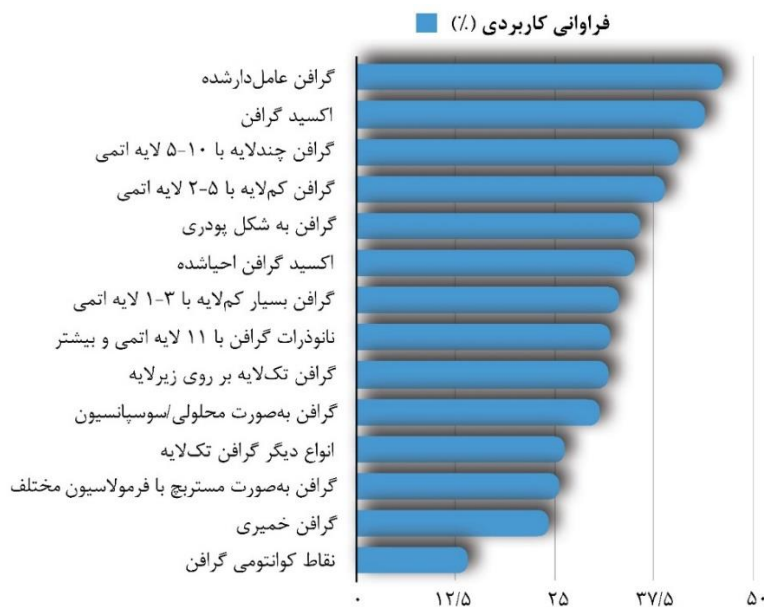
شکل ۱۱. نمودار میزان اهمیت خواص عملکردی گرافن در کاربردهای مختلف به عنوان شاخصی از متداول ترین و کاربردی ترین خواص آن.

همان طوری که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، رسانایی الکتریکی گرافن مهم ترین و متداول ترین ویژگی آن برای استفاده در محصولات و حوزه های مختلف کاربردی است. پس از آن، رسانایی حرارتی قرار دارد که خاصیت عملکردی تکمیلی در بسیاری از کاربردهای الکتریکی گرافن است. سومین خاصیت کاربردی گرافن عبارت از قابلیت ذخیره بار الکتریکی آن است. این ویژگی نیز یک خاصیت تکمیلی برای خواص رسانایی الکتریکی و حرارتی گرافن است. پنج ویژگی کاربردی دیگر گرافن شامل مقاومت به ضربه، مقاومت به خوردگی، استحکام کششی، خواص حفاظتی و مدول خمشی گرافن همگی جزو خواص فیزیکی آن محسوب می شوند. این خواص معمولاً زمانی بروز می کنند که گرافن به عنوان ماده افزودنی برای بهبود خواص مواد مختلف پلیمری و کامپوزیتی یا کاربردهای مشابه دیگری مورد استفاده قرار گیرد. تاثیر گرافن در محافظت از اشعه فرابنفش و پیشگیری از انتشار شعله از دیگر خواص مهم گرافن به شمار می روند که اغلب به همراه خواص دیگر بروز می کنند.

طیف گسترده خواص کاربردی گرافن منشا اصلی استفاده گسترده از آن در بیش از ۴۰ کاربرد مشخص در صنایع و بخش‌های مختلف است. گذشته از این، اشکال مختلف گرافن با مشخصات مختلف ساختاری و عملکردی، گزینه‌های متنوعی را برای انتخاب مناسب‌ترین شکل آن برای استفاده در کاربرد موردنظر را در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌دهند.

❖ جایگاه تجاری اعضای خانواده گرافن از نگاه بازار

همانطوری که گفته شد، گرافن از دیدگاه تجاری تنها به صورت یک ماده نبوده و به عنوان خانواده‌ای از مواد پیشرفته، طیف وسیعی از تک‌لایه‌های اتمی از اتم‌های کربن تا موادی با ضخامت بیش از ۱۰ لایه اتمی کربن را شامل می‌شود. تعداد لایه‌های اتمی کربن تنها یکی از وجوه تمایز برای دسته‌بندی اشکال مختلف گرافن است. ابعاد جانبی ورقه‌های گرافن، حضور یا عدم حضور عیوبات و نواقص ساختاری در ساختار بلوری تک‌لایه‌های اتمی کربن، ورود اکسیژن یا عناصر دیگر به سیستم و فاکتور شکل (پودر خشک، خمیری، محلولی و غیره) از مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده نوع گرافن مناسب برای استفاده در کاربرد موردنظر به شمار می‌روند. اشکال مختلف گرافن تجاری و میزان کاربرد هر یک از آن در نمودار شکل ۱۲ نشان داده شده است.



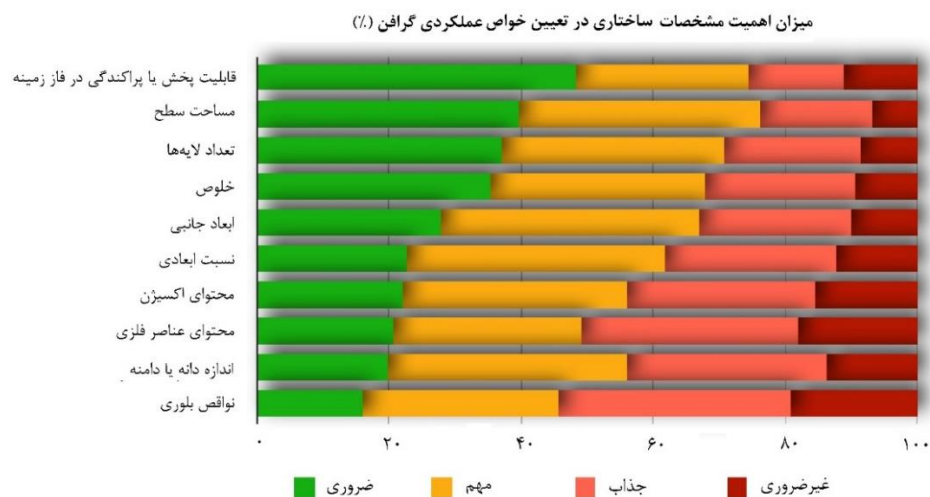
شکل ۱۲. اشکال مختلف گرافن تجاری و میزان کاربرد هر یک از آن.

نمودار شکل ۱۲ نشان‌دهنده طیف گسترده‌ای از اشکال گرافن تجاری موجود در بازار است که به ترتیب میزان کاربرد مرتب شده‌اند. هر یک از موارد یادشده خود خانواده مشخصی از شکل خاصی از گرافن است که دارای

اعضای متعددی بوده و در واقع، هزاران جایگشت مختلف را می‌توان متصور شد. بنابراین، شناسایی و کار با تولیدکنندگان و تامین‌کنندگان باتجربه و باسواد برای حصول اطمینان از آنکه گرافن تولیدی با کاربرد موردنظر همخوانی و هماهنگی داشته باشد، امری ضروری است.

❖ اهمیت مشخصات ساختاری گرافن از نگاه بازار

بر خلاف خواص عملکردی گرافن، مشخصات ساختاری آن مانند میزان پخش‌شوندگی^۱ آن در فاز زمینه، تعداد لایه‌های اتمی، نسبت ابعادی و نواقص بلوری تعیین‌کننده چگونگی و چرایی عملکرد اشکال مختلف گرافن است. برای مثال، نانوصفحات گرافن دارای خاصیت آب‌گریزی و اکسید گرافن دارای خاصیت آب‌دوستی هستند. خاصیت آب‌دوستی گرافن تعیین‌کننده میزان سهولت در پخش یا پراکنده‌شدن آن در ماده زمینه یا حلال خاص می‌باشد. مشخصات ساختاری گرافن و میزان اهمیت هر یک از آن‌ها در تعیین خواص عملکردی گرافن در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳. مشخصات ساختاری گرافن و میزان اهمیت هر یک از آن‌ها در تعیین خواص عملکردی آن.

مشخصات ساختاری گرافن معمولاً بر روی برگه مربوط به مشخصات ماده^۲ درج می‌شود. نوع، تعداد و مقدار واقعی مشخصات مندرج در این برگه‌ها بسته به تولیدکننده و نوع ماده گرافنی مورد استفاده می‌تواند متفاوت باشد.

^۱ Dispersibility

^۲ Material Specification Sheet

در حال حاضر، برای اندازه‌گیری مشخصات گرافن از روش‌های آنالیز مختلفی استفاده می‌شود. در راستای یکسان‌سازی داده‌های گزارش‌شده، نهادهای استانداردگذاری بین‌المللی مانند سازمان بین‌المللی استانداردها^۱ (ISO)، موسسه ملی استاندارد آمریکا^۲ (ANSI)، کمیسیون بین‌المللی الکتروتکنیک^۳ (IEC) و غیره، روش‌های آنالیز مشخصی را برای اندازه‌گیری هر یک از مشخصات ساختاری گرافن تعیین و اعلام کرده‌اند. برای مثال، مطابق با استاندارد، برای اثبات گرافن بودن ماده کربنی از روش طیف‌سنجی رامان و برای تعیین تعداد لایه‌های اتمی کربن از میکروسکوپ نیروی اتمی استفاده می‌شود. چالش کنونی این حوزه عبارت است از مشخص کردن مجموعه‌ای از فرایندها و دستورالعمل‌های منسجم اندازه‌گیری که علاوه بر مقرون‌به‌صرفه و معتبر بودن، برای استفاده در زمینه تولید صنعتی گرافن به اندازه کافی سریع باشند.

❖ استانداردها و الگوهای تجاری

یکی از متداول‌ترین موضوعات پیرامون مواد گرافنی عبارت از عدم تدوین استانداردهای مرتبط با آن‌ها است. این استاندارد بایستی شامل موارد زیر باشد:

- تدوین ترمینولوژی، تعاریف و فهرست‌بندی عبارات و اصطلاحات
- دسته‌بندی انواع مختلف مواد گرافنی و گریدهای مختلف آن
- تدوین روش‌های پایستار برای تعیین خواص عملکردی و مشخصات ساختاری گرافن
- اعتبارسنجی و گواهی مواد، تولیدکنندگان و محصولات
- مسائل مربوط به سلامت و ایمنی طی فرایندهای افشا، آنالیز و تولید

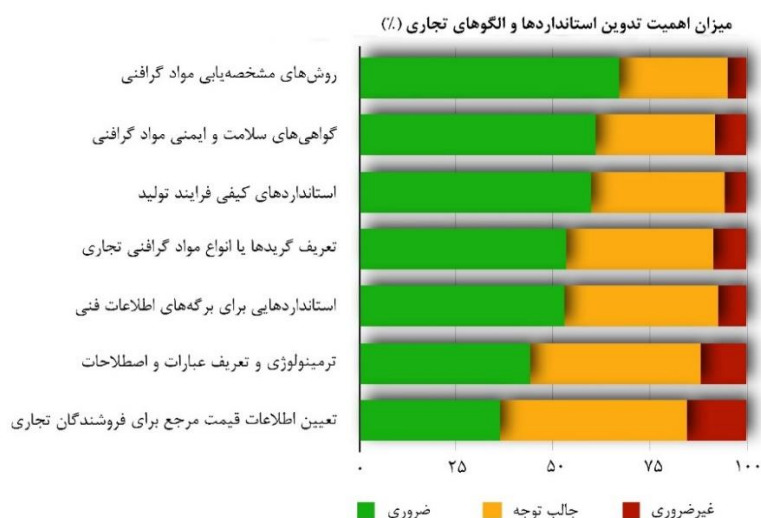
از آنجایی که گرافن ماده جدیدی بوده و دارای صنعت نسبتاً نوپایی است، تدوین استانداردها و الگوهای تجاری برای آن در مرحله شکل‌گیری و توسعه می‌باشد. طی بلوغ گرافن و گسترش کاربردهای آن، نیاز به تدوین

^۱ International Standards Organization

^۲ American National Standards Institute

^۳ International Electrotechnical Commission

استانداردهای مرتبط با آن در تمامی حوزه‌ها به‌عنوان بخشی از فرایند تجاری‌سازی و پذیرش همگانی امری ضروری به نظر می‌رسد.



شکل ۱۴. نمودار اهمیت تدوین بخش‌های مختلف استانداردها و الگوهای تجاری برای گرافن.

❖ موانع پذیرش تجاری گرافن

گرافن نیز به مانند هر ماده یا فناوری جدیدی با موانع متعددی بر سر راه توسعه تجاری خود مواجه است. این موانع بر اساس شدت و ضعف به‌صورت آماری در نمودار شکل ۱۵ اولویت‌بندی شده‌اند.



شکل ۱۵. نمودار میزان شدت موانع موجود بر سر راه توسعه تجاری مواد گرافنی.

بر اساس آمار مستخرج از فعالین تجاری و دانشگاهی در سراسر جهان، موانع پذیرش گرافن به‌ترتیب فراوانی عبارتند از:

- هزینه‌های تولید و قیمت تمام‌شده گرافن
- مقیاس‌پذیری فرایند تولید گرافن به‌صورت انبوه و سهولت دسترسی به آن
- قابلیت تولید گرافن به‌صورت تکرارپذیر با کیفیت یکنواخت و موردنیاز
- عدم آگاهی مشتریان نهایی از ارزش عملکردی گرافن در حوزه کاربردی موردنظر
- نیاز به مهارت کافی برای کار با گرافن و نحوه استفاده از آن در کاربرد موردنظر
- مسائل مربوط به پخش یا پراکنده کردن گرافن در فاز زمینه
- عدم وجود کاربردهای تجاری متعدد و همگانی، و ریسک پیشگام‌بودن در تجاری‌سازی گرافن در یک کاربرد مشخص
- خواص و عملکرد ذاتی گرافن

- نبود استانداردها، ترمینولوژی و تعاریف دقیق از گریدهای مختلف گرافن، اعتبارسنجی یا گواهی نامه‌های معتبر بین‌المللی برای محصولات تولیدی یا خود تولیدکنندگان و استفاده از اصطلاحات متداول با زبان مشترک جهانی

- مسائل مربوط به ایمنی و سلامت

- روش‌های مختلف مشخصه‌یابی

- بروز توقعات و انتظارات بیش از حد از کارایی گرافن به دلیل تبلیغات اغراق‌آمیز

- عدم سرمایه‌گذاری و جذب آسان سرمایه

قیمت، مقیاس و کیفیت سه مانع اصلی در مسیر توسعه تجاری گرافن محسوب می‌شوند که توسط ۷۰ درصد از فعالان این حوزه مطرح شده‌اند. این سه مانع در رابطه تنگاتنگی با یکدیگر بوده و تمامی تولیدکنندگان گرافن را به چالش کشیده‌اند. از طرف دیگر، عدم وجود کاربردهای تجاری متعدد و موفق باعث افزایش ریسک ورود به حوزه‌های کاربردی جدید و پیشگامی در آن شده است. پیشتازی در تجاری‌سازی گرافن در یک کاربرد جدید معادل با به خطر انداختن بخش وسیعی از سرمایه محسوب می‌شود، اما با افزایش کاربردهای تجاری می‌توان شاهد رشد تجاری و پذیرش سریع‌تر آن برای استفاده در کاربردهای بکر دیگر بود. بخش دیگری از موانع در ارتباط با خواص خود گرافن و عملکرد ذاتی آن مطرح می‌شود. برای مثال می‌توان به شکاف انرژی غیرطبیعی گرافن برای کاربردهای الکترونیکی اشاره نمود. برای رفع این چالش، همکاری میان پژوهشگران و واحدهای تجاری فعال در این حوزه بسیار ثمربخش خواهد بود. لازم به ذکر است که روش‌های مختلف مشخصه‌یابی، بروز توقعات و انتظارات بیش از حد از کارایی گرافن به دلیل تبلیغات اغراق‌آمیز و عدم سرمایه‌گذاری و جذب آسان سرمایه جزو ضعیف‌ترین موانع موجود در مسیر توسعه کاربردی و تجاری گرافن هستند. این امر نشان‌دهنده آن است که در حال حاضر، گرافن تجاری در مرحله جدیدی از دوران بلوغ خود قرار دارد.

از لحاظ قیمت تمام‌شده نیز، بر خلاف آنچه ممکن است ظاهراً سرسام‌آور به نظر برسد، استفاده از گرافن در اکثر کاربردهای تجاری مقرون‌به‌صرفه خواهد بود. از آنجایی که در بسیاری از کاربردها غالباً مقادیر بسیار اندکی از گرافن (معمولاً کمتر از ۱ درصد وزنی) مورد استفاده قرار می‌گیرد، تاثیر استفاده از آن در افزایش هزینه نهایی محصول تولیدی ناچیز خواهد بود. به عنوان مثال، با فرض آنکه قیمت تمام‌شده هر کیلوگرم گرافن با کیفیت بالا

برابر ۳۰۰۰ دلار باشد، با افزودن ۰/۵ درصد وزنی گرافن به یک کیلوگرم از ماده زمینه، قیمت نهایی محصول تولیدی تنها ۱۵ دلار در هر کیلوگرم افزایش خواهد یافت. در مواردی که مقیاس تولید بسیار بالاست مانند سیمان و بتن، افزودن ۰/۰۲ درصد وزنی نانوصفحات گرافن با قیمت خرید ۵۰ دلار به ازای هر کیلوگرم از آن، قیمت محصول نهایی تنها ۰/۰۱ دلار در هر کیلوگرم از محصول و به عبارت دیگر، تنها ۱۰ دلار در هر تن افزایش خواهد یافت.

۴ بررسی بازار و برخی بازیگران اصلی

گزارشهای منتشر شده در حوزه گرافن، حجم بازارهای متفاوتی را پیش بینی میکنند. بر اساس گزارش alliedmarketresearch، حجم بازار در سال ۲۰۱۹ معادل ۸۷,۵ میلیون دلار بوده که تا سال ۲۰۲۷ به ۸۷۸ میلیون دلار خواهد رسید. بر اساس همین گزارش، حجم بازار در سال ۲۰۱۲ نزدیک ۱۰ میلیون دلار بوده است. اما بر اساس گزارش marketsandmarkets، حجم بازار در سال ۲۰۲۰ معادل ۶۲۰ میلیون دلار بوده که با رشد ۱۹ درصدی به حدود ۱,۵ میلیارد دلار در سال ۲۰۲۵ خواهد رسید.

حجم تولید گرافن در سال ۲۰۱۳ برابر ۲۵۰ تن تخمین زده شده است که در سال ۲۰۱۵ به ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ تن در سال افزایش پیدا کرده است. این اعداد بر اساس ظرفیت ظاهری و بدون در نظر گرفتن اطلاعات اعتبارسنجی شده از مقادیر واقعی تولید و فروش گرافن محاسبه شده است.

با توجه به گزارشات بازار، مهم ترین کاربردهای گرافن عبارتند از: کامپوزیت، الکترونیک، رنگ؛ پوشش؛ جوهر، ذخیره سازی و برداشت انرژی و همچنین تایر. همچنین از لحاظ جغرافیایی، بیشترین رشد مربوط به کشور هند است. از لحاظ نوع گرافن نیز حجم بازار نوع بالک تقریباً سه برابر تک لایه است. صنعت خودرو و حمل و نقل نیز به عنوان مهمترین پیشران گرافن نام برده شده است.

یکی از مهم ترین چالش های پیش روی افزایش حجم بازار گرافن عبارت از مقیاس پذیری فرایندهای تولید آن است. قیمت بالای گرافن تابعی از فرایندهای تولید آن می باشد. بر خلاف نظر برخی از تامین کنندگان، مقیاس پذیری فرایند تولید یکی از مسائل محدودکننده محسوب می شود و حجم بازار محدود موید این امر است. به همین دلیل با کاهش قیمت تمام شده گرافن از طریق استفاده از روش های تولید بهینه، می توان انتظار داشت که مسیر تجاری سازی گرافن هموارتر شود. به عنوان یک مورد استثنایی، شرکت Talga Resources یک منبع بالقوه تامین گرافن بالک ارائه داده که معادلات این حوزه را تغییر داده است. نشان داده شده است که با استفاده از این منبع می توان مقادیر بسیار بالایی از گرافن طبیعی را از کانه های گرافیتی تامین کرد. سهولت فرایند و هزینه پایین استحصال گرافن از این منبع از مزایای قابل توجه تامین گرافن بالک برای صنایع مختلف محسوب می شود.

در ادامه به بررسی بیشتر چندین بازیگر کلیدی در این حوزه پرداخته شده است.

❖ شرکت توسعه مواد پیشرفته^۱ (AMD) (انگلستان)

شرکت AMD یکی از تولیدکنندگان پیشروی انگلیسی در زمینه تولید مواد مهندسی پیشرفته است که با محوریت و مدیریت دانشگاه ساسکس انگلستان در زمینه تجاری سازی نانومواد دوبعدی از جمله گرافن برای کاربردهای مختلف صنعتی فعالیت خود را از سال ۲۰۱۷ آغاز کرده است. تاکنون بیش از ۴ پروژه مهم در زمینه های بسته بندی، ضایعات مواد غذایی، و مراقبت های بهداشتی با هدف تولید مقیاس بالای محصولات گرافنی و سایر نانومواد دوبعدی توسط این شرکت انجام شده است و از مهم ترین محصولات تجاری شده توسط این شرکت می توان به جوهرها و نانوامولسیون های پایه گرافن با خلوص بسیار بالا، و تولید پوشش ها، سیستم های ضد تقلب (در اسکناس ها و اسناد مهم)، و حسگرهای زیست پزشکی اشاره کرد. به طور خاص، محصولات پایه کربنی این شرکت در سه حوزه اصلی زیر تولید و به بازارهای جهانی عرضه می شوند:

(الف) محلول ویژه برای جلوگیری از جعل اسکناس

این محصول تحت عنوان تجاری nMARK توسعه یافته است و در حقیقت، یک محلول پایه آبی است که در آن، نانومواد دوبعدی مانند گرافن با فرمولاسیون خاصی پخش شده و ویژگی های نوری منحصر به فرد و مرموزی دارد. با آغشته کردن اسکناس ها به این محلول و تاباندن نور خاصی با طول موج و شدت معین، می توان تقلبی بودن یا نبودن اسکناس را تشخیص داد.

(ب) جوهر پایه گرافن برای شناسایی فرکانس های رادیویی

تجهیزات شناسایی فرکانس های رادیویی^۲ معمولاً مبتنی بر فلزات و پلیمرها هستند. این شرکت محلول یا جوهری ساخته است که می تواند بر روی یک کاغذ معمولی اعمال شود و پس از اعمال، از آن کاغذ به عنوان لیبل یا برچسبی برای شناسایی فرکانس های رادیویی استفاده کرد. این جوهر به آسانی از روی کاغذ قابل شستشو و بازیافت است و چون از کاغذ معمولی برای ساخت این برچسب استفاده می شود یک محصول دوست دار محیط زیست محسوب می شود.

^۱ Advanct Material Development Inc.

^۲ RFID-based devices

❖ (ج) جوهرهای پایه گرافن برای کاربردهای الکترونیک پوشیدنی (انعطاف پذیر)

این شرکت جوهری بر پایه گرافن توسعه داده است که می توان بر روی یک زیرلایه انعطاف پذیر مانند الاستومرها اعمال کرد به طوری که چسبندگی فوق العاده ای به آن داشته باشد. این پوشش برای ماندگاری بالا دیگر نیازی به افزایش دما و انجام عملیات حرارتی ندارد. هدف از اعمال این جوهر به سطح یک پلیمر، افزایش رسانندگی الکتریکی فوق العاده آن (تا حدود 2500 K S/m) و افزایش کرنش پارگی آن است. از این جوهر در تقویت سطح تایر خودروها و تسمه های بکار رفته در آن استفاده شده است.

❖ شرکت باتری لیتیومی کال

شرکت باتری لیتیومی کالیفرنیا^۱ در حال ساخت باتری های یون لیتیوم است و از سال ۲۰۱۲ آندی برپایه ترکیب جدید گرافن-سیلیسیوم (SiGr) توسعه داده است. در این آند، اتم های سیلیسیوم به طور جانشینی در ساختار گرافن دوبعدی قرار داده شده اند تا بتواند ظرفیت آندی آن را تا سه برابر (از 325 mAh/g تا 1250 mAh/g) افزایش دهد. این آند به صورت کامپوزیتی از گرافن و اکسید سیلیکون نیز به مرحله تجاری سازی رسیده است.

❖ شرکت Carbonup

شرکت Carbonup با هدف استفاده از فناوری نانو برای کمک به مشکلات جوامع انسانی تاسیس شده است. این مجموعه قصد دارد انقلابی در تجارت محصولات مرتبط با فناوری نانو و عموماً مبتنی بر گرافن ایجاد کند. از مهم ترین حوزه های تولیدی این شرکت می توان به روانسازهای پایه گرافنی، بسته بندی های هوشمند، فناوری سبز، ترکیبات عملکردی، پوشش ها و جوهرهای پایه گرافن، افزودنی های خاص از جمله ترکیبات گرافنی، و فیلمان های پرینت سه بعدی اشاره کرد. فرم کلی محصولات این شرکت، به صورت نانوکلوئیدی از گرافن است که ذرات معلق در آن، براساس خواص مورد نظر نظیر خواص الکتریکی، رسانایی حرارتی، خاصیت روانکاری، و خواص مکانیکی دستکاری و سنتز شده اند..

❖ شرکت Covestro

^۱ California Lithium Battery (CLB)

این شرکت در سال ۲۰۱۵ شروع به کار کرده و یکی از تولیدکنندگان معتبر و به نام مواد پلیمری به شمار می‌رود. شرکت کاوسترو با اضافه کردن گرافن به عنوان جز جدید، خواص پلیمرهای پایه را براساس نیاز صنعت تغییر می‌دهد و محصولات خود را با سفارش مشتری تطبیق می‌دهد.

❖ شرکت FIRMUS France

این شرکت فرانسوی در حال تولید و عرضه تجهیزات تصفیه آب و پساب از جمله فیلترهای صنعتی، نانوفیلتراسیون، و غشاهای سرامیکی است و در ساخت برخی از محصولات خود، از گرافن به عنوان جز جدید استفاده می‌کند. مهم‌ترین محصول این شرکت، غشاهای نانومقیاس است که می‌تواند به دلیل دارا بودن ذرات نانومتری و گرافن، در فرآیند بی‌هوازی هضم لجن‌های صنعتی مورد استفاده قرار گیرد. شکل زیر موفقیت‌آمیز بودن این فرآیند را برای یک پساب واقعی صنعتی نشان می‌دهد. براساس این شکل، عبور پساب غلیظ از داخل غشای اصلاح شده با نانوذرات کربنی موجب حذف کامل آلودگی‌ها می‌شود.



شکل ۱۶. پساب واقعی صنعتی پس از عبور از غشای نانومتری اصلاح شده با نانوذرات از جمله گرافن.

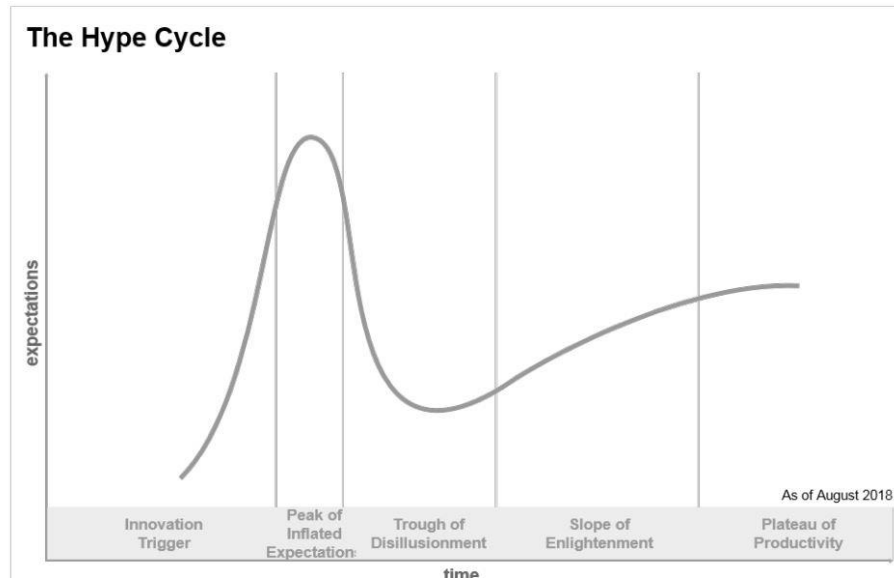
همچنین اطلاعات بیشتر برخی شرکتها در جدول زیر آورده شده است.

شرکت	محل استقرار	ارزش بازار	تمرکز اصلی
Angstrom Materials (www.angstrommaterials.com)	ایالت اوهایو آمریکا	نامعلوم	- تولید نانوصفحات گرافن - همکاری با مشتریان برای طراحی محلول‌های گرافنی
Applied Graphene Materials plc (AGM) (www.appliedgraphenematerials.com)	صندوق سرمایه‌گذاری جایگزین	۳۴ میلیون پوند	- یکی از شرکت‌های زیرمجموعه دانشگاه دورام - تولید انبوه پودر گرافن با استفاده از اتم‌های کربن با منبع اتانول

- نیمه‌رساناها، روشنایی و فتوولتائیک - استفاده از گرافن و نانولوله‌های کربنی در حوزه ترانزیستور، الکترونیک، ذخیره انرژی و حسگرها	۸۰۰ میلیون یورو	بازار بورس نزدیک - آلمان	Aixtron SE (www.aixtron.com)
- ساخت تجهیزات پیشرفته تولید گرافن - تهیه پوشش‌های گرافنی با استفاده از روش CVD	۶۱ میلیون دلار	بازار بورس نزدیک	CVD Equipment Corp (CVV)
- صادرات مواد گرافنی به ۴۰ کشور مختلف	نامعلوم	اسپانیا	Graphenea SA (www.graphenea.com)
- تولید محصولات گرافنی با استفاده از روش CVD و سیستم‌های CVD - پیشرو در تولید صفحات نمایش لمسی بر پایه فیلم‌های گرافنی - شرکت زیرمجموعه دانشگاه ملی سئول	نامعلوم	کره جنوبی	Graphene Square Inc. (www.graphenesq.com)
- تولید گرافن اپتیکسیال بر روی زیرلایه کاربرد سیلیکونی - تولید گرافن تک‌لایه و دولایه	نامعلوم	سوئد	Graphensic AB (www.graphensic.com)
- شرکت خصوصی - تولید دومرحله‌ای گرافن لایه‌لایه‌شده حاصل از سنگ معدن گرافیت	نامعلوم	شرکت خصوصی	Grafoid Inc.
- تولید محصولات گرافیتی با پشتوانه بیش از ۲۰۰ ثبت اختراع در حوزه گرافن	۱ میلیارد دلار	نیویورک	Graftech International (GTI.NYSE) (www.graphtech.com)
- تولید باتری‌های گرافنی با استفاده از پرینت سه‌بعدی	۵۲ میلیون دلار	تورنتو - نیویورک	Graphene 3D Lab Inc (GGG.TSXV) (www.graphene3dlab.com)
- سرمایه‌گذاری ۵۰ میلیون دلاری برای توسعه محصولات گرافنی برای استفاده در حوزه خدمات نفت و گاز - کار با سیالات نانویی، پلیمرها و جوهرها	۴۳ میلیون پوند	صندوق سرمایه‌گذاری جایگزین	Graphene Nanochem (GRPH.AIM) (www.graphenenanochem.com)
- برنامه‌ریزی برای خرید ۴۹ درصد از آزمایشگاه‌های گرافن که از تجهیزات پایلوت تولید گرافن برخوردار هستند.	۱۲ میلیون دلار	بازار بورس کانادا	Lomiko Metals Inc. (LMR.V) (www.lomiko.com)
- تولید گرافن بالک با بهترین کیفیت	۴۰ میلیون دلار	بازار بورس استرالیا	Talga Resources Ltd (www.talgaresources.com)

۵ تحلیل منحنی اشتیاق فناوری و ماتریس اولویت

یکی از شاخص‌هایی که معمولاً درباره فناوری‌های نوظهور مطرح و بررسی می‌شود، تعیین وضعیت منحنی اشتیاق فناوری^۱ است که سالانه توسط موسسه گارتنر منتشر می‌شود. با توجه به این منحنی، وضعیت هر فناوری نوظهور در یکی از پنج حالت است که عبارتند از: محرک فناوری^۲، نقطه اوج انتظار از فناوری^۳، ناامیدی از انتظارات^۴، شیب مثبت^۵ و جایگاه واقعی فناوری یا فلات بهره‌وری^۶.



شکل ۴- شمای کلی منحنی اشتیاق فناوری

موسسه گارتنر علاوه بر تعیین وضعیت فعلی فناوری، با توجه به شواهد و قرائن موجود پیش‌بینی می‌کند که چند سال طول می‌کشد تا فناوری به مرحله آخر یعنی، فلات بهره‌وری وارد شود.

با توجه به تعیین وضعیت فعلی و همچنین پیش‌بینی آتی از فناوری، مهم‌ترین کارکرد منحنی مذکور در تعیین ماتریس اولویت فناوری برای سازمان‌های مربوطه است. بدین ترتیب که سازمان‌ها معمولاً با توجه به اهمیت یک

^۱ Hype Curve Cycle

^۲ Technology Trigger

^۳ Peak of inflated expectation

^۴ Trough of disillusionment

^۵ Slope of enlightenment

^۶ Plateau of productivity

موضوع و همچنین وضعیت منحنی فعلی و آینده فناوری در چرخه اشتیاق فناوری، اولویت فناوری را تعیین و زمان مناسب ورود به آن فناوری را مشخص می‌کنند. در شکل زیر، ماتریس اولویت آورده شده است که بر اساس نوع رفتار یک سازمان، میزان مزیت فناوری^۱ (معمولاً بر اساس میزان تاثیر آن)، و زمان پیش‌بینی برای ورود فناوری به مسیر اصلی^۲ (یا همان وضعیت فلات بهره‌وری با حداقل ۲۰٪ بازار هدف)، تعیین می‌شود.

از نظر موسسه گارتنر، سازمان‌ها به سه دسته تقسیم می‌شوند:

- نوع الف: تهاجمی^۳ که زودتر از دیگران برای پیشگامی به فناوری ورود کرده و ریسک‌های آن را نیز متقبل می‌شوند.
- نوع ب: اکثریت^۴ که معمولاً صبر می‌کنند تا فناوری به بلوغ بیشتری رسیده و ریسک‌های سرمایه‌گذاری آن کاهش یابد.
- نوع ج: محافظه کار^۵ که بسیار دیرتر از دیگران به فناوری ورود نموده و در نتیجه از دیگران عقب‌تر خواهند ماند.

Priority Matrix				
benefit	years to mainstream adoption			
	less than 2 years	2 to 5 years	5 to 10 years	more than 10 years
transformational	Invest aggressively if not already adopted	Conservative (Type C) investment profile	Moderate (Type B) investment profile	Aggressive (Type A) investment profile
high	Conservative (Type C) investment profile	Moderate (Type B) investment profile	Aggressive (Type A) investment profile	Invest with caution
moderate	Moderate (Type B) investment profile	Aggressive (Type A) investment profile	Invest with caution	Invest with extreme caution
low	Aggressive (Type A) investment profile	Invest with caution	Invest with extreme caution	Invest with extreme caution

As of August 2018

ID: 370163 © 2018 Gartner, Inc.

^۱ Benefit

^۲ Years to mainstream adoption

^۳ Type A (aggressive)

^۴ Type B (the majority)

^۵ Type C (conservative)

برای تعیین وضعیت ماتریس اولویت گارتنر لازم است تا علاوه بر تعیین نوع سازمان، زمان ورود به جریان اصلی و همچنین میزان تاثیر هر نوآوری مشخص شود.

الف) تحلیل زمانی:

با توجه به نتایج این گزارش و به خصوص نتایج منتشر شده توسط انجمن گرافن، به نظر می‌رسد که گرافن دوران اوج انتظار را سپری نموده و در حال حاضر در اواسط یا اواخر دوران ناامیدی قرار گرفته است. زیرا دنیا با واقعیتهای گرافن آشنا شده و بسیاری از چالشهای آن مشخص شده است. این چالشها توسط سازمانها و موسسات مرتبط در حال بررسی و رفع شدن هستند. از طرفی بازار گرافن در دهه گذشته چندین برابر شده و پیش بینی میشود در دهه پیش رو نیز به رشد خود ادامه دهد. کمبود تقاضای گرافن در سال ۲۰۱۹ میلادی نیز روند افزایشی را تایید میکند. در همین راستا شرکتهای بیشتری در حال بررسی و آماده سازی جهت استفاده از این ماده هستند. به همین دلیل به نظر میرسد که گرافن در اواسط (نزدیک به اواخر) دوران ناامیدی باشد و در چند سال آتی وارد شیب بهره وری شود. با این توصیفات می توان پیش بینی کرد که این فناوری بین ۵ تا ۱۰ سال دیگر وارد جریان اصلی شده و در بسیاری از حوزه ها به بلوغ خود برسد.

ب) تحلیل تاثیر

با توجه به ویژگی های عملیاتی و قابلیت گرافن به خصوص رسانایی الکتریکی و گرمایی گرافن و از طرفی کاربردهای فراوان و گسترده گرافن در صنایع مختلف مانند تایر، پلاستیک، باتری، جوهرهای رسانا (به خصوص الکترونیک چاپی و سلول خورشیدی) و سنسور می‌توان تاثیر این فناوری را بسیار زیاد (High) در نظر گرفت. اهمیت این حوزه باعث شده است تا گرافن به همراه دیگر مواد دوبعدی از نگاه بسیاری از مراکز تحلیلی از جمله مجمع جهانی اقتصاد در سال ۲۰۱۶، سازمان علم و فناوری ناتو در سال ۲۰۲۰، موسسه تحقیقاتی لوکس در سال ۲۰۲۰ و موسسه مکنزی در سال ۲۰۱۳ مورد توجه قرار گرفته و به عنوان یکی از حوزه های مهم با تاثیرگذاری بالا معرفی شود.

با توجه به تحلیل تاثیر و زمان ورود به جریان اصلی میتوان گفت که ورود به این حوزه در سال جاری برای سازمانهای با رویکرد نوع A مناسب است. سازمانهای نوع B نیز میتوانند از هم اکنون زیرساختهای اولیه را برای ورود به این فناوری ایجاد کنند.

۶ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

گرافن اولین ماده دو بعدی و یکی از مواد نوظهور در قرن بیستم است که توسط بسیاری از سازمانها و نهادهای تحلیلی از جمله مکنزی و مجمع جهانی اقتصاد به عنوان یکی از فناوریهای مهم نوظهور (در کنار دیگر مواد دوبعدی) معرفی شده است. ویژگی‌های منحصر به فرد این ماده و به خصوص ساختار دوبعدی آن موجب شد تا کاشفان آن در سال ۲۰۱۰ برنده جایزه نوبل فیزیک شوند. از آن زمان تاکنون سازمانهای مختلفی به بررسی و مطالعه کاربردی بر روی این ماده پرداخته که یکی از اصلی‌ترین آنها، حمایت یک میلیارد دلاری اتحادیه اروپا ذیل برنامه «فناوریهای نوظهور و آینده‌پرچمدار» در یک افق ده ساله از این نوآوری به منظور توسعه فناوریهای مختلف بوده است. با توجه به این موضوعات، در این گزارش به بررسی وضعیت گرافن پرداخته شد. نهایتاً نیز با استفاده از ماتریس اولویت‌گارتنر مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به رصد این فناوری میتوان پیش‌بینی کرد که این فناوری بعد از اواسط دوران ناامیدی منحنی‌هایپ قرار دارد. به نظر میرسد این نوآوری در کمتر از ۵ سال آتی به مرحله شیب‌روشن‌گری وارد شده و تا ۱۰ سال آتی وارد فاز جریان اصلی شود. با توجه به تاثیر این فناوری سازمانهای نوع A و B در کشور (نهادهای حاکمیتی یا برخی صنایع مانند مانند پلاستیک، تایر و رنگ) بایستی به این موضوع ورود نموده و برنامه‌ریزی‌های متناسب را انجام دهند. این نوع رویکرد به خصوص برای فعالین در صنایع حوزه اشاره شده این فرصت را ایجاد خواهد کرد که بتوانند سریعتر از دیگران به همکاری با فعالین در حوزه گرافن پرداخته و دست برتر را در محصولات نسل جدید و بازار خود داشته باشند. همچنین سازمانهای نوع C نیز لازم است تا از هم‌اکنون به بررسی بیشتر این موضوع و کاربردهای تجاری تر آن پرداخته و زیرساختهای اولیه را برای استفاده از گرافن ایجاد کنند.

- [1] "Understanding Gartner's Hype Cycles," 2018.
- [2] "Hirsch, A., The era of carbon allotropes. Nature materials, 2010. 9(11): p. 868-871."
- [3] "Novoselov, K.S., et al., Electric field effect in atomically thin carbon films. science, 2004. 306(5696): p. 666-669."
- [4] "Dhinakaran, V., et al., Review on exploration of graphene in diverse applications and its future horizon. Materials Today: Proceedings, 2020. 27: p. 824-828".
- [5] "Orsu, P. and A. Koyyada, Recent progresses and challenges in graphene based nano materials for advanced therapeutical applications: a comprehensive review. Materials today communications, 2020. 22: p. 100823".
- [6] "<https://graphene-flagship.eu/>".
- [7] "<https://www.mynewsdesk.com/graphene-flagship>".
- [8] "Döscher, Henning, and Thomas Reiss. "Graphene Roadmap Briefs (No. 1): innovation interfaces of the Graphene Flagship." 2D Materials 8, no. 2 (2021): 022004".
- [9] "Döscher, Henning, and Thomas Reiss. "Graphene Roadmap Briefs (No. 1): innovation interfaces of the Graphene Flagship." 2D Materials 8, no. 2 (2021): 022004".
- [10] "www.mri.psu.edu".
- [11] "www.ccmr.cornell.edu".
- [12] "<https://www.ibm.com/sg-en>".
- [13] "<https://www.uk-cpi.com/about>".

- [14] "<https://www.fbk.eu/en/research-centers/>".
- [15] "<https://www.thegraphenecouncil.org/page/>".
- [16] "<https://www.amgc.org.au>".
- [17] "<https://www.icrea.cat/>".
- [18] "<https://www.ihp-microelectronics.com>".
- [19] "<https://www.imec-int.com/en>".
- [20] "<http://www.iceht.forth.gr/>".
- [21] "http://eng.kist.re.kr/kist_eng/main/".
- [22] "<https://www.llnl.gov/>".
- [23] " <https://www.mackenzie.br/en/mackgraphe>".
- [24] "<http://www.nanomalaysia.com.my/>".
- [25] "<https://www.nims.go.jp/eng/index.html>".
- [26] "<https://www.nnci.net/>".
- [27] "<https://www2.lbl.gov/msd>".
- [28] "<http://www.uammi.org/>".
- [29] "Döscher, Henning, and Thomas Reiss. "Graphene Roadmap Briefs (No. 1): innovation interfaces of the Graphene Flagship." 2D Materials 8, no. 2 (2021): 022004."
- [30] "<https://www.azonano.com/suppliers.aspx?SupplierID=3066>".
- [31] "<https://www.sinc.co.uk/member-directory/advanced-material-development>".
- [32] "<https://www.graphene-info.com/advanced-material-development>".
- [33] "<https://amd nano.com/anticounterfeiting.php>".

- [34] "<https://amdnano.com/green-RFiD.php>".
- [35] "<https://amdnano.com/flexible-electronics.php>".
- [36] "<http://clbattery.com/the-calbattery-solution/>".
- [37] "<https://chargedevs.com/features/calbattery-s-new-sigr-anode-material-hopes-to-break-the-battery-bottleneck/>".
- [38] "<https://carbonup.com.br/>".
- [39] "<https://www.covestro.com/en/company/profile>".
- [40] "<https://www.firmus.net/>".
- [41] "<https://www.thegraphenecouncil.org/page>".
- [42] "Geim, A.K. and K.S. Novoselov, The rise of graphene, in Nanoscience and technology: a collection".
- [43] "<https://www.sinc.co.uk/member-directory/advanced-material-development>".
- [44] "<https://www.graphene.manchester.ac.uk/geic/about/>".