

بررسی استفاده از ترکیبات گرافن به عنوان حامل‌های دارورسانی هدفمند

مریم ملک محمدی^۱، امیر حسین شعبانلو^۲.

۱- کارشناس شیمی کاربردی دانشگاه بوعلی سینا، maryammalakmohammadi79@gmail.com

۲- کارشناس شیمی محض دانشگاه بوعلی سینا، amirhossein.sh13800@gmail.com

خلاصه

در سال‌های اخیر، گرافن و ترکیبات آن به عنوان حامل‌های دارورسانی هدفمند در حوزه داروسازی توجه زیادی را جلب کرده‌اند. این مواد نانو ساختاری به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی مانند نسبت سطح به حجم بالا، خواص الکتریکی و حرارتی ممتاز، و قابلیت‌های بیولوژیکی مناسب، به عنوان گزینه‌های مطلوبی برای بهبود کارایی داروها در درمان بیماری‌ها شناخته می‌شوند. تحقیقات نشان داده‌اند که ترکیبات گرافن می‌توانند به عنوان حامل‌های مؤثر برای انتقال داروهای ضدسرطانی، آنتی‌بیوتیک‌ها و دیگر داروهای تخصصی عمل کنند. این حامل‌ها می‌توانند با استفاده از روش‌های مختلفی از جمله پوشش‌دهی سطحی و ترکیب با نانوذرات دیگر، به هدف‌گیری دقیق‌تر و کاهش عوارض جانبی کمک کنند. علاوه بر این، پتانسیل‌های گرافن در بهبود حلالیت داروها و کنترل آزادسازی دارو در محیط‌های بیولوژیکی، نویدبخش پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه دارورسانی هدفمند است. با این حال، چالش‌هایی از جمله ایمنی و سازگاری بیولوژیکی این مواد نیز باید مورد توجه قرار گیرد. این مقاله به بررسی ویژگی‌ها، روش‌های سنتز و کاربردهای بالینی ترکیبات گرافن به عنوان حامل‌های دارورسانی هدفمند می‌پردازد و چشم‌اندازهای آینده این حوزه را مورد بحث قرار می‌دهد.

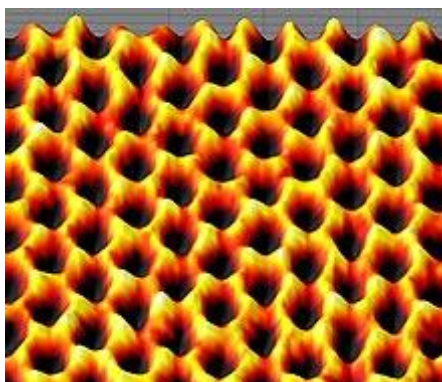
کلمات کلیدی: گرافن، نانودارو، دارورسانی، دارو، ضد سرطان.

۱. مقدمه

این در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های چشمگیری در حوزه نانو فناوری و علوم مواد، زمینه‌ساز تحولات عمیقی در حوزه پزشکی و دارورسانی شده‌اند. یکی از این پیشرفت‌ها، استفاده از نانومواد به عنوان حامل‌های دارورسانی هدفمند است که توانسته است چالش‌های سنتی در زمینه انتقال داروها، مانند سمیت سیستمیک، عدم هدف‌گیری دقیق و نیمه‌عمر کوتاه داروها را تا حد زیادی مرتفع سازد. در این میان، گرافن و ترکیبات مبتنی بر آن به دلیل خواص منحصر به فرد فیزیکی، شیمیایی و زیستی، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند [۱]. گرافن، یک ماده دوبعدی متشکل از اتم‌های کربن با آرایش شش‌ضلعی، به دلیل سطح ویژه بالا، هدایت الکتریکی و حرارتی عالی، استحکام مکانیکی فوق‌العاده و قابلیت عملکردی‌سازی آسان، به عنوان یک گزینه امیدوارکننده در حوزه دارورسانی مطرح شده است. این ماده قادر است به عنوان یک حامل کارآمد، داروها را به صورت کنترل‌شده و هدفمند به بافت‌ها یا سلول‌های خاصی در بدن منتقل کند. علاوه بر این،

ترکیبات گرافن مانند اکسید گرافن (GO) و اکسید گرافن کاهش یافته (rGO) به دلیل وجود گروه‌های عاملی اکسیژن دار بر روی سطح خود، امکان اتصال و بارگذاری انواع مولکول‌های دارویی، پروتئین‌ها و ژن‌ها را فراهم می‌کنند [۲]. استفاده از گرافن و ترکیبات آن در دارورسانی هدفمند، مزایای متعددی از جمله افزایش حلالیت داروهای کم‌محلول، بهبود پایداری داروها در گردش خون، کاهش دوز مورد نیاز دارو و در نتیجه کاهش عوارض جانبی، و همچنین افزایش انتخاب‌پذیری و کارایی درمانی را به همراه دارد. با این حال، چالش‌هایی نیز در این زمینه وجود دارد که از جمله می‌توان به مسائل مربوط به سمیت بالقوه گرافن، پاکسازی آن از بدن و همچنین نیاز به مطالعات بیشتر در مورد تعاملات این ماده با سیستم‌های زیستی اشاره کرد. با توجه به پتانسیل بالای گرافن و ترکیبات آن در حوزه دارورسانی هدفمند، این مقاله مروری به بررسی آخرین پیشرفت‌ها، چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده در استفاده از این نانومواد به عنوان حامل‌های دارویی می‌پردازد. هدف از این مطالعه، ارائه دیدگاهی جامع در مورد کاربردهای گرافن در دارورسانی و شناسایی راهکارهای احتمالی برای غلبه بر موانع موجود در این زمینه است. گرافن^۱ یکی از اشکال کربن است که به‌عنوان یک ماده دوبعدی با ساختار بلوری شش‌ضلعی شناخته می‌شود. در این ساختار، هر اتم کربن با استفاده از سه الکترون ظرفیت خود، به سه اتم کربن مجاور متصل می‌شود و پیوندهایی از نوع sp^2 هیبریدیزه شده تشکیل می‌دهد. الکترون چهارم که در این پیوندها شرکت نمی‌کند، به‌صورت آزاد در سراسر صفحه گرافن پخش شده و نقش مهمی در خواص الکترونیکی و فیزیکی این ماده ایفا می‌کند. در حضور ناخالصی‌هایی مانند اکسیژن، این الکترون آزاد می‌تواند در تشکیل پیوندهای شیمیایی با اتم‌های دیگر، مانند پیوند π بین کربن و اکسیژن، مشارکت کند [۳].

گرافیت، که رایج‌ترین شکل کربن است، از لایه‌های متعدد گرافن تشکیل شده است. در گرافیت، هر اتم کربن با سه پیوند کووالانسی به سه اتم کربن دیگر متصل می‌شود و یک شبکه گسترده دو بعدی ایجاد می‌کند. این لایه‌ها به‌صورت موازی بر روی یکدیگر قرار گرفته‌اند و چهارمین الکترون ظرفیت هر اتم کربن، با الکترون‌های لایه‌های مجاور، پیوند واندروالسی ضعیفی تشکیل می‌دهد [۴]. به دلیل ضعیف بودن این پیوند، لایه‌های گرافیت به راحتی بر روی هم می‌لغزند، که این ویژگی باعث کاربرد گسترده گرافیت در مواردی مانند نوک مداد می‌شود [۵]. گرافن، برخلاف گرافیت، تنها از یک لایه واحد از اتم‌های کربن تشکیل شده است. در این ساختار، چهارمین الکترون ظرفیت به‌صورت آزاد باقی می‌ماند و به گرافن خواص الکترونیکی و مکانیکی استثنایی می‌بخشد. این ویژگی‌ها، گرافن را به ماده‌ای جذاب برای کاربردهای پیشرفته در حوزه‌هایی مانند الکترونیک، نانوفناوری و زیست‌پزشکی تبدیل کرده است. در شکل ۱ تصاویری گرفته شده از گرافن به کمک میکروسکوپ پراب پویشی قابل مشاهده می‌باشد [6].



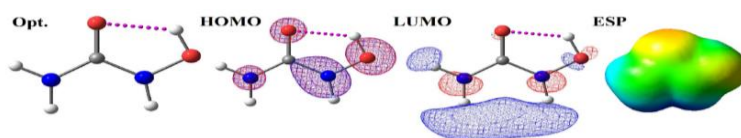
شکل ۱- تصاویری گرفته شده از گرافن به کمک میکروسکوپ پراب پویشی [7]

¹Graphene

۲. پیدایش گرافن و پیشینه پژوهش

مطالعه نظری گرافن در سال ۱۹۴۷ توسط فیزیکدان فیلیپ آر. والاس^۱ به عنوان اولین گام برای درک ساختار الکترونی گرافیت آغاز شد. اصطلاح «گرافن» توسط شیمیدانان هانز-پیتر بوهم^۲، رالف ستون^۳ و ابرهارد استامپ^۴ در سال ۱۹۸۶ ابداع شد. این واژه ترکیبی از کلمه «گرافیت» است و به کربن در شکل کریستالی مرتب شده آن اشاره دارد، مشابه هیدروکربن های معطر چندحلقه ای که در آن ها اتم های کربن ساختارهای حلقوی شش ضلعی تشکیل می دهند. در سال ۲۰۰۴، فیزیکدانان دانشگاه منچستر، کنستانتین نووسلوف^۵ و آندره گیم^۶، به همراه همکارانشان، با استفاده از روشی بسیار ساده به نام لایه برداری مکانیکی از گرافیت، موفق به جداسازی گرافن تک لایه شدند. آن ها با استفاده از نوار چسب، لایه های بالایی یک نمونه گرافیتی را برداشتند و هنگامی که نوار چسب جدا شد، مقداری از این ماده به صورت تک لایه روی آن باقی ماند. در واقع، استخراج این ترکیب به خودی خود کار دشواری نیست و این روش ساده نشان دهنده دسترسی نسبتاً آسان به گرافن تک لایه است [8].

ساده^۷ و همکاران در سال ۲۰۲۴ طی تحقیقی اعلام کردند که سفارشی سازی یک پلتفرم گرافن تقویت شده با آهن (FEGR) برای تحویل داروی ضدسرطانی هیدروکسی (HYD) مورد بررسی قرار گرفت و محاسبات نظریه تابع چگالی (DFT) انجام شد. ویژگی های ساختاری و الکترونیکی مورد نیاز برای درک جزئیات عملکرد جذب یا حس کردن سیستم های مورد بررسی ارزیابی شد. آنها اعلام کردند که هفت پیکربندی از مجموعه های بیومولکولی HYD@FEGR که با هم تعامل دارند، بر اساس پیکربندی های سه بعدی طرفین در حال تعامل تثبیت شدند. اتم اکسیژن کتو از HYD و اتم آهن از FEGR در تعامل اصلی تشکیل مجموعه نقش داشتند که منجر به بالاترین تثبیت پیکربندی-۵ با کمک تعاملات اطراف شد. تغییرات دقیق مدل ها با استفاده از ویژگی های الکترونیکی حالات مختلف در ارتباط با اوربیتال های مولکولی مرزی برای شناسایی مکانیزم ارتباطی بین HYD و پلتفرم تقویت شده FEGR از طریق تشکیل مجموعه های بیومولکولی HYD@FEGR مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، مدل ها به خاطر ویژگی های ساختاری و الکترونیکی خاص خود برای نزدیک شدن به عملکرد جذب یا حس کردن FEGR نسبت به داروی ضدسرطانی HYD شناخته شدند. علاوه بر این، نتایج ترمودینامیک آب حل شده نشان دهنده مزایای مجموعه های بیومولکولی HYD@FEGR برای کار در محیط آبی بوده است. در نهایت، دستاوردهای این تحقیق نشان دهنده یک پلتفرم سفارشی شده FEGR برای تحویل داروی HYD ضدسرطانی است [9].



شکل ۲- ساختار بهینه شده مدل هیدروکسی اوره (HYD) و نمایش های HOMO، LUMO و ESP

خطوط نقطه چین وجود یک تعامل درون مولکولی ممکن را نشان می دهند [9]

¹ Philip R. Wallace

² Hans-Peter Boehm

³ Ralph S. Sutton

⁴ Eberhard Stampf

⁵ Konstantin Novoselov

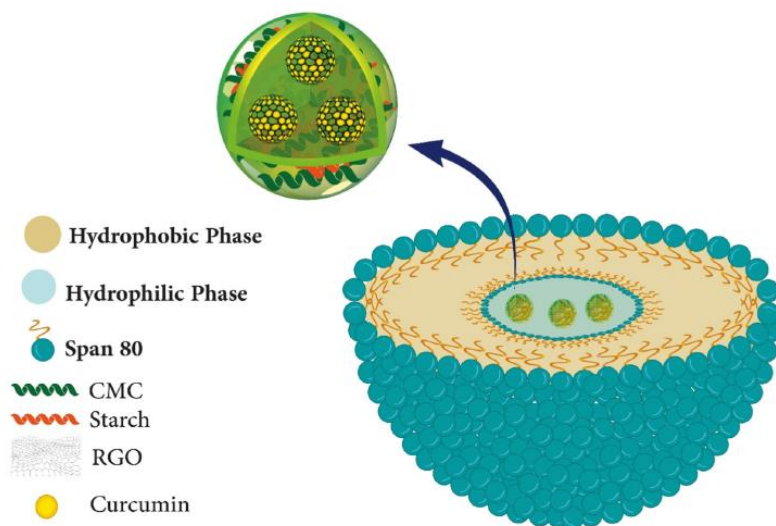
⁶ Andre Geim

⁷ Saadh

ایتو^۱ و همکاران در سال ۲۰۲۲ طی پژوهشی اعلام کردند که پیشرفت‌های اخیر در نانوتکنولوژی این امکان را داده است که نانوذرات یا نانو سیستم‌های چند عملکردی پیچیده‌ای برای تشخیص و درمان هدفمند چندین بیماری، از جمله سرطان‌ها، توسعه دهیم. برای درمان مؤثر هر تومور جامد، درمان باید ترجیحاً فقط سلول‌ها/بافت‌های بدخیم را هدف قرار دهد و آسیب کمتری به سلول‌ها/بافت‌های طبیعی وارد کند. نانوذرات اکسید گرافن (GO) به دلیل ساختار مسطح دو بعدی، ثبات شیمیایی/مکانی، حساسیت نوری عالی، هدایت‌پذیری فوق‌العاده، مساحت سطح بالا و سازگاری زیستی خوب در درمان سرطان، توجه قابل توجهی را جلب کرده‌اند. بسیاری از ترکیبات بر روی سطح GO برای افزایش کاربردهای بیولوژیکی آن و کاهش سمیت سلولی عمل‌پذیر شده‌اند. این مرور کلی، نمای کلی از ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی، استراتژی‌های مختلف اصلاحات، سمیت و سازگاری زیستی گرافن و اکسید گرافن، روندهای کنونی در توسعه ساختارهای نانو مبتنی بر GO به عنوان حامل دارو و سایر کاربردهای بیولوژیکی، از جمله درمان شیمیایی-فتوترمال، درمان شیمیایی-فتودینامیک، بیوانگاری و ترانسونوز در سرطان ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، نتایج بر پتانسیل درمانی نانوپزشکی‌های GO که به‌طور استراتژیک توسعه یافته‌اند، تمرکز دارد و به‌طور جامع به فرصت‌ها و چالش‌های آن‌ها در درمان سرطان می‌پردازد [10].

پروانه^۲ و همکاران در سال ۲۰۲۲ اعلام کردند نانوکامپوزیت‌ها یک دسته امیدوارکننده از حامل‌های دارویی برای درمان سرطان‌های پایانی هستند که عوارض جانبی کمی دارند. همچنین، هیدروژل‌های نانوکامپوزیتی از ترکیب سلولز کاربوکسی متیل (CMC)، نشاسته و اکسید گرافن کاهش‌یافته (RGO) از طریق یک روش شیمی سبز سنتز شدند. این هیدروژل‌ها سپس در نانومولسیون‌های دوگانه محصور شدند تا سیستم‌های تحویل حساس به pH برای کورکومین، یک داروی بالقوه ضد تومور، ایجاد کنند. یک نانومولسیون آب/روغن/آب که از روغن بادام تلخ استفاده می‌کند، به عنوان غشایی اطراف نانوحامل عمل کرد و به‌طور مؤثری رهایی دارو را کنترل کرد. اندازه‌گیری‌های پراش نور دینامیک (DLS) و پتانسیل زتا برای برآورد اندازه و تأیید پایداری نانوحامل‌های بارگذاری‌شده با کورکومین به کار رفت. تعاملات بین‌مولکولی، ساختار بلوری و مورفولوژی نانوحامل‌ها با استفاده از طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه (FTIR)، پراش اشعه ایکس (XRD) و میکروسکوپ الکترونی روبشی میدان (FESEM) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. یافته‌های آنها نشان داد که کارایی بارگذاری و محصورسازی دارو به‌طور قابل توجهی نسبت به سیستم‌های تحویل کورکومین گزارش‌شده قبلی بهبود یافته است. آزمایش‌های رهایی درون‌کشتگاهی نشان‌دهنده حساسیت pH نانوحامل‌ها بود، به‌طوری که رهایی سریع‌تر کورکومین در pH پایین‌تر مشاهده شد. آزمون MTT نشان داد که سمیت نانوکامپوزیت‌ها در برابر سلول‌های سرطانی MCF-7 بیشتر از CMC، CMC/RGO یا کورکومین آزاد بود. آپوپتوز در سلول‌های MCF-7 از طریق آزمایش‌های سیتومتری فلوی تأیید شد. نتایج به این نتیجه‌گیری تاکید می‌کند که نانوحامل‌های توسعه‌یافته پایدار، یکنواخت و مؤثر برای رهایی پایدار و حساس به pH کورکومین هستند [11].

¹ Itoo² Parvaneh



شکل ۳-نمایش تشکیل نانوامولسیون دوگانه [11]

همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است؛ شکل نانوامولسیون دوگانه به فرآیندی اشاره دارد که در آن یک نانوامولسیون درون یک نانوامولسیون دیگر قرار می‌گیرد. این نوع امولسیون معمولاً شامل دو فاز مایع است که یکی در دیگری معلق شده است. به طور کلی، مراحل تشکیل نانوامولسیون دوگانه به شرح زیر است:

مرحله اول: آماده‌سازی فاز داخلی؛ فاز داخلی (معمولاً روغن یا ماده فعال) در یک حلال مناسب حل می‌شود.

مرحله دوم: ایجاد نانوامولسیون اولیه؛ فاز داخلی با استفاده از همزن یا امولسیفایر به فاز خارجی (معمولاً آب) اضافه می‌شود تا یک نانوامولسیون اولیه ایجاد شود.

مرحله سوم: تشکیل نانوامولسیون دوگانه؛ نانوامولسیون اولیه به فاز خارجی دیگری (معمولاً روغن) اضافه می‌شود و دوباره همزده می‌شود تا نانوامولسیون دوگانه تشکیل شود.

مرحله چهارم: تثبیت و کنترل اندازه؛ اندازه نانوامولسیون دوگانه با استفاده از روش‌های مختلفی مانند فشار یا امولسیفایرهای مختلف کنترل و تثبیت می‌شود.

این فرآیندها می‌توانند به تولید نانوامولسیون‌هایی با ویژگی‌های خاص و کاربردهای متنوع در زمینه‌های دارویی، غذایی و صنعتی منجر شوند.

۳. خواص گرافن در دارورسانی

گرافن اکساید که از طریق اکسیداسیون شدید گرافیت به روش هامر تولید می‌شود، به‌عنوان یک نانوحامل ایده‌آل برای انتقال دارو و ژن شناخته می‌شود. در کاربردهای دارورسانی، معمولاً از گرافن اکساید با تعداد لایه‌های بین یک تا سه (با ضخامت کلی ۱ تا ۲ نانومتر) و ابعادی در محدوده چند نانومتر تا چند صد نانومتر استفاده می‌شود. این ماده به دلیل ویژگی‌های ساختاری منحصر به فرد خود، از جمله سطح تماس ویژه بسیار بالا (۲۶۳۰ متر مربع بر گرم) و وجود گروه‌های عاملی غنی از اکسیژن، از زیست‌سازگاری، حلالیت فیزیولوژیکی و پایداری مطلوبی برخوردار است. این خصوصیات، گرافن

اکساید را به گزینه‌ای مناسب برای بارگذاری داروها و ژن‌ها از طریق برهم‌کنش‌های شیمیایی تبدیل کرده‌است. علاوه بر این، حضور گروه‌های عاملی هیدروکسیل (OH) و کربوکسیل (COOH) در ساختار گرافن اکساید، امکان ایجاد همبستگی قوی با سیستم‌های مختلف از جمله پلیمرها، بیومولکول‌ها، کوانتوم دات‌ها، نانوذرات اکسید آهن (Fe_3O_4) و سایر مواد را فراهم می‌کند. این ویژگی، زمینه‌ساز کاربردهای متنوع گرافن اکساید در حوزه‌های مختلف از جمله دارورسانی شده‌است. با الهام از کاربرد نانولوله‌های کربنی در دارورسانی، دای و همکاران از گرافن اکساید برای انتقال داروهای ضد سرطان آروماتیک غیرقابل حل در آب استفاده کردند. در این مطالعه، گرافن اکساید ابتدا با مولکول پلی‌اتیلن‌گلیکول (PEG) که دارای شش بازوی آمینی بود، جفت‌سازی شد و سپس با داروی ضد سرطان غیرقابل حل در آب (SN38) از طریق جذب غیرکووالانسی π - π بارگذاری گردید. نتایج نشان داد که گرافن اکساید عامل‌دار شده با PEG و بارگذاری شده با SN38، سمیت سلولی ۱۰۰۰ برابر بیشتری نسبت به CPT-11 در سلول‌های HCT-116 از خود نشان می‌دهد. در مطالعه دیگری، همین گروه به بررسی آزادسازی هدفمند داروهای شیمیایی در سلول‌ها با استفاده از GO-PEG که با آنتی‌بادی (CD20+) جفت‌سازی شده بود، پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که نرخ آزادسازی دارو از گرافن اکساید به pH محیط وابسته است، بنابراین با تنظیم pH می‌توان میزان آزادسازی دارو را به‌صورت کنترل‌شده مدیریت کرد. این یافته‌ها، پتانسیل گرافن اکساید را به‌عنوان یک سیستم نوین و کارآمد در دارورسانی هدفمند به‌ویژه در درمان سرطان، برجسته می‌سازد. سرطان همه سال در تمام دنیا، قربانی‌های زیادی را می‌گیرد و برای جلوگیری و درمان آن، تلاش‌های زیادی انجام گرفته است. داروهایی که در این زمینه به وجود آمده‌اند، متأسفانه عوارض جانبی بدی داشته و همچنین از قدرت و کارایی لازم برخوردار نیستند. یکی از راه‌های بهبود این داروها، استفاده از دارورسانی هوشمند با استفاده از نانومواد مانند گرافن اکساید است. گرافن اکساید که با حضور گروه‌های اکسیژنی است، این قابلیت را به ما می‌دهد که به صورت کووالانسی آن را با مواد دیگر پیوند دهیم تا از زیست سازگاری بهتری برخوردار شویم و خواص جالبی برای آن به وجود آوریم. محققان توانسته‌اند با استفاده از گرافن اکساید و پلیمری مانند پلی‌اتیلن‌گلیکول، به زیست سازگاری لازم رسیده و حتی دارویی مانند دوکسوروبیسین را روی آن قرار دهند. نتایج به دست آمده، بسیار عالی و مناسب بود و نشان داد که گرافن اکساید هدف یابی سلول‌ها را، بدون توضیحات فناوری استفاده از عامل بیرونی و به صورت passive افزایش می‌دهد و همچنین کشتار سلولی را تا حد بسیار خوبی بالا می‌برد [12].

گرافن، نازک‌ترین ماده شناخته‌شده برای بشر با ضخامت تنها یک اتم، از ویژگی‌های فوق‌العاده‌ای برخوردار است. این ماده حدود ۲۰۰ برابر قوی‌تر از فولاد بوده و در عین حال فوق‌العاده سبک است. علاوه بر این، گرافن رسانای بسیار خوبی برای گرما و الکتریسیته است و توانایی جذب نور منحصر به فردی دارد. این ماده با پتانسیل نامحدود خود می‌تواند در صنایع مختلف ادغام شده و تحولی بزرگ در جهان ایجاد کند. گرافن سخت‌تر از الماس و در عین حال انعطاف‌پذیرتر از لاستیک است. همچنین، از فولاد قوی‌تر و از آلومینیوم سبک‌تر است، به‌طوری که به عنوان قوی‌ترین ماده شناخته‌شده در جهان شناخته می‌شود. از دیگر ویژگی‌های برجسته گرافن می‌توان به تحرک بالای الکترون‌های آن اشاره کرد که ۱۰۰ برابر سریع‌تر از سیلیکون حرکت می‌کنند. این ماده گرما را دو برابر بهتر از الماس هدایت می‌کند و رسانایی الکتریکی آن ۱۳ برابر بهتر از مس است. گرافن تنها ۲.۳٪ از نور بازتاب‌شده را جذب می‌کند و شفافیت آن باعث ایجاد خواص نوری منحصر به فرد در یک لایه اتمی شده است. این ترکیب همچنین نفوذناپذیر است، به‌طوری که حتی کوچکترین اتم (هلیوم) نیز نمی‌تواند از یک صفحه گرافن تک‌لایه بدون نقص عبور کند. مساحت سطح بالای گرافن ۲۶۳۰ متر مربع بر گرم است، به این معنی که با کمتر از ۳ گرم از آن می‌توان یک زمین فوتبال را به طور کامل پوشاند. گرافن به عنوان بلوک اصلی ساخت سایر مواد گرافیتی شناخته می‌شود و همچنین نماینده‌ای از یک کلاس جدید از مواد است که ضخامت آن‌ها تنها یک اتم است. این مواد به اصطلاح «مواد دو بعدی» یا ۲D نامیده می‌شوند، زیرا تنها در دو بعد (طول و عرض) گسترش می‌یابند و ضخامت آن‌ها (بعد

سوم) صفر در نظر گرفته می‌شود. گرافن همچنین در ساخت ساختارهای ناهمگن و اندروالسی مخلوط کاربرد دارد که می‌توانند از طریق هیبریداسیون گرافن با نقاط کوانتومی (0D) یا نانوذرات، ساختارهای نانو یک‌بعدی مانند نانوسیم‌ها یا نانولوله‌های کربنی، یا مواد فله‌ای سه‌بعدی تولید شوند. علاوه بر این، گرافن آتروژل به عنوان سبک‌ترین ماده ثبت‌شده در جهان، کاربردهای منحصر به فردی ارائه می‌دهد. این ویژگی‌های منحصر به فرد، گرافن را به ماده‌ای با پتانسیل نامحدود برای کاربردهای نوآورانه در حوزه‌های مختلف علمی و صنعتی تبدیل کرده‌است.

۴. نتیجه‌گیری

گرافن به‌عنوان یک حامل دارویی نویدبخش در دارورسانی به بافت‌های سرطانی محسوب می‌شود، زیرا دارای ویژگی‌های منحصر به فردی همچون سطح بزرگ و خواص الکتریکی و حرارتی است که امکان بارگذاری و تحویل هدفمند داروها را فراهم می‌کند. این نانوذرات می‌توانند داروها را به‌طور خاص به سلول‌های سرطانی هدایت کرده و با استفاده از تحریکات الکتریکی یا حرارتی، داروها را آزاد کنند. مزایای استفاده از گرافن شامل کاهش عوارض جانبی و افزایش کارایی درمان است، اما چالش‌هایی نظیر سمیت و هزینه تولید نانوذرات با کیفیت بالا نیز وجود دارد. بنابراین، گرافن می‌تواند به بهبود نتایج درمان سرطان کمک کند، اما نیاز به تحقیقات بیشتری برای ارزیابی ایمنی و حل چالش‌های موجود دارد.

۵. مراجع

- [۱] رضانی، شریف، خرم شکوه، & عقیقه. (۲۰۱۵). نانوکامپوزیت‌های پلیمری بر پایه گرافن. فصلنامه علمی بسپارش، ۴(۴)، ۸۶-۱۰۷.
- [۲] رفیعی، رعنا، رنجبر، & یاری. (۲۰۱۶). مروری بر خواص گرافن و آستانه فراگیری الکتریکی پوشش‌های حاوی گرافن. مطالعات در دنیای رنگ، ۶(۳)، ۳۹-۵۳.
- [۳] ثابت داریانی، & هادی طالع. (۲۰۱۵). بررسی خواص الکتریکی ذرات گرافن. فیزیک کاربردی ایران، ۵(۲)، ۵۱-۶۶.
- [۴] غلامی، & مهدوی. (۲۰۲۳). سنتز و کاربرد نانوذرات گرافن اکسید و گرافن اکسید سولفونه جهت استفاده در غشاهای نانوفیلتراسیون پلی اتر سولفون. شیمی کاربردی روز، ۱۸(۶۶)، ۲۴۱-۲۶۰.
- [۵] جعفری‌فرد، ابراهیمی، & شریف. (۲۰۲۳). بررسی خواص و رفتار پخت سامانه تابش‌پز نانوکامپوزیت اپوکسی اکریلات/اکسید گرافن. علوم و فناوری رنگ، ۱۷(۳)، ۱۸۹-۲۰۱.
- [6] Razaq, A., Bibi, F., Zheng, X., Papadakis, R., Jafri, S. H. M., & Li, H. (2022). Review on graphene-, graphene oxide-, reduced graphene oxide-based flexible composites: From fabrication to applications. *Materials*, 15(3), 1012.
- [7] Urade, A. R., Lahiri, I., & Suresh, K. S. (2023). Graphene properties, synthesis and applications: a review. *Jom*, 75(3), 614-630.
- [8] Kumar, V., Kumar, A., Lee, D. J., & Park, S. S. (2021). Estimation of number of graphene layers using different methods: a focused review. *Materials*, 14(16), 4590.
- [9] Saadh, M. J., Mirzaei, M., Dhiaa, S. M., Hosseini, L. R., Kushakova, G., Da'i, M., & Salem-Bekhit, M. M. (2024). Density functional theory assessments of an iron-doped

- graphene platform towards the hydra anticancer drug delivery. *Diamond and Related Materials*, 141, 110683.
- [10] Itoo, A. M., Vemula, S. L., Gupta, M. T., Giram, M. V., Kumar, S. A., Ghosh, B., & Biswas, S. (2022). Multifunctional graphene oxide nanoparticles for drug delivery in cancer. *Journal of Controlled Release*, 350, 26-59.
- [11] Parvaneh, S., Pourmadadi, M., Abdouss, M., Pourmousavi, S. A., Yazdian, F., Rahdar, A., & Díez-Pascual, A. M. (2023). Carboxymethyl cellulose/starch/reduced graphene oxide composite as a pH-sensitive nanocarrier for curcumin drug delivery. *International Journal of Biological Macromolecules*, 241, 124566.
- [12] Rajaei, M., Rashedi, H., Yazdian, F., Navaei-Nigjeh, M., Rahdar, A., & Díez-Pascual, A. M. (2023). Chitosan/agarose/graphene oxide nanohydrogel as drug delivery system of 5-fluorouracil in breast cancer therapy. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 82, 104307.