هشتمین کنفرانس بین المللی مطالعات بین رشته ای در مدیریت و مهندسی
8th International Conference on Interdisciplinary Studies in Management & Engineering (ICISME-2023)
۲۹ و ۳۰ آذر ۱۴۰۲
دانشگاه تهران
December 20th & 21th ,2023 | University of Tehran
OxfordCert Universal
Archive of SID

نانولوله‌های کربنی: مروری بر سنتز، خواص و کاربردها

جواد سلطان محمدی
دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک گرایش ذرات بنیادی و نظریه میدان ها دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.
Javadsoltan966@gmail.com

بابک وکیلی
عضو هیات علمی گروه فیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، تهران، ایران.
b.vakili@iauctb.ac.ir

شهرام سلیمانی
عضو هیات علمی گروه فیزیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران.
Shahram22s2000@yahoo.com

چکیده
نانولوله های کربنی (CNTs) به دلیل مساحت سطح بالا، نسبت ابعاد بالا و خواص چشمگیر مواد مانند استحکام مکانیکی و هدایت حرارتی و الکتریکی، به عنوان یکی از مواد ایده آل برای ساخت مواد کامپوزیتی نسل بعدی در نظر گرفته می شوند. علیرغم ویژگی های جذاب ذکر شده، آنها به دلیل ساختار شیمیایی ذاتی خود تمایل به تجمع دارند که کاربرد آنها را محدود می کند. اصلاح سطح برای غلبه بر تجمع و افزایش پراکندگی آنها که منجر به برهمکنش های افزایش یافته CNT های عامل دار با مواد ماتریس/ماتریس های پلیمری می شود، مورد نیاز است. پیشرفت‌های اخیر در مورد روش‌های قابل اعتماد برای عامل‌سازی نانولوله‌های کربنی، انگیزه بیشتری را برای گسترش حوزه‌های کاربرد آنها ارائه می‌کند. مقاله مروری حاضر به معرفی جزئیات، طبقه بندی، تکنیک های ساخت و کاربرد نانولوله های کربنی می پردازد. در حال حاضر تکنیک های مختلفی برای ساخت MWNT یا SWNT استفاده می شود. خواص CNT ها ارتباط نزدیکی با ساختار آنها دارد و جذب CNT ها ماهیت وابسته به شدت اشباع پذیر است.

واژگان کلیدی: نانو لوله‌های کربنی، CVD، CNTs، MWNT، SWNT

مقدمه

از زمان کشف نانولوله های کربنی توسط Iijima در سال ۱۹۹۱، نانولوله های کربنی (CNTs) توجه قابل توجهی را در تحقیقات کاربردی به خود جلب کرده اند.(Iijima and Ichihashi, 1993) به طور عمده دو نوع نانولوله کربنی وجود دارد: (۱) نانولوله های تک جداره (SWCNT) و (۲) نانولوله های چند جداره (MWCNT). هر دو نوع دارای صفحات گرافن رول شده هستند که استوانه های نانولوله ای را تشکیل می دهند. دیواره نانولوله‌ها از شش ضلعی‌های کربنی تشکیل شده است و انتهای لوله‌ای منحنی دارای مقداری پنج ضلعی کربنی است. ویژگی های برجسته هر دو نوع نانولوله کربنی در جدول ۱ آورده شده است .

www.SID.ir

Archive of SID

جدول ۱ ویژگی های برجسته SWCNT و MWCNT

	SWCNTs	MWCNTs
۱	تک لایه گرافن با قطر ۰,۴ تا ۳,۰ نانومتر	چند لایه (۲ تا ۵۰) گرافن با قطر ۱,۴ تا ۱۰۰ نانومتر (۱۵ تا ۵۵ نانومتر ترجیح داده می شود)
۲	کاتالیزور برای سنتز مورد نیاز است	بدون کاتالیزور قابل تولید است
۳	سنتز توده ای به دلیل نیاز به کنترل مناسب بر رشد و شرایط جوی دشوار است	سنتز فله آسان است
۴	طهارت ضعیف است	خلوص بالاست
۵	عملکردی سازی گاهی منجر به ایجاد نقص می شود	احتمال ایجاد نقص در طول عملکرد نسبتاً کمتر است
۶	شخصیت پردازی و ارزیابی آسان است	این یک ساختار بسیار پیچیده است
۷	به راحتی قابل چرخش و انعطاف پذیری است	به راحتی نمی توان پیچ خورد

سنتز نانولوله های کربنی

چندین روش برای سنتز نانولوله‌های کربنی گزارش شده است، (Dubey et al, 2021) (Singh et al, 2017) (Anazawa et al, 2002) (Shi et al, 2000) (Journet et al, 1997) (Sun et al, 2007) اما رایج‌ترین روش‌ها عبارتند از تخلیه قوس الکتریکی، ابلیشن لیزری و رسوب شیمیایی بخار (CVD) شرح مقایسه ای این سه روش در جدول ۲ آورده شده است. (Arepalli, 2004) (Nayak and Hasnain, 2019) علاوه بر این، چند روش کمتر مورد استفاده برای سنتز نانولوله ها عبارتند از: فرآیند کاتالیزوری فاز گاز (HiPCO)، سنتز شعله، روش میکروکره پلیمری پوسته هسته، روش پیش ساز آئروسل ، فرآیند آب قوس، مسیر دمای پایین، روش پلاسما، روش بستر سیال و فرآیند اسپری نبولیزه. (Verma et al, 2020) (Lee et al, 2000) (Li et al, 2001) (Zhang et al, 2000) (Su et al, 2000) (Noury et al, 2001) (Rajaura et al, 2019) (Nikolaev et al, 1999) (Vander et al, 2002) (Huličová et al, 2002) (Edgar et al, 2004) (Lofrano et al, 2005) (Shao et al, 2004) (Li et al, 2004) (Kinloch et al, 2004)

جدول ۲ مقایسه روش های سنتز اصلی نانولوله های کربنی

تخلیه قوس	ابلیشن با لیزر	CVD	روش / الزامات
گرافیت خالص، به سختی به دست می آید	گرافیت، سخت به دست می آید	هیدروکربن های فسیلی و گیاهی، به وفور در دسترس است	مواد اولیه و در دسترس بودن
دسته دو میله گرافیتی که در فاصله چند میلی متری از هم قرار گرفته و به منبع تغذیه متصل می شوند. در ۱۰۰ آمپر کربن تبخیر شده و پلاسمای داغ تشکیل می دهد	پالس لیزری شدید دسته‌ای برای انفجار گرافیت برای تولید گاز کربن برای تشکیل CNT استفاده می‌شود و شرایط مختلفی برای بهینه‌سازی استفاده می‌شود که مقدار کافی SWCNT تولید می‌کند.	به طور مداوم، بستر را در یک کوره قرار داده و تا دمای بالا گرم می شود و به دنبال آن گاز حاوی کربن مانند متان به آرامی اضافه می شود. گاز تجزیه می‌شود و اتم‌های کربن آزاد می‌شود که ترکیب شده و نانولوله‌ها را تشکیل می‌دهند	ماهیت فرآیند و شرح
گاز بی اثر کم فشار (هلیوم)	گاز آرگون یا نیتروژن در ۵۰۰ تور	دماهای بالا بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد در فشار اتمسفر	شرایط فرآیند
بالا	بالا	کم	هزینه تولید
ضروری	ضروری	لازم نیست	بعد از درمان

www.SID.ir

خوب ۳۰-۹۰٪ حداکثر	متوسط ۷۰٪ حداکثر	بالا ۲۰-۱۰۰٪	بازده
لوله های کوتاه با قطر در محدوده ۱,۴-۰,۶ نانومتر	بسته های بلند لوله ها با طول ۵ تا ۲۰ میکرون و قطر جداگانه از ۱ تا ۲ نانومتر	لوله های بلند با قطرهای ۰,۶ تا ۴ نانومتر	SWCNT
لوله های کوتاه با قطر داخلی ۱-۳ نانومتر و قطر بیرونی تقریباً ۱۰ نانومتر	سنتز MWNT امکان پذیر است اما بسیار گران است	لوله های بلند با قطر در محدوده ۱۰ تا ۲۴۰ نانومتر	MWCNT
بالا	بالا	بالا	خلوص
کم	کم	بالا	نرخ تولید
بالا	بالا	در حد متوسط	نیاز انرژی
دشوار	دشوار	آسان	طراحی راکتور
ارزان تر با سنتز هوای آزاد. می تواند به راحتی SWNT و MWNT تولید کند. SWNT با چند نقص ساختاری و MWNT حتی بدون کاتالیزور	SWNT های با کیفیت خوب با عملکرد بالا و توزیع باریک در مقایسه با تخلیه قوس	مقیاس پذیری آسان، فرآیند ساده، SWCNT های طولانی با قطر قابل کنترل و خلوص خوب	مزایای
خالص سازی گسترده مورد نیاز است زیرا نانولوله ها کوتاه هستند و دارای اندازه ها و جهت های تصادفی هستند	روشی پرهزینه، زیرا به لیزرهای گران قیمت و توان بالا، محدود به مقیاس آزمایشگاهی نیاز دارد	CNT های سنتز شده معمولاً دارای نقص هستند	معایب
Singh et al, 2021) (Dubey et al, 2017) (Anazawa et al, 2002) (Shi et al, 2000) (Journet et al, 1997) (Sun et al, 2007)	Nayak and Arepalli, 2004) (Hasnain, 2019)	Lee et al, 2020) (Verma et al, 2000) (Li et al, 2001) (Zhang et al, 2000) (Su et al, 2000) (Noury et al, 2001) (Rajaura et al, 2019)	منابع

3

خواص چشمگیر نانولوله های کربنی

CNT ها دارای خواص باشکوه بسیاری هستند که محققان بسیاری از رشته ها را برای انجام مطالعات فشرده ترغیب کرده است. خواص چشمگیر در جنبه های مختلف مکانیکی ، الکتریکی، حرارتی، شیمیایی و بیولوژیکی به طور خلاصه در این بخش ارائه شده است. علاوه بر آنها، اندازه کوچک نانولوله ها که منجر به مزایای منحصر به فرد بسیاری می شود نیز مورد بحث قرار خواهد گرفت.

خواص مکانیکی

CNT ها دارای سفتی و استحکام محوری بالایی هستند که در نتیجه پیوند کربن-کربن sp^2 است . آن‌ها سفت ترین فیبر شناخته شده هستند، با مدول یانگ TPa ۱,۴ اندازه گیری شده است. ازدیاد طول آنها تا شکست ۲۰ تا ۳۰ درصد است که همراه با سختی، استحکام کششی بالاتر از ۱۰۰ گیگا پاسکال را ایجاد می کند که بالاترین میزان شناخته شده تاکنون است. برای مثال مدول یانگ فولاد با استحکام بالا حدود ۲۰۰ گیگا پاسکال و استحکام کششی آن ۱ تا ۲ گیگا پاسکال است. (Vivekchand et al, 2004) (Robertson et al, 1992) (Yu et al, 2000) (Yakobson et al, 1996)

خواص الکتریکی

www.SID.ir

خواص الکتریکی منحصر به فرد CNT ها از ویژگی های ۱ بعدی آن‌ها و ساختار الکترونیکی عجیب گرافیت ناشی می شود. مقاومت الکتریکی بسیار پایینی دارند. علاوه بر این، آنها بالاترین چگالی جریان را در بین مواد شناخته شده اندازه گیری شده نشان می دهند، به اندازه ۱۰۹ $A\ cm^{-2}$ نشان داده اند که حتی در دماهای پایین نیز ابررسانا هستند. این خواص الکتریکی منحصر به فرد برای ساخت نمایشگرهای انتشار میدانی (FED) و همچنین ساخت مدارهای کامپیوتری الکترونیکی کاملاً از نانولوله های کربنی استفاده می شود. (Tans et al, 1998) (Wei et al, 2001)

خواص حرارتی، شیمیایی و بیولوژیکی

قبل از CNT ها، الماس به عنوان بهترین رسانای حرارتی شناخته می شد. اکنون نشان داده شده است که CNT ها حداقل دو برابر الماس رسانایی گرمایی دارند. آنها از نظر شیمیایی بی اثر هستند، به خصوص زمانی که هیچ نقصی وجود ندارد. این باعث می شود که آنها از نظر شیمیایی پایدار و از نظر بیولوژیکی سازگار باشند. آن‌ها علاوه بر پایداری شیمیایی، نسبت سطح به حجم زیادی دارند و از این رو به ماده جالبی برای ذخیره هیدروژن تبدیل می شوند. از نظر کاربردهای بیولوژیکی، SWCNT ها به عنوان وسیله نقلیه دارورسانی برای وارد کردن مواد شیمیایی به سلول ها استفاده شده اند. (Hone et al, 2002) (Chen et al, 2008)

اندازه کوچک

بزرگترین مزیت CNT ها قطر کوچک آن‌ها است که به دلیل آن به نوک های معمولی AFM متصل شده اند تا قابلیت تفکیک آن‌ها بهبود یابد. اندازه کوچک SWCNT ها مطالعه اتصالات شیمیایی بین تنها یک جفت گیرنده/هدف را آسان‌تر می‌کند. یکی دیگر از کاربردهایی که از اندازه کوچک SWCNT ها استفاده می‌کند، به عنوان ساطع کننده الکترون است. از این نوع امیتر می‌توان برای استخراج الکترون برای تولید نور، اعم از مرئی (تلویزیون) یا اشعه ایکس (ماشین اشعه ایکس قابل حمل و با وضوح بالا) استفاده کرد. (Ito et al, 2001)

کاربردهایCNTs

در میان انبوهی از کاربردها برای CNT ها، کامپوزیت‌های پلیمری، ترانزیستورهای اثر میدانی، نمایشگرهای انتشار میدانی و ذخیره سازی هیدروژن امیدوارکننده‌ترین زمینه ها به نظر می رسد. به عنوان مثال، CNT ها به عنوان اجزای جدیدی برای الکترونیک مولکولی و برای ادغام در مدارهای معمولی در نظر گرفته شده‌اند. انتظار می‌رود کامپوزیت‌های پلیمری CNTسخت‌تر و مقاوم‌تر از سایر مواد باشند. اخیراً CNTها به عنوان منابع الکترون گسیل میدانی مورد استفاده قرار گرفته اند. این فناوری در ساخت نمایشگرهای صفحه تخت و اشعه ایکس به ژنراتورهای مایکروویو کاربرد دارد. در نهایت، ذخیره هیدروژن بر روی CNT ها نشان دهنده یک پیشرفت بزرگ در زمینه سلول های سوختی و نقطه عطفی به سمت سیستم های انرژی پاک است. (Avouris, 2002) (Safadi et al, 2002)(Fan et al, 1999)(Wang et al, 1998) (Dillon et al, 1997) (Ali et al, 2011)

معایب CNT ها

علیرغم خواص عالی و کاربردهای گسترده، فقدان حلالیت در محیط‌های آبی و آلی یک مانع تکنولوژیکی بزرگ برای CNT ها بوده است. این به دلیل ساختار پایدار آنها دارای عنصر کربن خالص است. علاوه بر این، آنها دارای نیروهای جاذبه واندروالسی برد بسیار بالایی هستند که به همین دلیل تمایل به جمع شدن با هم دارند و پراکندگی آنها بسیار دشوار می شود. بنابراین پردازش پذیری ضعیف به دلیل ماهیت نامحلول و غیرقابل حل آنها مانع استفاده از آنها در بسیاری از کاربردها شده است. برای غلبه بر این مشکل پردازش پذیری ضعیف و به منظور استفاده کامل از خواص CNT ها، عاملی سازی و حل شدن CNT ها اخیراً مورد توجه قرار گرفته است. این کمک می کند تا زمینه های کاربردی آنها بسیار گسترش یابد. (Moreira et al, 2010) (Chen et al, 2004)

www.SID.ir

عملکرد CNT ها و مزایای ارائه شده

فانکشنالیزاسیون تولید گروه های عاملی بر روی سطوح CNT ها است. این گروه‌های عاملی به کاهش نیروهای جذبی واندروالسی برد طولانی کمک می‌کنند و برهمکنش CNT-ماتریس/حلال را افزایش می‌دهند و باعث پراکندگی همگن می‌شوند یا منجر به انحلال CNTها می‌شوند. اثر عامل دار شدن CNT ها بر خواص در جدول ۳ آورده شده است . بنابراین عامل دار کردن واکنش پذیری را افزایش می دهد، حلالیت را بهبود می بخشد و راهی برای اصلاحات شیمیایی بیشتر CNT ها مانند جذب یون، رسوب فلز، واکنش های پیوند و غیره فراهم می کند. واکنش های شیمیایی با سایر گروه های عاملی با در نظر گرفتن مزایای ارائه شده توسط عامل دار کردن CNT ها، مطالعات مدل سازی زیادی برای پیش بینی خواص CNT های عامل دار و همچنین تاثیر آنها بر سایر مولکول های زیستی انجام شده است. (Dyke and Tour, 2004) (Zhu et al, 2003) (Yang et al, 2014) (Wolski et al, 2017) (Noordadi et al, 2018)

جدول ۳ اثر عاملی سازی CNT ها بر خواص

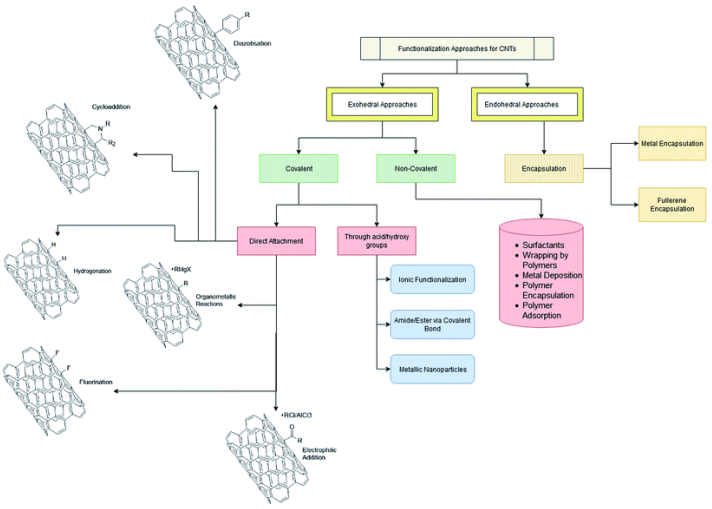
روش کارکردی سازی	افزایش اموال
فلوئوراسیون	حلالیت افزایش یافته در حلال های آلی
3،1- سیکلودافزودن دوقطبی	حلالیت تقویت شده در حلال های آبی و آلی
کاهش نمک آریل دیازونیوم	حلالیت افزایش یافته در حلال های آلی
عملکرد گونه های واکنشی	عملکرد مشتق بیشتر
افزودنی الکتروفیلیک	عملکرد مشتق بیشتر
تشکیل کمپلکس مولکولی حاوی فلز	حلالیت و پایداری افزایش یافته در حلال های آلی
کربوکسیلاسیون	مشتق‌سازی بیشتر، به‌عنوان پیوند دهنده مولکولی برای اتصال نانولوله‌ها استفاده شود
رسوب نانوذرات	محلول در آب و قادر به به دام انداختن یون های فلزی محلول در آب
عملکرد سورفکتانت	پراکندگی تقویت شده
بسته بندی پلیمری	به طور برگشت پذیر در پراکندگی پایدار در آب در آب و حلال های آلی حل می شود
جذب پلیمر	افزایش توانایی لنگر انداختن پروتئین‌ها و مولکول‌های زیستی کوچک، افزایش پراکندگی در حلال‌های آلی
کپسولاسیون پلیمری	افزایش پراکندگی CNT ها در طیف گسترده ای از حلال های قطبی و غیر قطبی و ماتریس های پلیمری
رسوب فلز	ساختارهای نانوسیم فلزی با پشتیبانی از نانولوله فلزی

در این بررسی، ما بر روی رویکردهای مختلف عامل‌سازی برای سنتز CNTهای عامل‌دار (f-CNTs)، که پیش‌نیاز اولیه برای کاربرد CNTها در هر منطقه هستند، تمرکز کرده‌ایم. هر دو روش کووالانسی و غیرکووالانسی برای عامل‌سازی به تفصیل مورد بحث قرار گرفته‌اند. مزایا و کاربردهای f-CNT ها نیز با تأکید ویژه بر کاربرد آنها در زمینه علوم مواد و زیست پزشکی، تصفیه آب و سیستم های دارورسانی مورد بحث قرار گرفته است. اگرچه بررسی های متفاوتی در مورد عملکرد CNT ها و کاربرد آنها در زمینه علوم زیست پزشکی، تحویل دارو، تصفیه آب و غیره در ادبیات منتشر شده است، اما نیاز به یک حساب جامع شامل حوزه های کاربردی مختلف با هم وجود دارد. در این بررسی گنجانده شده است. هدف، ارائه توضیحاتی مختصر و ارزشمند به خواننده در مورد استراتژی های کلیدی عملکردی توسعه یافته در این زمینه همراه با کاربردهای بالقوه آنها در زمینه های مورد علاقه انسان است. (Merum et al, 2017) (Basheer et al, 2020) (Alshehri et al, 2016) (Beg et al, 2018) (Pennetta et al, 2020) (Farghali et al, 2017) (Ali et al, 2019) (Dubey et al, 2021) (Ma et al, 2017)

www.SID.ir

روش های کاربردی سازی

همانطور که در طرح ۱ نشان داده شده است، بسیاری از روش های به خوبی گزارش شده برای عملکرد وجود دارد . به طور کلی می‌توان آن‌ها را به‌عنوان اگزوهدرال یا درون‌ودرال طبقه‌بندی کرد، بسته به اینکه اصلاح روی دیواره‌های بیرونی یا داخلی CNTها انجام شود. عاملدارسازی اگزوهدرال بیشتر به دو دسته تقسیم می‌شود: (الف) عاملدارسازی کووالانسی و (ب) عاملدارسازی غیرکووالانسی. جدول ۴ مزایا و معایب روش های مختلف عملکردی را نشان می دهد که در زیر مورد بحث قرار می گیرند.



طرح ۱ رویکردهای کاربردی برای CNT ها.

جدول ۴ مزایا و معایب روش های مختلف عملکرد CNT

روش هایی برای عملکرد CNT	مزایای	معایب	منابع
اگزوهدرال	ساختار اصلی CNT ها را مختل نمی کند	ویژگی ها مختص ماهیت گروه های عملکردی متصل هستند	
	خواص هر دو CNT ها و گروه عملکردی به دست آمده است		
کووالانسی	پیوندهای کووالانسی به عنوان مکان های جایگزین برای عامل دار شدن عمل می کنند	تغییر هیبریداسیون از sp^2 به sp^3 و از بین رفتن سیستم-p conjugationدر لایه گرافن	Yu et) (Lordi et al, 2001) (Variava et al, 2013) Zhang et al,) (Basheer et al, 2020) (al, 1998 Shi et) (Waje et al, 2005) (Li et al, 2007) (2010 Jiang et al,) (Muhammad et al, 2016) (al, 2006 (Hwang et al, 2003) (Ellis et al, 2003) (2003 (Sarlak et al, 2013)
	واکنش های جایگزینی ثانویه ممکن است	این منجر به خاموش شدن انتشار لوله می شود	
	عامل دار شدن منجر به افزایش حلالیت در آب و حلال های آلی می شود	گاهی اوقات CNT ها در این فرآیند به صورت اکسیداتیو مصرف می شوند	
	گروه های هیدروفیل وارد شده بر روی سطح CNT آنها را زیست سازگارتر و زیست تخریب پذیرتر می کند.		

www.SID.ir

Archive of SID

(Tan et al, 2007) (Fujigaya et al, 2015) (Steuerman et al, 2002) (Zheng et al, 2003) Fernando) (Tang et al, 1999) (Star et al, 2003) Murakami et) (Chen et al, 2001) (et al, 2004 (Kang et al, 2003) (Xia et al, 2003) (al, 2003 Qu) (Arnold et al, 2005) (Zhou et al, 2008) Quinn et) (Choi et al, 2002) (and Dail, 2005 (Zhang et al, 2000) (al, 2005	پایداری پراکندگی ها به ماهیت و غلظت سورفکتانت ها نیز بستگی دارد	امکان جذب گروه های مختلف بر روی سطح CNT بدون ایجاد اختلال در سیستم π ورقه های گرافن.	**غیر کووالانسی**
	بسته بندی پلیمری روی سطح CNTوابسته به حلال است	بخش آبگریز مولکول های جذب شده با دیواره های جانبی نانولوله از طریق فعل و انفعالات واندروالس، π-π، CH-πو دیگر فعل و انفعالات متصل می شود، در حالی که حلالیت در آب توسط بخش آبدوست مولکول ها تامین می شود.	
		از تجمع توسط نیروهای دافعه کولمبی بین CNT های اصلاح شده جلوگیری می شود	
		نانولوله های کربنی کپسوله شده پلیمری می توانند به خوبی در ماتریس های پلیمری و حلال ها پراکنده شوند.	
		NTها به عنوان یک الگوی رسوب الکترونی و متعاقباً به عنوان سیمی برای اتصال الکتریکی نانوذرات طلا، پلاتین و پالادیم رسوب‌شده عمل می‌کنند که منجر به ساختارهای نانوسیم فلزی با پشتیبانی از نانولوله‌های فلزی می‌شود.	
		استراتژی غیر کووالانسی برای اتصال گروه‌های عاملی کربوکسیلیک از طریق برهمکنش‌های انباشتگیp-p ، در نتیجه ایجاد پراکندگی‌های آبی پایدار و محدود کردن سمیت سلولی	
(Okazaki et al, 2002) (Bandow et al, 2001) (Hirahara et al, 2000) (Allen et al, 2011) (Burteaux et al, 1999) (Tománek et al, 2005) (Fan et al, 2000) (Grigorian et al, 1998)	این استراتژی مستلزم باز شدن CNTها است، معمولاً در شرایط تهاجمی، که ممکن است منجر به آسیب دیدن دیواره خارجی یا عملکرد سطح شود.	Buckytubes سیستم‌های حامل هوشمندی را تشکیل می‌دهند که ممکن است با مواد مناسب برای رفع نیازهای خاص پر شوند.	**اندوهدرال**
		CNTها را می توان با داروهای ضد مالاریا ضد سرطان پر کرد	
	بازده پر شدن نسبتاً کم است (به ندرت بالاتر از ۲۰٪) و با کاهش قطر CNT به طور چشمگیری کاهش می یابد، که این کار را در مورد SWNT و DWNTها دشوار می کند.	ترکیبات بیولوژیکی حساس با نقطه ذوب پایین یا سرعت تجزیه بالا می توانند به راحتی حل شده و وارد CNT ها شوند که در غیر این صورت از طریق یک مسیر فیزیکی غیرممکن است.	
		MWNTها اجازه آزادسازی طولانی مدت داروی کپسوله شده را می دهند و	

www.SID.ir

		در نتیجه اثر ضد سرطانی آن را افزایش می دهند.	

ویژگی های مهم CNT های عامل دار

انواع ترکیبات الیگومری و پلیمری به دلیل حلالیت آنها در حلال های آلی رایج و آب در عامل دار کردن CNT ها استفاده شده است. این عامل‌سازی، بسته‌های نانولوله‌ای را می‌شکند، که برای حلالیت ضروری است. به عنوان مثال، گروه‌های کربوکسیلیک f-CNTها می‌توانند به صورت یونی به یون‌های فلزی متصل شوند یا از طریق گروه‌های آلی مختلف به‌صورت کووالانسی پیوند بخورند. افزایش حلالیت ناشی از لایه برداری بسته های نانولوله مهم ترین، رایج ترین و مکرراً گزارش شده CNT های عامل دار شده است. ویژگی های آمید و استر به طور چشمگیری حلالیت خود را در حلال های آلی بهبود می بخشد. خواص حلالیت مشابهی نیز برای SWCNT های عامل دار شده با زوئیتریون آمین به دست آمد. علاوه بر این، نانولوله های پلیمری پیچیده شده نیز از محلول ترین نمونه ها هستند. SWCNT ها و MWCNT های عامل دار شده با پلیمرهای بسیار محلول PPEI-EI، PVA-VA و PEO و همچنین با قطعات دندرون مشتق شده از PEO نه تنها در حلال های آلی بلکه در آب نیز محلول هستند. گلوکزامین و ترکیبات پروتئینی با CNT ها بسیار محلول در آب هستند. چسباندن کمپلکس‌های فلزات واسطه به نانولوله‌ها حلالیت آن‌ها را در دی‌متیل فرمامید، دی‌متیل سولفوکسید، تتراهیدروفوران، متانول، کلروفرم، تولوئن و غیره افزایش می‌دهد. درخشندگی قوی برای CNTهای متصل شیمیایی به پلیمرهای مشتق‌شده PPEI-EI، PVA-VA و dendrondron و mo-PEO گزارش شده است. بازده کوانتومی لومینسانس قابل توجه بود، ۱۱٪ برای MWCNT-PPEI-EI در کلروفرم در تحریک ۴۰۰ نانومتر. (Díez-Pascua, 2021) (Naqvi et al, 2020)

کاربردهای CNT های عامل دار

نانولوله‌های کربنی عملکردی شده کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف علم مواد، علوم زیست پزشکی، تصفیه آب و سیستم‌های تحویل دارو پیدا می‌کنند که جزئیات در زیر مورد بحث قرار می گیرد:

علم مواد

در زمینه علم مواد، F-CNTها به طور گسترده برای توسعه نانوکامپوزیت های با کیفیت بالا مورد استفاده قرار می گیرند. استفاده از f-CNT ها برای ساخت کامپوزیت های پلیمری پیشرفته مزایای قابل توجهی را نسبت به استفاده از CNT های غیر عامل دار، با افزایش پراکندگی نانولوله های کربنی در ماتریس های پلیمری ارائه می دهد. بخش عملکردی پیوند سطحی را افزایش می دهد، در نتیجه، خروج فیبر در هنگام تنش یا درهم تنیدگی مکانیکی را در مقایسه با CNT های غیرعملکردی که در آن پراکندگی و پیوند بین سطحی یا درهم تنیدگی حداقل است، کاهش می دهد. برای مثال SWCNT های عاملدار کووالانسی به عنوان پرکننده با غلظت بیش از ۱ درصد وزنی در میزبانهای پلیمری مانندPMMA ، PSو غیره استفاده شده است. (Soleyman et al, 2015) (Dubey et al, 2021) (Shofner et al, 2006) (Kim et al, 2012) برای نانوکامپوزیت‌های پلی‌استایرن-f-SWCNT، افزایش قابل‌توجهی در ویسکوزیته و الاستیسیته سیستم در نرخ‌های برش کم حتی در بارگذاری ۱ درصد وزنی در مقایسه با بارگذاری ۳ درصد وزنی CNT خالص که مانند مایع باقی می‌ماند، مشاهده شد. (Mitchell et al, 2002) (Barraza et al, 2002) مشخص شد که نانولوله های کربنی کپسوله شده پلیمری می توانند به خوبی در یک ماتریس نایلون ۶ در مقایسه با نانولوله های کربنی اصلاح نشده پراکنده شوند، به دلیل چسبندگی سطح مشترک بین نانولوله های کربنی کپسوله شده پلیمری و نایلون ۶ مشخص شد که استحکام تسلیم ۳۰ درصد و مدول یانگ بهبود یافته است. ۳۵ درصد تنها با ۱ درصد وزنی نانولوله های کربنی کپسوله شده پلیمری. بنابراین انحلال نانولوله‌های کربنی از طریق عامل‌دارسازی شیمیایی یک رویکرد مؤثر برای دستیابی به پراکندگی همگن نانولوله‌های کربنی در ماتریس‌های پلیمری برای نانوکامپوزیت‌های با کیفیت بالا است. CNTهای عامل دار

www.SID.ir

Archive of SID

همچنین با عمل به عنوان مواد پشتیبانی، کاربرد گسترده ای در کاتالیز دارند VO Nyamoriو همکاران تکنیک‌های مختلف عامل‌سازی سطحی را برای بهبود خواص CNT برای استفاده به‌عنوان پشتیبان کاتالیزور، و همچنین روش‌های موجود برای بارگذاری نانوذرات کاتالیزور بر روی f-CNTs بررسی کرد. B. Ye و همکاران نانولوله کربنی فعال اکسیژن را برای کاهش کاتالیزوری انتخابی NOx با NH_3 گزارش کردند . گروه‌های عاملی اکسیژن بر روی سطح نانولوله‌های کربنی با عملیات اسیدی تولید شدند که به‌عنوان مکان‌های لنگر برای نانوذرات فلزات مختلف عمل می‌کردند. مواد کاربردی سنتز شده راندمان حذف NOx بیش از ۹۰٪ در دمای ۳۵۰-۳۸۰ درجه سانتیگراد را نشان دادند . مطالعات بیشتری به منظور نشان دادن اینکه نانوذرات فلزی که بر روی نانولوله‌های کربنی پشتیبانی می‌شوند، فعالیت کاتالیزوری بسیار بهبود یافته‌ای را انجام داده‌اند. Q. Wangو همکاران گزارش کرده‌اند که نانوذرات پلاتین رسوب‌شده روی نانولوله‌های کربنی عامل دار ®Nafion فعالیت کاتالیزوری بسیار بالاتری را برای واکنش کاهش اکسیژن نشان می‌دهند. ماده سنتز شده همچنین سرعت تجزیه آهسته‌تری را در آزمایش دوام با شتاب الکتروشیمیایی نشان داد و آن را به یک الکتروکاتالیست بالقوه برای کاربردهای پیل سوختی تبدیل کرد. (Planeix et al, 1994) (Wu et al, 2011) (Tessonnier et al, 2005) (John et al, 2012) (Melchionna et al, 2015) (Ye et al, 2020) (Labulo et al, 2017) (Wang et al, 2019)

علاوه بر نانولوله های کربنی با پوشش فلزی، نانولوله های کربنی پر شده با فلز نیز کاربردهای امیدوارکننده ای در کاتالیز ناهمگن نشان داده اند. گائو و همکاران یک استراتژی ساده برای بارگذاری f-CNT های چند آمینه با CdSe QD و نانوذرات مغناطیسی Fe_3O_4 از طریق جاذبه های الکترواستاتیکی گزارش کرد. مشاهده شد که هم خواص نوری QD ها و هم خواص مغناطیسی نانوذرات Fe_3O_4 حفظ شد و محصولات حاصل کاربردهای بالقوه ای در نانو حسگرها، اپتوالکترونیک، کاتالیز و سایر زمینه ها نشان دادند. علاوه بر کاتالیز، نانولوله های کربنی فلزی با پوشش فلزی و پر شده با فلز به دلیل خاصیت جذب الکترومغناطیسی کاربرد گسترده ای در فناوری پنهانکاری پیدا می کنند. (Gui et al, 2009) (Lin et al, 2007) (Li et al, 2006)

علوم زیست پزشکی

تثبیت مولکول های زیستی روی CNT ها برای جفت کردن خواص الکترونیکی NT ها با ویژگی های تشخیص خاص بیوسیستم های بی حرکت، محققان را برانگیخته است تا از CNT ها به عنوان نوع جدیدی از مواد بیوسنسور کوچک شده استفاده کنند. به عنوان مثال پروتئین های متالوتیونین در داخل به دام افتادند و بر روی سطوح بیرونی MWCNTs با انتهای باز قرار گرفتند. همچنین مشخص شد که استرپتاویدین در MWCNT ها احتمالاً از طریق برهمکنش های آبگریز بین نانولوله ها و حوزه های آبگریز پروتئین ها جذب می شود. مولکول های DNA جذب شده روی MWCNT ها از طریق برهمکنش های غیر اختصاصی نیز مشاهده شدند. علاوه بر MWCNT ها، SWCNTها نیز به صورت غیر کووالانسی عامل دار شده اند، و مولکول های بیولوژیکی مختلف متعاقباً روی f-SWCNT ها با درجه بالایی از کنترل و ویژگی تثبیت شده اند. هادون و همکاران استفاده از CNT های اصلاح شده شیمیایی را به عنوان بستری برای رشد نورون ها گزارش کردند. مشاهده شد که با دستکاری بار حمل شده توسط f-CNTها، می توان الگوی رشد و انشعاب فرآیندهای عصبی را کنترل کرد. دکر و همکاران گزارش کردند که آنزیم ردوکس گلوکز اکسیداز هنگامی که به CNT ها متصل می شود فعالیت آنزیمی آنها را حفظ می کند. همچنین، لوله پوشش داده شده با آنزیم به عنوان یک سنسور pH با تغییرات بزرگ و برگشت پذیر در هدایت بر روی تغییرات pH عمل می کند. (Guo et al, 1998) (Hu et al, 2004) (Chen et al, 2001) (Dubey et al, 2021) (Tsang et al, 1997) (Balavoine et al, 1999) (Besteman et al, 2003) انواع مختلف برهمکنش های بیومولکولی با دیواره های جانبی CNT ها به طور گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. به عنوان مثال، نمونه های محلول در آب IPEG-SWCNT به عنوان ماده اولیه در واکنش تبادل با پروتئین آلبومین سرم گاوی (BSA) تحت شرایط محیطی برای تهیه ترکیبات SWCNTs-BSA استفاده شده است.- I PEG

www.SID.ir

SWCNTsهمچنین در حلال های آلی مانند کلروفرم محلول است، اما مزدوج SWCNTs-BSA فقط در آب محلول است. بنابراین تغییر حلالیت به عنوان یک شاخص برای تبدیل استر به آمید در واکنش تبدیل عمل می کند. نتایج TEM تأیید کرده است که نمونه مزدوج حاوی SWCNT های به خوبی پراکنده است. (Wu et al, 2005) (Pantarotto et al, 2003) (Wolski et al, 2018) (Panczyk et al, 2020) (Shim et al, 2002) (Zorbas et al, 2004) (Wang et al, 2003) (Zhang et al, 2019)

تصفیه آب

تحقیق در مورد مواد ایمن موثر و اقتصادی که بتواند آلودگی های فعلی و آتی آب را از بین ببرد، موضوعی علمی و فناوری است که برای جامعه علمی اهمیت اولیه دارد و دانشمندان سراسر جهان عمیقاً درگیر این تحقیق هستند. در میان بسیاری از موادی که برای این منظور تولید شده‌اند، نانولوله‌های کربنی به‌ویژه نانولوله‌های کربنی عامل‌دار شده به‌طور گسترده برای کاربرد مذکور مورد تحقیق قرار گرفته‌اند . KM Lee و همکاران پتانسیل جذب F-CNT ها را برای حذف آلاینده های آب بررسی کرد(Lee et al, 2018). M. Barrejónو همکاران حذف جذبی آلاینده‌های آب را با استفاده ازSWCNT های متقاطع شیمیایی مورد مطالعه قرار داد. (Barrejón et al, 2019) (Jame et al, 2016) آنها گزارش کردند که جاذب های CNT دارای پیوند متقابل قابلیت جذب انتخابی همراه با قابلیت بازیافت خوب برای حذف روغن ها و مواد آلی از آب آلوده را نشان می دهند. جام و همکاران استفاده از فیلترهای CNT های فعال الکتروشیمیایی را به عنوان یک فناوری کارآمد برای تصفیه آب و فاضلاب با هدف قرار دادن آلاینده های شیمیایی و بیولوژیکی بررسی کرد. مزیت استفاده از فیلترهای CNT های فعال الکتروشیمیایی این است که آنها الکترواکسیداسیون اضافی آلاینده های جذب شده را فراهم می کنند و بنابراین اثربخشی درمان را افزایش می دهند. اصول کار، عوامل تاثیرگذار و آخرین پیشرفت‌های فیلترهای CNT فعال الکتروشیمیایی همراه با چالش‌ها و دیدگاه‌های آینده مورد بحث قرار گرفته‌اند. سی یانگ و همکاران فیلترهای CNT های اصلاح شده با اکسید فلز را برای تصفیه آب الکتروکاتالیستی به ویژه برای حذف فنل مطالعه کردند. مشاهده شد که عملکرد عملکرد CNT اصلاح شده در مقایسه با فیلترهای CNT خالی تقریباً دو برابر بود (Yang et al, 2019). در طیف گسترده ای از آلاینده های آب، CNTهای مغناطیسی (MCNT) توسط وانگ و همکاران استفاده شده است (Wang et al, 2013). برای حذف قطرات روغن از آب آلوده. نویسندگان نانوذرات اکسید آهن سوپرپارامغناطیس (SPIONs) نانوذرات اکسید آهن را برای جداسازی نفت و آب طراحی، ساخته و ارزیابی کرده‌اند. آنها نشان داده اند که ماده سنتز شده روغن را از طریق یک مکانیسم دو مرحله ای حذف می کند، جایی که در مرحله اول MCNT ها در سطح مشترک روغن-آب پراکنده می شوند و در مرحله دوم قطرات روغن را با خود به وسیله آهنربا از آب بیرون می کشند. آنها همچنین اشاره کرده اند که ۸۰ درصد از ظرفیت جداسازی را می توان با شستشوی ۱۰ دقیقه ای با استفاده از ۱ میلی لیتر اتانول برای هر ۶ میلی گرم MCNT بازیابی کرد. جی لیو و همکاران از نانولوله های کربنی چند جداره عامل دار برای جداسازی روغن امولسیون شده از فاضلاب روغنی استفاده کردند(Liu et al, 2016). بر اساس مقاله اخیر N. Al-Jammal نانولوله های کربنی عامل دار برای حذف هیدروکربن از آب استفاده شده است(Al-Jammal et al, 2020). طبق گزارش اخیر TA Abdullah و همکاران-f CNTها با موفقیت برای پاکسازی نشت نفت از آب استفاده شده اند(Abdullah et al, 2021). CNT های عامل دار نیز برای نمک زدایی استفاده شده اند. هونگ و همکاران استفاده از نانولوله‌های کربنی عاملدار شده برای نمک‌زدایی آب را گزارش کرد. در یک فرم غشایی، غشاهای نانوکامپوزیت نانولوله کربنی/پلی آمیدی عاملدار شده با زویتریون برای نمک زدایی آب استفاده شده است(Hong et al, 2019). ZZ Chowdhuryو همکاران جنبه فیزیکی و شیمیایی را همراه با مکانیسم کار غشاهای CNT اصلاح شده الکتروشیمیایی برای نمک زدایی و تصفیه آب بررسی کرد(Chowdhury et al, 2018). داس و همکاران سنتز و ارزیابی غشاهای نانوفیلتراسیون کامپوزیت پلیمری مبتنی بر نانولوله کربن عامل دار شده برای نمک زدایی را گزارش کرد(Das et

www.SID.ir

al, 2014). فراهانی و همکاران همچنین مطالعه غشاهای نانو فیلتراسیون مبتنی بر نانولوله های کربنی چند جداره آمین عامل دار شده با آمین را برای نمک زدایی به دلیل ظرفیت جذب بالای آنها گزارش کرد(Farahani et al, 2018). IG Wenten و همکاران پیشرفت عامل‌سازی CNT اعمال شده در فیلتراسیون غشایی را با توجه به خواص غشا و عملکرد آنها بررسی کرد(Wenten et al, 2017). Dubey و همکاران عملکرد نانولوله های کربنی خالص (P-CNTs) و نانولوله های کربنی پلی اتیلن گلیکول (PEG-CNTs) را برای حذف کروم (Cr) و روی (Zn) از فاضلاب باتری توسط فرآیند جذب دسته ای به عنوان تابعی از زمان تماس مورد مطالعه قرار دادند(Dubey et al, 2021). دوز جاذب و دما نتایج نشان داد که زمان تماس و دوز جاذب بهینه برای حذف کروم و روی توسط P-CNT و PEG-CNTs به ترتیب ۹۰ و ۵۰ دقیقه و ۰,۳ گرم بود. این مطالعه نشان داد که PEG-CNT ها در مقایسه با P-CNT عملکرد بهتری داشتند. EM Elsehly و همکاران استفاده از نانولوله های کربنی عامل دار را برای ساخت فیلترها برای حذف کروم از محلول های آبی گزارش کرد(Elsehly et al, 2017). حذف فلزات سنگین از آب با استفاده از نانولوله های کربنی چند مرحله ای عامل دار شده توسط D. Budimirović و همکاران گزارش شده است(Budimirović et al, 2017). در گزارش اخیر MM Aslam و همکاران تهیه و کاربرد f-CNT ها برای تصفیه آب و فاضلاب بررسی شده است(Aslam et al, 2021). مشاهده شد که نانولوله های کربنی عامل دار ثابت کرده اند که نانومواد امیدوارکننده ای برای آلودگی زدایی آب به ویژه به دلیل ظرفیت جذب بالایشان هستند. Barkhudarov و همکاران گزارش فعالیت ضد باکتریایی عالیMWCNT های نانوذرات نقره را علیه دو باکتری بیماری زا، سودوموناس آئروژینوزا و استافیلوکوکوس اورئوس گزارش کردند(Barkhudarov et al, 2020). اخیراً اس ام الحکامی و همکاران استفاده از نانولوله های کربنی عامل دار شده با تابش مایکروویو ۱ (C18) octadecanol-برای حذف اشریشیا کلی (E. coli) از آب گزارش شده است(Al-Hakami et al, 2013). آنها مشاهده کردند که CNT های اصلاح نشده تحت تابش مایکروویو تنها تا ۹۸٪ از باکتری ها را از آب حذف می کنند، در حالی که CNTs-C18 می توانند تا ۱۰۰٪ از باکتری ها را در شرایط مشابه حذف کنند.

سیستم تحویل دارو

نانولوله های عامل دار به دلیل کارایی بالای بارگذاری دارو و سطح فوق العاده بالا به عنوان یک وسیله نقلیه جدید و همه کاره برای دارورسانی ظاهر شده اند(Karimi et al, 2015). S. Sharma و همکاران اثر عاملدارسازی بر پتانسیل تحویل داروCNT ها را مورد مطالعه قرار داد که در آن نتایج زمان مقاومت طولانی‌تری را با مشخصات رهش پایدار برایMWCNT های مهندسی شده سطح بارگذاری شده با دارو نشان داد(Sharma et al, 2016). S. Prakash و همکاران استفاده از f-CNT ها را به عنوان وسایل انتقال دارو در رابطه با درمان سرطان مرور کرد(Prakash et al, 2011). CL Lay و همکاران همچنین استفاده از F-CNTها را برای تحویل داروی ضد سرطان مورد مطالعه قرار داد(Lay et al, 2011). آنها گزارش دادند که به طور گسترده ای مورد استفاده برای عامل دار کردن، پلی (اتیلن گلیکول) است که زیست سازگاری و پراکندگی CNT ها را در محلول آبی افزایش می دهد. اثربخشی درمان f-CNT های بارگذاری شده با داروهای ضد سرطان، مانند دوکسوروبیسین، و پاکلیتاکسل هر دو با تکنیک های in vitro و in vivo مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که f-CNT ها برای توسعه سیستم های تحویل منحصر به فرد برای داروهای ضد سرطان امیدوار کننده هستند. JM Tan و همکاران زیست سازگاری f-CNT ها را در طراحی سیستم های دارورسانی مورد بررسی قرار داد، جایی که رهاسازی دارو از CNT ها با استفاده از محرک های مختلف مانند میدان مغناطیسی یا الکتریکی و تغییرات در pH حاصل شد(Tan et al, 2014). آنها پارامترهای مختلفی را که مسئول دستیابی به راندمان درمانی بالاتر تحویل داروی هدفمند هستند، مورد بحث قرار داده اند. اخیراً S. Paliwal و همکاران ، F-CNTها را به عنوان یک سیستم انتقال داروی نانو حامل بررسی کردند(Paliwal et al, 2020).مطالعات مدل‌سازی مولکولی نیز برای به دست آوردن درک مکانیکی از عملکرد سطحی نانولوله‌های کربنی به عنوان یک نانوحامل با داروی ضد سرطان کلادریبین انجام شده است(Lotfi et al,

www.SID.ir

2018). مطالعات با استفاده از تئوری تابعی چگالی و محاسبات شبیه‌سازی دینامیک مولکولی برای بررسی عملکرد دارورسانی SWCNTهای عاملدار شده با یک گروه اسید کربوکسیلیک برای داروی ضد سرطان فلوتامید در فاز گاز و همچنین محلول آب انجام شده است(Kamel et al, 2018). AA Bhirde و همکاران توزیع و پاکسازی پلی اتیلن گلیکول (PEG)-SWCNTs را به عنوان وسایل انتقال دارو برای داروی ضد سرطان سیس پلاتین مورد مطالعه قرار دادند، جایی که مهار رشد تومور در موش مورد مطالعه قرار گرفت(Bhirde et al, 2010). مطالعات نشان داد که SWCNT های کنترل در مقایسه با PEG-SWCNT ها به صورت توده های بزرگ در بافت های ریه قرار می گیرند که تجمع کم یا بدون آن را نشان می دهند. جی چن و همکاران استفاده از f-SWCNT ها را به عنوان وسیله ای برای تحویل دارو با هدف تومور مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که مواد دارای قدرت بالایی نسبت به رده های سلولی سرطانی خاص هستند. در بررسی اخیر، J. Jampilek و همکاران جدیدترین نانوسیستم‌های طراحی‌شده مبتنی بر گرافن و نانولوله‌های کربنی عامل‌دار را به‌طور عمده برای درمان ضد سرطان خلاصه کرد. (Jampilek et al, 2021)

توصیه های آینده

کارکردی کردن CNT ها باعث شده است که معایب مرتبط با CNT های بکر برطرف شود و همچنین ویژگی های آنها برای کاربردهای خاص تنظیم شود. علاوه بر این، در دسترس بودن طیف گسترده ای از رویکردهای عملکردی مورد بحث در این مقاله، فرصتی برای انتخاب عاقلانه یک روش خاص که منجر به عملکرد و عملکرد مورد نیاز می شود، می دهد. نه تنها گروه‌های عاملی به سطح و نوک نانولوله‌های کربنی اضافه شده‌اند، بلکه این نانومواد منحصربه‌فرد به‌عنوان وسیله‌ای حمل‌کننده مملو از انواع مولکول‌های بیولوژیکی و داروها برای تحویل هدفمندشان به هر عضوی از بدن انسان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با افزایش کاربرد F-CNT ها در مناطق مختلف، خطرات ناشی از قرار گرفتن در معرض آنها هم برای انسان و هم با محیط زیست افزایش می یابد. اگرچه مطالعات زیادی هر از گاهی انجام شده است که توجه جامعه علمی را به سمت معایب و خطرات ناشناخته مرتبط با این مواد جلب می کند، هنوز درک عمیق تر از آسیب آنها به محیط زیست و بدن انسان ضروری است. (Bianco et al, 2011) (Das et al, 2015) (Ma et al, 2010) (Singhai et al, 2020) (Hwang et al, 2017) (Zhang et al, 2010) (Liopo et al, 2006) (Pastorin et al, 2009) (Ménard-Moyon et al, 2010) از این نظر، گروه‌های عملکردی جدیدی توسط محققان مختلف برای مقابله با مسئله زیست سازگاری گزارش شده‌اند. چنین گروه هایی ممکن است برای عملکرد نانولوله های کربنی به منظور افزایش زیست سازگاری آنها ترکیب شوند. مقدار زیادی کار روی خواص عملکردی F-CNT ها انجام شده است که بدون شک کاربرد این ماده را افزایش می دهد. با این حال، هنوز حجم بیشتری از کار برای ساختن این ماده زیست‌دوستانه و سازگار با محیط زیست انجام نشده است. برای کاهش نگرانی سمیت f-CNT ها، ابزارهای محاسباتی نیز می توانند مانندAutodock ، Gaussian و غیره مورد استفاده قرار گیرند. (Koromilas et al, 2014) (Allegri et al, 2016) (Rodrigues et al, 2013) (Mohammadi et al, 2020) (Ursini et al, 2012) (Coccini et al, 2010) (Song et al, 2019)

نتیجه گیری

CNT ها به دلیل خواص منحصر به فرد و کاربرد گسترده خود در حوزه های مختلف علم و فناوری، توجه جامعه علمی را به خود جلب کرده اند. اما آنها همچنین دارای معایبی هستند که مانع از تبدیل شدن آنها به مواد ایده آل برای کاربردهای پیشنهادی می شود. اولین مورد هزینه است. به طور معمول آنها با روش های مختلف به ویژه با تخلیه قوس، تبخیر لیزری و CVD سنتز می شوند. اما در حال حاضر تغییرات مختلفی در این تکنیک و همچنین تکنیک های جدید پدید آمده است که هزینه را به میزان قابل توجهی کاهش می دهد. از سوی دیگر، نانولوله‌های کربنی خام حاوی ناخالصی‌هایی مانند نانوذرات فلزی و کربن آمورف هستند که با استفاده از اسیدهای قوی و عوامل اکسیدکننده حذف می‌شوند. CNT های خالص شده بی اثر هستند و به دلیل نیروهای قوی واندروالس

www.SID.ir

تمایل به تجمع دارند و از این رو پراکندگی و اثر تقویت کننده سرکوب می شود. برای غلبه بر تجمع و افزایش پراکندگی، عملیاتی سازی مورد نیاز است. تکنیک‌های مختلف کووالانسی و غیرکووالانسی اگزوهدرال و اندوهدرال عامل‌سازی برای بهبود ویژگی‌های عملکردی آن‌ها استفاده می‌شود. CNT های عامل دار امکان مشتق سازی شیمیایی بیشتر را فراهم می کنند و بنابراین تطبیق پذیری بیشتری برای کاربردهای CNT ها در زمینه های مختلف مانند علم مواد، علوم زیست پزشکی و تصفیه آب دارند. نانولوله های کربنی عامل دار به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته و با موفقیت به عنوان جاذب برای حذف آلاینده های سمی مانند کروم، آرسنیک، روی و غیره همراه با آلاینده های مایع مانند روغن ها و حلال های آلی مورد استفاده قرار گرفته اند. آنها برای ساخت غشاهای فوق العاده و نانو فیلتراسیون برای کاربرد نمک زدایی استفاده شده اند. نانولوله های کربنی عامل دار نیز برای گندزدایی آب با حذف میکروارگانیسم های بیماری زا از آب استفاده شده است. CNT های عامل دار همچنین برای انتقال دارو در تومورهای جامد و سرطان و بسیاری از کاربردهای زیست پزشکی دیگر مفید هستند.

منابع

Iijima, S., & Ichihashi, T. (1993). Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter. nature, 363(6430), 603-605.
Dubey, R., Dutta, D., Sarkar, A., & Chattopadhyay, P. (2021). Functionalized carbon nanotubes: Synthesis, properties and applications in water purification, drug delivery, and material and biomedical sciences. Nanoscale Advances, 3(20), 5722-5744.
Singh, K. K., Chaudhary, S. K., Venugopal, R., & Gaurav, A. (2017). Bulk synthesis of multi-walled carbon nanotubes by AC arc discharge method. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part N: Journal of Nanomaterials, Nanoengineering and Nanosystems, 231(3), 141-151.
Anazawa, K., Shimotani, K., Manabe, C., Watanabe, H., & Shimizu, M. (2002). High-purity carbon nanotubes synthesis method by an arc discharging in magnetic field. *Applied Physics Letters*, *81*(4), 739-741.
Shi, Z., Lian, Y., Liao, F. H., Zhou, X., Gu, Z., Zhang, Y., ... & Zhang, S. L. (2000). Large scale synthesis of single-wall carbon nanotubes by arc-discharge method. *Journal of physics and chemistry of solids*, *61*(7), 1031-1036.
Journet, C., Maser, W. K., Bernier, P., Loiseau, A., de La Chapelle, M. L., Lefrant, D. S., ... & Fischer, J. E. (1997). Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by the electric-arc technique. *nature*, *388*(6644), 756-758.
Sun, X., Bao, W., Lv, Y., Deng, J., & Wang, X. (2007). Synthesis of high quality single-walled carbon nanotubes by arc discharge method in large scale. *Materials Letters*, *61*(18), 3956-3958.
Arepalli, S. (2004). Laser ablation process for single-walled carbon nanotube production. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, *4*(4), 317-325.
Nayak, A. K., & Hasnain, M. S. (2019). *Plant polysaccharides-based multiple-unit systems for oral drug delivery* (pp. 67-82). Singapore:: Springer.
Verma, B., Sewani, H., & Balomajumder, C. (2020). Synthesis of carbon nanotubes via chemical vapor deposition: an advanced application in the Management of Electroplating Effluent. *Environmental Science and Pollution Research*, *27*(12), 14007-14018.
Lee, C. J., Park, J. H., & Park, J. (2000). Synthesis of bamboo-shaped multiwalled carbon nanotubes using thermal chemical vapor deposition. *Chemical Physics Letters*, *323*(5-6), 560-565.
Li, W. Z., Wang, D. Z., Yang, S. X., Wen, J. G., & Ren, Z. F. (2001). Controlled growth of carbon nanotubes on graphite foil by chemical vapor deposition. *Chemical Physics Letters*, *335*(3-4), 141-149.
Zhang, Y. F., Tang, Y. H., Zhang, Y., Lee, C. S., Bello, I., & Lee, S. T. (2000). Deposition of carbon nanotubes on Si nanowires by chemical vapor deposition. *Chemical Physics Letters*, *330*(1-2), 48-52.
Su, M., Zheng, B., & Liu, J. (2000). A scalable CVD method for the synthesis of single-walled carbon nanotubes with high catalyst productivity. *Chemical physics letters*, *322*(5), 321-326.
Noury, O., Stöckli, T., Croci, M., & Bonard, A. C. J. M. (2001). Growth of carbon nanotubes on cylindrical wires by thermal chemical vapor deposition. *Chemical physics letters*, *346*(5-6), 349-355.
Rajaura, R. S., Singhal, I., Sharma, K. N., & Srivastava, S. (2019). Efficient chemical vapour deposition and arc discharge system for production of carbon nano-tubes on a gram scale. *Review of Scientific Instruments*, *90*(12).
Nikolaev, P., Bronikowski, M. J., Bradley, R. K., Rohmund, F., Colbert, D. T., Smith, K. A., & Smalley, R. E. (1999). Gas-phase catalytic growth of single-walled carbon nanotubes from carbon monoxide. *Chemical physics letters*, *313*(1-2), 91-97.

www.SID.ir

Vander Wal, R. L., Berger, G. M., & Hall, L. J. (2002). Single-walled carbon nanotube synthesis via a multi-stage flame configuration. *The Journal of Physical Chemistry B*, *106*(14), 3564-3567.
Huličová, D., Hosoi, K., Kuroda, S. I., Abe, H., & Oya, A. (2002). Carbon nanotubes prepared by spinning and carbonizing fine core–shell polymer microspheres. *Advanced Materials*, *14*(6), 452-455.
Edgar, K., & Spencer, J. L. (2004). Aerosol-based synthesis of carbon nanotubes. *Current Applied Physics*, *4*(2-4), 121-124.
Lofrano, R. C. Z., Rosolen, J. M., & Montoro, L. A. (2005). Synthesis of single-walled and multi-walled carbon nanotubes by arc-water method. *Carbon*, *43*(1), 200.
Shao, M., Wang, D., Yu, G., Hu, B., Yu, W., & Qian, Y. (2004). The synthesis of carbon nanotubes at low temperature via carbon suboxide disproportionation. *Carbon*, *42*(1), 183-185.
Li, M. W., Hu, Z., Wang, X. Z., Wu, Q., Chen, Y., & Tian, Y. L. (2004). Low-temperature synthesis of carbon nanotubes using corona discharge plasma at atmospheric pressure. *Diamond and Related Materials*, *13*(1), 111-115.
Li, Y. L., Kinloch, I. A., Shaffer, M. S., Geng, J., Johnson, B., & Windle, A. H. (2004). Synthesis of single-walled carbon nanotubes by a fluidized-bed method. *Chemical physics letters*, *384*(1-3), 98-102.
Vivekchand, S. R. C., Cele, L. M., Deepak, F. L., Raju, A. R., & Govindaraj, A. (2004). Carbon nanotubes by nebulized spray pyrolysis. *Chemical Physics Letters*, *386*(4-6), 313-318.
Robertson, D. H., Brenner, D. W., & Mintmire, J. W. (1992). Energetics of nanoscale graphitic tubules. *Physical Review B*, *45*(21), 12592.
Yu, M. F., Files, B. S., Arepalli, S., & Ruoff, R. S. (2000). Tensile loading of ropes of single wall carbon nanotubes and their mechanical properties. *Physical review letters*, *84*(24), 5552.
Yakobson, B. I., Brabec, C. J., & Bernholc, J. (1996). Nanomechanics of carbon tubes: instabilities beyond linear response. *Physical review letters*, *76*(14), 2511.
Tans, S. J., Verschueren, A. R., & Dekker, C. (1998). Room-temperature transistor based on a single carbon nanotube. *Nature*, *393*(6680), 49-52.
Wei, B. Q., Vajtai, R., & Ajayan, P. M. (2001). Reliability and current carrying capacity of carbon nanotubes. *Applied physics letters*, *79*(8), 1172-1174.
Hone, J., Llaguno, M. C., & Biercuk, M. J. (2002). a T. Johnson, B. Batlogg, Z. Benes, JE Fischer. *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process*, *74*, 339-343.
Chen, J., Chen, S., Zhao, X., Kuznetsova, L. V., Wong, S. S., & Ojima, I. (2008). Functionalized single-walled carbon nanotubes as rationally designed vehicles for tumor-targeted drug delivery. *Journal of the American Chemical Society*, *130*(49), 16778-16785.
Ito, F., Konuma, K., & Okamoto, A. (2001). Electron emission from single-walled carbon nanotubes with sharpened bundles. *Journal of Applied Physics*, *89*(12), 8141-8145.
Avouris, P. (2002). Molecular electronics with carbon nanotubes. *Accounts of chemical research*, *35*(12), 1026-1034.
Safadi, B., Andrews, R., & Grulke, E. A. (2002). Multiwalled carbon nanotube polymer composites: synthesis and characterization of thin films. *Journal of applied polymer science*, *84*(14), 2660-2669.
Fan, S., Chapline, M. G., Franklin, N. R., Tombler, T. W., Cassell, A. M., & Dai, H. (1999). Self-oriented regular arrays of carbon nanotubes and their field emission properties. *Science*, *283*(5401), 512-514.
Wang, Q. H., Setlur, A. A., Lauerhaas, J. M., Dai, J. Y., Seelig, E. W., & Chang, R. P. H. (1998). A nanotube-based field-emission flat panel display. *Applied Physics Letters*, *72*(22), 2912-2913.
Dillon, A., Jones, K. M., Bekkedahl, T. A., Kiang, C. H., Bethune, D. S., & Heben, M. J. (1997). Storage of hydrogen in single-walled carbon nanotubes. *Nature*, *386*(6623), 377-379.
Ali, S. M., Rao, K. V., Rao, J. R., Himabindu, V., Rao, M. V., & Viditha, V. (2011, November). Hydrogen storage of carbon materials by physisorption. In *International Conference on Nanoscience, Engineering and Technology (ICONSET 2011)* (pp. 1-4). IEEE.
Moreira, L., Fulchiron, R., Seytre, G., Dubois, P., & Cassagnau, P. (2010). Aggregation of carbon nanotubes in semidilute suspension. *Macromolecules*, *43*(3), 1467-1472.
Chen, Q., Saltiel, C., Manickavasagam, S., Schadler, L. S., Siegel, R. W., & Yang, H. (2004). Aggregation behavior of single-walled carbon nanotubes in dilute aqueous suspension. *Journal of Colloid and Interface Science*, *280*(1), 91-97.
Dyke, C. A., & Tour, J. M. (2004). Overcoming the insolubility of carbon nanotubes through high degrees of sidewall functionalization. *Chemistry–A European Journal*, *10*(4), 812-817.

www.SID.ir

Zhu, J., Kim, J., Peng, H., Margrave, J. L., Khabashesku, V. N., & Barrera, E. V. (2003). Improving the dispersion and integration of single-walled carbon nanotubes in epoxy composites through functionalization. *Nano letters*, *3*(8), 1107-1113.

Yang, Q. S., Li, B. Q., He, X. Q., & Mai, Y. W. (2014). Modeling the mechanical properties of functionalized carbon nanotubes and their composites: design at the atomic level. *Advances in Condensed Matter Physics*, *2014*.

Noordadi, M., Mehrnejad, F., Sajedi, R. H., Jafari, M., & Ranjbar, B. (2018). The potential impact of carboxylic-functionalized multi-walled carbon nanotubes on trypsin: A Comprehensive spectroscopic and molecular dynamics simulation study. *PLoS One*, *13*(6), e0198519.

Wolski, P., Nieszporek, K., & Panczyk, T. (2017). Pegylated and folic acid functionalized carbon nanotubes as pH controlled carriers of doxorubicin. Molecular dynamics analysis of the stability and drug release mechanism. *Physical Chemistry Chemical Physics*, *19*(13), 9300-9312.

Merum, S., Veluru, J. B., & Seeram, R. (2017). Functionalized carbon nanotubes in bio-world: Applications, limitations and future directions. *Materials Science and Engineering: B*, *223*, 43-63.

Basheer, B. V., George, J. J., Siengchin, S., & Parameswaranpillai, J. (2020). Polymer grafted carbon nanotubes—Synthesis, properties, and applications: A review. *Nano-Structures & Nano-Objects*, *22*, 100429.

Alshehri, R., Ilyas, A. M., Hasan, A., Arnaout, A., Ahmed, F., & Memic, A. (2016). Carbon nanotubes in biomedical applications: factors, mechanisms, and remedies of toxicity: miniperspective. *Journal of medicinal chemistry*, *59*(18), 8149-8167.

Beg, S., Rahman, M., Jain, A., Saini, S., Hasnain, M. S., Swain, S., ... & Akhter, S. (2018). Emergence in the functionalized carbon nanotubes as smart nanocarriers for drug delivery applications. In *Fullerens, Graphenes and Nanotubes* (pp. 105-133). William Andrew Publishing.

Pennetta, C., Floresta, G., Graziano, A. C. E., Cardile, V., Rubino, L., Galimberti, M., ... & Barbera, V. (2020). Functionalization of single and multi-walled carbon nanotubes with polypropylene glycol decorated pyrrole for the development of doxorubicin nano-conveyors for cancer drug delivery. *Nanomaterials*, *10*(6), 1073.

Farghali, A. A., Abdel Tawab, H. A., Abdel Moaty, S. A., & Khaled, R. (2017). Functionalization of acidified multi-walled carbon nanotubes for removal of heavy metals in aqueous solutions. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, *7*, 101-111.

Ali, S., Rehman, S. A. U., Luan, H. Y., Farid, M. U., & Huang, H. (2019). Challenges and opportunities in functional carbon nanotubes for membrane-based water treatment and desalination. *Science of the Total Environment*, *646*, 1126-1139.

Dubey, R., Dutta, D., Sarkar, A., & Chattopadhyay, P. (2021). Functionalized carbon nanotubes: Synthesis, properties and applications in water purification, drug delivery, and material and biomedical sciences. *Nanoscale Advances*, *3*(20), 5722-5744.

Ma, L., Dong, X., Chen, M., Zhu, L., Wang, C., Yang, F., & Dong, Y. (2017). Fabrication and water treatment application of carbon nanotubes (CNTs)-based composite membranes: a review. *Membranes*, *7*(1), 16.

Variava, M. F., Church, T. L., Harris, A. T., & Minett, A. I. (2013). Polyol-assisted functionalization of carbon nanotubes—a perspective. *Journal of Materials Chemistry A*, *1*(30), 8509-8520.

Lordi, V., Yao, N., & Wei, J. (2001). Method for supporting platinum on single-walled carbon nanotubes for a selective hydrogenation catalyst. *Chemistry of Materials*, *13*(3), 733-737.

Yu, R., Chen, L., Liu, Q., Lin, J., Tan, K. L., Ng, S. C., ... & Hor, T. A. (1998). Platinum deposition on carbon nanotubes via chemical modification. *Chemistry of Materials*, *10*(3), 718-722.

Zhang, W., Chen, J., Swiegers, G. F., Ma, Z. F., & Wallace, G. G. (2010). Microwave-assisted synthesis of Pt/CNT nanocomposite electrocatalysts for PEM fuel cells. *Nanoscale*, *2*(2), 282-286.

Li, L., & Xing, Y. (2007). Pt− Ru nanoparticles supported on carbon nanotubes as methanol fuel cell catalysts. *The Journal of Physical Chemistry C*, *111*(6), 2803-2808.

Waje, M. M., Wang, X., Li, W., & Yan, Y. (2005). Deposition of platinum nanoparticles on organic functionalized carbon nanotubes grown in situ on carbon paper for fuel cells. *Nanotechnology*, *16*(7), S395.

Shi, J., Wang, Z., & Li, H. L. (2006). Selfassembly of gold nanoparticles onto the surface of multiwall carbon nanotubes functionalized with mercaptobenzene moieties. *Journal of Nanoparticle Research*, *8*, 743-747.

Muhammad, A., Yusof, N. A., Hajian, R., & Abdullah, J. (2016). Decoration of carbon nanotubes with gold nanoparticles by electroless deposition process using ethylenediamine as a cross linker. *Journal of Materials Research*, *31*(18), 2897-2905.

www.SID.ir

Jiang, K., Eitan, A., Schadler, L. S., Ajayan, P. M., Siegel, R. W., Grobert, N., ... & Terrones, M. (2003). Selective attachment of gold nanoparticles to nitrogen-doped carbon nanotubes. *Nano Letters*, *3*(3), 275-277.

Ellis, A. V., Vijayamohanan, K., Goswami, R., Chakrapani, N., Ramanathan, L. S., Ajayan, P. M., & Ramanath, G. (2003). Hydrophobic anchoring of monolayer-protected gold nanoclusters to carbon nanotubes. *Nano Letters*, *3*(3), 279-282.

Hwang, G. L., Hwang, K. C., Shieh, Y. T., & Lin, S. J. (2003). Preparation of carbon nanotube encapsulated copper nanowires and their use as a reinforcement for Y− Ba− Cu− O superconductors. *Chemistry of materials*, *15*(6), 1353-1357.

Sarlak, N., Adeli, M., Karimi, M., Bordbare, M., & Farahmandnejad, M. A. (2013). Quantitative study on the interaction of ag+ and pd2+ with cnt-graft-pca (polycitric acid) in aqueous solution. *Journal of Molecular Liquids*, *180*, 39-44.

Fujigaya, T., & Nakashima, N. (2015). Non-covalent polymer wrapping of carbon nanotubes and the role of wrapped polymers as functional dispersants. *Science and technology of advanced materials*, *16*(2), 024802.

Tan, S. H., Goak, J. C., Lee, N., Kim, J. Y., & Hong, S. C. (2007, April). Functionalization of Multi-Walled Carbon Nanotubes with Poly (2-ethyl-2-oxazoline). In *Macromolecular Symposia* (Vol. 249, No. 1, pp. 270-275). Weinheim: WILEY-VCH Verlag.

Zheng, M., Jagota, A., Semke, E. D., Diner, B. A., McLean, R. S., Lustig, S. R., ... & Tassi, N. G. (2003). DNA-assisted dispersion and separation of carbon nanotubes. *Nature materials*, *2*(5), 338-342.

Steuerman, D. W., Star, A., Narizzano, R., Choi, H., Ries, R. S., Nicolini, C., ... & Heath, J. R. (2002). Interactions between conjugated polymers and single-walled carbon nanotubes. *The Journal of Physical Chemistry B*, *106*(12), 3124-3130.

Star, A., Liu, Y., Grant, K., Ridvan, L., Stoddart, J. F., Steuerman, D. W., ... & Heath, J. R. (2003). Noncovalent side-wall functionalization of single-walled carbon nanotubes. *Macromolecules*, *36*(3), 553-560.

Tang, B. Z., & Xu, H. (1999). Preparation, alignment, and optical properties of soluble poly (phenylacetylene)-wrapped carbon nanotubes. *Macromolecules*, *32*(8), 2569-2576.

Fernando, K. S., Lin, Y., Wang, W., Kumar, S., Zhou, B., Xie, S. Y., ... & Sun, Y. P. (2004). Diminished band-gap transitions of single-walled carbon nanotubes in complexation with aromatic molecules. *Journal of the American Chemical Society*, *126*(33), 10234-10235.

Chen, R. J., Zhang, Y., Wang, D., & Dai, H. (2001). Noncovalent sidewall functionalization of single-walled carbon nanotubes for protein immobilization. *Journal of the American Chemical Society*, *123*(16), 3838-3839.

Murakami, H., Nomura, T., & Nakashima, N. (2003). Noncovalent porphyrin-functionalized single-walled carbon nanotubes in solution and the formation of porphyrin–nanotube nanocomposites. *Chemical Physics Letters*, *378*(5-6), 481-485.

Xia, H., Wang, Q., & Qiu, G. (2003). Polymer-encapsulated carbon nanotubes prepared through ultrasonically initiated in situ emulsion polymerization. *Chemistry of materials*, *15*(20), 3879-3886.

Kang, Y., & Taton, T. A. (2003). Micelle-encapsulated carbon nanotubes: a route to nanotube composites. *Journal of the American Chemical Society*, *125*(19), 5650-5651.

Zhou, W., Lv, S., & Shi, W. (2008). Preparation of micelle-encapsulated single-wall and multi-wall carbon nanotubes with amphiphilic hyperbranched polymer. *European polymer journal*, *44*(3), 587-601.

Arnold, M. S., Guler, M. O., Hersam, M. C., & Stupp, S. I. (2005). Encapsulation of carbon nanotubes by self-assembling peptide amphiphiles. *Langmuir*, *21*(10), 4705-4709.

Arnold, M. S., Guler, M. O., Hersam, M. C., & Stupp, S. I. (2005). Encapsulation of carbon nanotubes by self-assembling peptide amphiphiles. *Langmuir*, *21*(10), 4705-4709.

Qu, L., & Dai, L. (2005). Substrate-enhanced electroless deposition of metal nanoparticles on carbon nanotubes. *Journal of the American Chemical Society*, *127*(31), 10806-10807.

Choi, H. C., Shim, M., Bangsaruntip, S., & Dai, H. (2002). Spontaneous reduction of metal ions on the sidewalls of carbon nanotubes. *Journal of the American Chemical Society*, *124*(31), 9058-9059.

Quinn, B. M., Dekker, C., & Lemay, S. G. (2005). Electrodeposition of noble metal nanoparticles on carbon nanotubes. *Journal of the American Chemical Society*, *127*(17), 6146-6147.

Li, P. J., Chai, Y., Zhou, X. L., Zhang, Q. F., & Wu, J. L. (2005). Fullerenes, Nanotub. *Carbon Nanostruct*, *13*, 377-383.

Zhang, Y., Franklin, N. W., Chen, R. J., & Dai, H. (2000). Metal coating on suspended carbon nanotubes and its implication to metal–tube interaction. *Chemical Physics Letters*, *331*(1), 35-41.

www.SID.ir

Okazaki, T., Suenaga, K., Hirahara, K., Bandow, S., Iijima, S., & Shinohara, H. (2002). Electronic and geometric structures of metallofullerene peapods. *Physica B: Condensed Matter*, *323*(1-4), 97-99.
Allen, C. S., Ito, Y., Robertson, A. W., Shinohara, H., & Warner, J. H. (2011). Two-dimensional coalescence dynamics of encapsulated metallofullerenes in carbon nanotubes. *ACS nano*, *5*(12), 10084-10089.
Hirahara, K., Suenaga, K., Bandow, S., Kato, H., Okazaki, T., Shinohara, H., & Iijima, S. (2000). One-dimensional metallofullerene crystal generated inside single-walled carbon nanotubes. *Physical Review Letters*, *85*(25), 5384.
Tománek, D. (2005). Carbon-based nanotechnology on a supercomputer. *Journal of Physics: Condensed Matter*, *17*(13), R413.
Burteaux, B., Claye, A., Smith, B. W., Monthioux, M., Luzzi, D. E., & Fischer, J. E. (1999). Abundance of encapsulated C60 in single-wall carbon nanotubes. *Chemical Physics Letters*, *310*(1-2), 21-24.
Grigorian, L., Williams, K. A., Fang, S., Sumanasekera, G. U., Loper, A. L., Dickey, E. C., ... & Eklund, P. C. (1998). Reversible intercalation of charged iodine chains into carbon nanotube ropes. *Physical review letters*, *80*(25), 5560.
Fan, X., Dickey, E. C., Eklund, P. C., Williams, K. A., Grigorian, L., Buczko, R., ... & Pennycook, S. J. (2000). Atomic arrangement of iodine atoms inside single-walled carbon nanotubes. *Physical Review Letters*, *84*(20), 4621.
Díez-Pascual, A. M. (2021). Chemical functionalization of carbon nanotubes with polymers: a brief overview. *Macromol*, *1*(2), 64-83.
Naqvi, S. T. R., Rasheed, T., Hussain, D., ul Haq, M. N., Majeed, S., Ahmed, N., & Nawaz, R. (2020). Modification strategies for improving the solubility/dispersion of carbon nanotubes. *Journal of Molecular Liquids*, *297*, 111919.
Soleyman, R., Hirbod, S., & Adeli, M. (2015). Advances in the biomedical application of polymer-functionalized carbon nanotubes. *Biomaterials science*, *3*(5), 695-711.
Dubey, R., Dutta, D., Sarkar, A., & Chattopadhyay, P. (2021). Functionalized carbon nanotubes: Synthesis, properties and applications in water purification, drug delivery, and material and biomedical sciences. *Nanoscale Advances*, *3*(20), 5722-5744.
Shofner, M. L., Khabashesku, V. N., & Barrera, E. V. (2006). Processing and mechanical properties of fluorinated single-wall carbon nanotube− polyethylene composites. *Chemistry of Materials*, *18*(4), 906-913.
Kim, S. W., Kim, T., Kim, Y. S., Choi, H. S., Lim, H. J., Yang, S. J., & Park, C. R. (2012). Surface modifications for the effective dispersion of carbon nanotubes in solvents and polymers. *Carbon*, *50*(1), 3-33.
Mitchell, C. A., Bahr, J. L., Arepalli, S., Tour, J. M., & Krishnamoorti, R. (2002). Dispersion of functionalized carbon nanotubes in polystyrene. *Macromolecules*, *35*(23), 8825-8830.
Barraza, H. J., Pompeo, F., O'Rea, E. A., & Resasco, D. E. (2002). SWNT-filled thermoplastic and elastomeric composites prepared by miniemulsion polymerization. *Nano letters*, *2*(8), 797-802.
Labulo, A. H., Martincigh, B. S., Omondi, B., & Nyamori, V. O. (2017). Advances in carbon nanotubes as efficacious supports for palladium-catalysed carbon–carbon cross-coupling reactions. *Journal of Materials Science*, *52*(16), 9225-9248.
Ye, B., Kim, S. I., Lee, M., Ezazi, M., Kim, H. D., Kwon, G., & Lee, D. H. (2020). Synthesis of oxygen functionalized carbon nanotubes and their application for selective catalytic reduction of NO x with NH 3. *RSC advances*, *10*(28), 16700-16708.
Melchionna, M. I. C. H. E. L. E., Marchesan, S. I. L. V. I. A., Prato, M. A. U. R. I. Z. I. O., & Fornasiero, P. (2015). Carbon nanotubes and catalysis: the many facets of a successful marriage. *Catalysis Science & Technology*, *5*(8), 3859-3875.
Tessonnier, J. P., Pesant, L., Ehret, G., Ledoux, M. J., & Pham-Huu, C. (2005). Pd nanoparticles introduced inside multi-walled carbon nanotubes for selective hydrogenation of cinnamaldehyde into hydrocinnamaldehyde. *Applied Catalysis A: General*, *288*(1-2), 203-210.
John, J., Gravel, E., Namboothiri, I. N., & Doris, E. (2012). Advances in carbon nanotube-noble metal catalyzed organic transformations. *Nanotechnology Reviews*, *1*(6), 515-539.
Planeix, J. M., Coustel, N., Coq, B., Brotons, V., Kumbhar, P. S., Dutartre, R., ... & Ajayan, P. M. (1994). Application of carbon nanotubes as supports in heterogeneous catalysis. *Journal of the American Chemical Society*, *116*(17), 7935-7936.
Wu, B., Kuang, Y., Zhang, X., & Chen, J. (2011). Noble metal nanoparticles/carbon nanotubes nanohybrids: synthesis and applications. *Nano Today*, *6*(1), 75-90.
Wang, Q., Dai, N., Zheng, J., & Zheng, J. P. (2019). Preparation and catalytic performance of Pt supported on Nafion® functionalized carbon nanotubes. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, *854*, 113508.

www.SID.ir

Li, W., Gao, C., Qian, H., Ren, J., & Yan, D. (2006). Multiamino-functionalized carbon nanotubes and their applications in loading quantum dots and magnetic nanoparticles. *Journal of Materials Chemistry*, *16*(19), 1852-1859.
Lin, H., Zhu, H., Guo, H., & Yu, L. (2007). Investigation of the microwave-absorbing properties of Fe-filled carbon nanotubes. *Materials Letters*, *61*(16), 3547-3550.
Gui, X., Ye, W., Wei, J., Wang, K., Lv, R., Zhu, H., ... & Wu, D. (2009). Optimization of electromagnetic matching of Fe-filled carbon nanotubes/ferrite composites for microwave absorption. *Journal of Physics D: Applied Physics*, *42*(7), 075002.
Guo, Z., Sadler, P. J., & Tsang, S. C. (1998). Immobilization and visualization of DNA and proteins on carbon nanotubes. *Advanced Materials*, *10*(9), 701-703.
Balavoine, F., Schultz, P., Richard, C., Mallouh, V., Ebbesen, T. W., & Mioskowski, C. (1999). Helical crystallization of proteins on carbon nanotubes: a first step towards the development of new biosensors. *Angewandte Chemie International Edition*, *38*(13-14), 1912-1915.
Tsang, S. C., Guo, Z., Chen, Y. K., Green, M. L., Hill, H. A. O., Hambley, T. W., & Sadler, P. J. (1997). Immobilization of platinated and iodinated oligonucleotides on carbon nanotubes. *Angewandte Chemie International Edition in English*, *36*(20), 2198-2200.
Dubey, R., Dutta, D., Sarkar, A., & Chattopadhyay, P. (2021). Functionalized carbon nanotubes: Synthesis, properties and applications in water purification, drug delivery, and material and biomedical sciences. *Nanoscale Advances*, *3*(20), 5722-5744.
Chen, R. J., Zhang, Y., Wang, D., & Dai, H. (2001). Noncovalent sidewall functionalization of single-walled carbon nanotubes for protein immobilization. *Journal of the American Chemical Society*, *123*(16), 3838-3839.
Hu, H., Ni, Y., Montana, V., Haddon, R. C., & Parpura, V. (2004). Chemically functionalized carbon nanotubes as substrates for neuronal growth. *Nano letters*, *4*(3), 507-511.
Besteman, K., Lee, J. O., Wiertz, F. G., Heering, H. A., & Dekker, C. (2003). Enzyme-coated carbon nanotubes as single-molecule biosensors. *Nano letters*, *3*(6), 727-730.
Wu, W., Wieckowski, S., Pastorin, G., Benincasa, M., Klumpp, C., Briand, J. P., ... & Bianco, A. (2005). Targeted delivery of amphotericin B to cells by using functionalized carbon nanotubes. *Angewandte Chemie International Edition*, *44*(39), 6358-6362.
Pantarotto, D., Partidos, C. D., Graff, R., Hoebeke, J., Briand, J. P., Prato, M., & Bianco, A. (2003). Synthesis, structural characterization, and immunological properties of carbon nanotubes functionalized with peptides. *Journal of the American Chemical Society*, *125*(20), 6160-6164.
Wang, S., Humphreys, E. S., Chung, S. Y., Delduco, D. F., Lustig, S. R., Wang, H., ... & Jagota, A. (2003). Peptides with selective affinity for carbon nanotubes. *Nature materials*, *2*(3), 196-200.
Zorbas, V., Ortiz-Acevedo, A., Dalton, A. B., Yoshida, M. M., Dieckmann, G. R., Draper, R. K., ... & Musselman, I. H. (2004). Preparation and characterization of individual peptide-wrapped single-walled carbon nanotubes. *Journal of the American Chemical Society*, *126*(23), 7222-7227.
Shim, M., Shi Kam, N. W., Chen, R. J., Li, Y., & Dai, H. (2002). Functionalization of carbon nanotubes for biocompatibility and biomolecular recognition. *Nano letters*, *2*(4), 285-288.
Panczyk, T., Wojton, P., & Wolski, P. (2020). Molecular dynamics study of the interaction of carbon nanotubes with telomeric DNA fragment containing noncanonical G-quadruplex and i-motif forms. *International journal of molecular sciences*, *21*(6), 1925.
Wolski, P., Nieszporek, K., & Panczyk, T. (2018). G-quadruplex and i-motif structures within the telomeric DNA duplex. A molecular dynamics analysis of protonation states as factors affecting their stability. *The Journal of Physical Chemistry B*, *123*(2), 468-479.
Zhang, Y., Li, F., Li, M., Mao, X., Jing, X., Liu, X., ... & Zuo, X. (2019). Encoding carbon nanotubes with tubular nucleic acids for information storage. *Journal of the American Chemical Society*, *141*(44), 17861-17866.
Lee, K. M., Wong, C. P. P., Tan, T. L., & Lai, C. W. (2018). Functionalized carbon nanotubes for adsorptive removal of water pollutants. *Materials Science and Engineering: B*, *236*, 61-69.
Barrejón, M., Syrgiannis, Z., Burian, M., Bosi, S., Montini, T., Fornasiero, P., ... & Prato, M. (2019). Cross-linked carbon nanotube adsorbents for water treatment: tuning the sorption capacity through chemical functionalization. *ACS applied materials & interfaces*, *11*(13), 12920-12930.

www.SID.ir

Jame, S. A., & Zhou, Z. (2016). Electrochemical carbon nanotube filters for water and wastewater treatment. *Nanotechnology Reviews*, *5*(1), 41-50.
Yang, S. Y., Vecitis, C. D., & Park, H. (2019). Electrocatalytic water treatment using carbon nanotube filters modified with metal oxides. *Environmental Science and Pollution Research*, *26*, 1036-1043.
Wang, H., Lin, K. Y., Jing, B., Krylova, G., Sigmon, G. E., McGinn, P., ... & Na, C. (2013). Removal of oil droplets from contaminated water using magnetic carbon nanotubes. *Water research*, *47*(12), 4198-4205.
Liu, J., Li, X., Jia, W., Ding, M., Zhang, Y., & Ren, S. (2016). Separation of emulsified oil from oily wastewater by functionalized multiwalled carbon nanotubes. *Journal of Dispersion Science and Technology*, *37*(9), 1294-1302.
Al-Jammal, N., Abdullah, T. A., Juzsakova, T., Zsirka, B., Cretescu, I., Vágvölgyi, V., ... & Domokos, E. (2020). Functionalized carbon nanotubes for hydrocarbon removal from water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *8*(2), 103570.
Abdullah, A. S., & Douglas, C. (2021). Halo blight of mungbean in Australia. *Crops*, *1*(1), 3-7.
Hong, Y., Zhang, J., Zhu, C., Zeng, X. C., & Francisco, J. S. (2019). Water desalination through rim functionalized carbon nanotubes. *Journal of Materials Chemistry A*, *7*(8), 3583-3591.
Chan, W. F., Chen, H. Y., Surapathi, A., Taylor, M. G., Shao, X., Marand, E., & Johnson, J. K. (2012). ACS Nano 2013, 7, 5308; b) D. Cohen-Tanugi, JC Grossman. *Nano Lett*, *12*, 3602.
Chowdhury, Z. Z., Sagadevan, S., Johan, R. B., Shah, S. T., Adebesi, A., Md, S. I., & Rafique, R. F. (2018). A review on electrochemically modified carbon nanotubes (CNTs) membrane for desalination and purification of water. *Materials Research Express*, *5*(10), 102001.
Das, R., Ali, M. E., Abd Hamid, S. B., Ramakrishna, S., & Chowdhury, Z. Z. (2014). Carbon nanotube membranes for water purification: A bright future in water desalination. *Desalination*, *336*, 97-109.
Farahani, M. H. D. A., Hua, D., & Chung, T. S. (2018). Cross-linked mixed matrix membranes (MMMs) consisting of amine-functionalized multi-walled carbon nanotubes and P84 polyimide for organic solvent nanofiltration (OSN) with enhanced flux. *Journal of Membrane Science*, *548*, 319-331.
Sianipar, M., Kim, S. H., Iskandar, F., & Wenten, I. G. (2017). Functionalized carbon nanotube (CNT) membrane: progress and challenges. *RSC advances*, *7*(81), 51175-51198.
Dubey, R., Dutta, D., Sarkar, A., & Chattopadhyay, P. (2021). Functionalized carbon nanotubes: Synthesis, properties and applications in water purification, drug delivery, and material and biomedical sciences. *Nanoscale Advances*, *3*(20), 5722-5744.
Elsehly, E. M., Chechenin, N. G., Makunin, A. V., Motaweh, H. A., & Leksina, E. G. (2017). Functionalized carbon nanotubes based filters for chromium removal from aqueous solutions. *Water Science and Technology*, *75*(7), 1564-1571.
Budimirović, D., Veličković, Z. S., Bajić, Z., Milošević, D. L., Nikolić, J. B., Drmanić, S. Ž., & Marinković, A. D. (2017). Removal of heavy metals from water using multistage functionalized multiwall carbon nanotubes. *Journal of the Serbian Chemical Society*, *82*(10), 1175-1191.
Aslam, M. M. A., Kuo, H. W., Den, W., Usman, M., Sultan, M., & Ashraf, H. (2021). Functionalized carbon nanotubes (CNTs) for water and wastewater treatment: preparation to application. *Sustainability*, *13*(10), 5717.
Barkhudarov, E. M., Kossyi, I. A., Anpilov, A. M., Ivashkin, P. I., Artem'ev, K. V., Moryakov, I. V., ... & Gudkov, S. V. (2020). New nanostructured carbon coating inhibits bacterial growth, but does not influence on animal cells. *Nanomaterials*, *10*(11), 2130.
Al-Hakami, S. M., Khalil, A. B., Laoui, T., & Atieh, M. A. (2013). Fast disinfection of Escherichia coli bacteria using carbon nanotubes interaction with microwave radiation. *Bioinorganic chemistry and applications*, *2013*.
Karimi, M., Solati, N., Amiri, M., Mirshekari, H., Mohamed, E., Taheri, M., ... & Hamblin, M. R. (2015). Carbon nanotubes part I: preparation of a novel and versatile drug-delivery vehicle. *Expert opinion on drug delivery*, *12*(7), 1071-1087.
Sharma, S., Mehra, N. K., Jain, K., & Jain, N. K. (2016). Effect of functionalization on drug delivery potential of carbon nanotubes. *Artificial cells, nanomedicine, and biotechnology*, *44*(8), 1851-1860.
Prakash, S., Malhotra, M., Shao, W., Tomaro-Duchesneau, C., & Abbasi, S. (2011). Polymeric nanohybrids and functionalized carbon nanotubes as drug delivery carriers for cancer therapy. *Advanced drug delivery reviews*, *63*(14-15), 1340-1351.
Lay, C. L., Liu, J., & Liu, Y. (2011). Functionalized carbon nanotubes for anticancer drug delivery. *Expert review of medical devices*, *8*(5), 561-566.

www.SID.ir

Tan, J. M., Arulselvan, P., Fakurazi, S., Ithnin, H., & Hussein, M. Z. (2014). A review on characterizations and biocompatibility of functionalized carbon nanotubes in drug delivery design. *Journal of Nanomaterials*, *2014*, 111-111.

Paliwal, S., Pandey, K., Pawar, S., Joshi, H., & Bisht, N. (2020). A Review on Carbon Nanotubes: As a Nano carrier Drug Delivery System. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, *82*(5).

Lotfi, M., Morsali, A., & Bozorgmehr, M. R. (2018). Comprehensive quantum chemical insight into the mechanistic understanding of the surface functionalization of carbon nanotube as a nanocarrier with cladribine anticancer drug. *Applied Surface Science*, *462*, 720-729.

Kamel, M., Raissi, H., Morsali, A., & Shahabi, M. (2018). Assessment of the adsorption mechanism of Flutamide anticancer drug on the functionalized single-walled carbon nanotube surface as a drug delivery vehicle: An alternative theoretical approach based on DFT and MD. *Applied Surface Science*, *434*, 492-503.

Bhirde, A. A., Patel, S., Sousa, A. A., Patel, V., Molinolo, A. A., Ji, Y., ... & Rusling, J. F. (2010). Distribution and clearance of PEG-single-walled carbon nanotube cancer drug delivery vehicles in mice. *Nanomedicine*, *5*(10), 1535-1546.

Jampilek, J., & Kralova, K. (2021). Advances in drug delivery nanosystems using graphene-based materials and carbon nanotubes. *Materials*, *14*(5), 1059.

Bianco, A., Kostarelos, K., & Prato, M. (2011). Making carbon nanotubes biocompatible and biodegradable. *Chemical communications*, *47*(37), 10182-10188.

Das, R., Hamid, S. B. A., Ali, M. E., Annuar, M. S. M., Samsudin, E. M. B., & Bagheri, S. (2015). Covalent functionalization schemes for tailoring solubility of multi-walled carbon nanotubes in water and acetone solvents. *Science of Advanced Materials*, *7*(12), 2726-2737.

Ma, P. C., Siddiqui, N. A., Marom, G., & Kim, J. K. (2010). Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, *41*(10), 1345-1367.

Singhai, N. J., & Ramteke, S. (2020). Functionalized carbon nanotubes: Emerging applications in the diverse biomedical arena. *Current Nanoscience*, *16*(2), 170-186.

Hwang, Y., Park, S. H., & Lee, J. W. (2017). Applications of functionalized carbon nanotubes for the therapy and diagnosis of cancer. *Polymers*, *9*(1), 13.

Zhang, Y., Bai, Y., & Yan, B. (2010). Functionalized carbon nanotubes for potential medicinal applications. *Drug discovery today*, *15*(11-12), 428-435.

Liopo, A. V., Stewart, M. P., Hudson, J., Tour, J. M., & Pappas, T. C. (2006). Biocompatibility of native and functionalized single-walled carbon nanotubes for neuronal interface. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, *6*(5), 1365-1374.

Pastorin, G. (2009). Crucial functionalizations of carbon nanotubes for improved drug delivery: a valuable option?. *Pharmaceutical research*, *26*, 746-769.

Ménard-Moyon, C., Venturelli, E., Fabbro, C., & Samorı, C. (2010). , T. Da Ros, K. Kostarelos, M. Prato and A. Bianco. *Expert Opin. Drug Discovery*, *5*, 691-707.

Koromilas, N. D., Lainioti, G. C., Gialeli, C., Barbouri, D., Kouravelou, K. B., Karamanos, N. K., ... & Kallitsis, J. K. (2014). Preparation and toxicological assessment of functionalized carbon nanotube-polymer hybrids. *PLoS One*, *9*(9), e107029.

Allegri, M., Perivoliotis, D. K., Bianchi, M. G., Chiu, M., Pagliaro, A., Koklioti, M. A., ... & Bussolati, O. (2016). Charitidis CA Toxicity Determinants of Multi-Walled Carbon Nanotubes: The Relationship between Functionalization and Agglomeration. *Toxicol. Rep*, *3*, 230-243.

Rodrigues, D. F., Jaisi, D. P., & Elimelech, M. (2013). Toxicity of functionalized single-walled carbon nanotubes on soil microbial communities: implications for nutrient cycling in soil. *Environmental science & technology*, *47*(1), 625-633.

Mohammadi, E., Zeinali, M., Mohammadi-Sardoo, M., Iranpour, M., Behnam, B., & Mandegary, A. (2020). The effects of functionalization of carbon nanotubes on toxicological parameters in mice. *Human & Experimental Toxicology*, *39*(9), 1147-1167.

Ursini, C. L., Cavallo, D., Fresegna, A. M., Ciervo, A., Maiello, R., Casciardi, S., ... & Iavicoli, S. (2012). Study of cytotoxic and genotoxic effects of hydroxyl-functionalized multiwalled carbon nanotubes on human pulmonary cells. *Journal of Nanomaterials*, *2012*, 7-7.

www.SID.ir

Archive of SID

Coccini, T., Roda, E., Sarigiannis, D. A., Mustarelli, P., Quartarone, E., Profumo, A., & Manzo, L. (2010). Effects of water-soluble functionalized multi-walled carbon nanotubes examined by different cytotoxicity methods in human astrocyte D384 and lung A549 cells. *Toxicology*, *269*(1), 41-53.

Song, G., Guo, X., Zong, X., Du, L., Zhao, J., Lai, C., & Jin, X. (2019). Toxicity of functionalized multi-walled carbon nanotubes on bone mesenchymal stem cell in rats. *Dental materials journal*, *38*(1), 127-135.

www.SID.ir