

تعیین شاخص‌های سم شناسی کربن نانوتیوب و کریزوتایل بر اساس سمیت سلولی در سلول‌های اپیتلیال ریه انسان به صورت اینویترو

یوسف محمدیان: دانشجوی دوره کارشناسی ارشد، گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران
سید جمال‌الدین شاه‌طاهری: استاد، گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران- نویسنده رابط:
shahtaheri@tums.ac.ir

علی اکبر صورت‌یراقی: استادیار، گروه تغذیه و بیوشیمی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

حسین کاکویی: استاد، گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

محمد حاج آقا زاده: دانشجوی دوره دکتری، گروه بهداشت حرفه‌ای، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۶/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۰/۲۶

چکیده

زمینه و هدف: در این مطالعه سمیت سلولی کربن نانوتیوب تک جداره و چند جداره و کریزوتایل بر روی سلول‌های اپیتلیال ریه انسان با استفاده از شاخص‌های سم شناسی: $NOAEC$ (No Observable Adverse Effect Concentration) و $Inhibitory$ IC_{50} (Concentration 50) و $Total$ $Lethal$ $Concentration$ (TLC) مقایسه شد.

روش کار: سلول‌های اپیتلیال ریه انسان در مواجهه با غلظت‌های مختلف (۱ تا ۱۵۰۰ میکروگرم بر میلی لیتر) کربن نانوتیوبها و کریزوتایل به مدت ۶ و ۲۴ ساعت قرار داده شدند و با استفاده از آزمون MTT سمیت سلولی بررسی شد. مقادیر شاخص‌های IC_{50} ، $NOAEC$ و TLC با استفاده از آنالیز پروبیت بدست آمد.

نتایج: نتایج مطالعه نشان داد بین سمیت سلولی و غلظت مواجهه برای هر سه ماده از لحاظ آماری همبستگی معنی داری وجود دارد ($p < 0/001$). کربن نانوتیوب چند جداره کمترین مقدار شاخص $NOAEC$ و IC_{50} را در مقایسه با کربن نانوتیوب تک جداره و کریزوتایل داشت. میزان شاخص TLC کربن نانوتیوب تک جداره کمتر از کربن نانوتیوب چند جداره و کریزوتایل بود.

نتیجه گیری: سمیت سلولی کربن نانوتیوب چند جداره در غلظت‌های کم نسبت به کربن نانوتیوب تک جداره و کریزوتایل بیشتر می باشد و با توجه به اینکه مواجهه با این مواد عمدتاً در غلظت‌های کم صورت می پذیرد، بنابراین سمیت سلولی کربن نانوتیوب چند جداره از اهمیت بالایی برخوردار است و باید مدنظر افرادی که در مواجهه با این ذرات هستند قرار بگیرد. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته می توان نتیجه گیری کرد که کربن نانوتیوب‌ها همانند الیاف کریزوتایل سمیت سلولی قابل ملاحظه‌ای بر سلول‌های اپیتلیال ریه انسان دارند.

واژگان کلیدی: کربن نانوتیوب، کریزوتایل، سمیت سلولی، شاخص‌های سم شناسی، آزمون MTT

مقدمه

کاربرد در بخش‌های مختلف صنعت از قبیل الکترونیک، ساختمان، هوافضا، شیمیایی، داروسازی و پزشکی دارند. با توجه به قابلیت کاربرد گسترده این مواد امکان مواجهه با ذرات نانو تیوب در مراکز تولیدی و تحقیقاتی به خصوص هنگام حمل و جابجایی این مواد وجود دارد. به طوری که در یک مطالعه ارزیابی مواجهه در یک فرآیند تولیدی

یکی از محصولات فناوری نانو، کربن نانوتیوب‌ها می‌باشند که ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی و مکانیکی برجسته‌ای از قبیل قدرت کششی بالا، وزن فوق العاده کم، ثبات شیمیایی و حرارتی و ویژگی نیمه هادی الکترونیکی را دارا می‌باشند. این مواد پتانسیل زیادی برای

روش کار

مواد شیمیایی: کربن نانوتیوب تک جداره و چند جداره از پژوهشگاه صنعت نفت ایران خریداری شد. در این پژوهشگاه این مواد نانو با فرآیند رسوب بخار شیمیایی **Chemical Vapor Deposition** تولید می‌شوند. الیاف کریزوتایل از گروه بهداشت حرفه‌ای دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی تهران تامین گردید در مرحله اول کریزوتایل آسیاب و به صورت پودر درآورده و متعاقباً در آب مقطر به حالت سوسپانسیون در آورده شد. برای ایجاد سوسپانسیون یکنواخت به مدت ۵ دقیقه در شیکر (**Shaker**) قرار داده شد. محلول سوسپانسیون از فیلتر غشایی (**Memberan filter**) با پورسایز ۰/۴۵ میکرون و قطر ۳۷ میلی‌متری عبور داده شد. فیلتر غشایی با طلا پوشش داده شد و با استفاده از میکروسکوپ **SEM** طول و قطر ۵۰ لیف از الیاف کریزوتایل تعیین و میانگین آنها محاسبه گردید.

معرف **3-(4,5dimethylthiazol-2-yl)2,5-**
diphenyltetrazolium bromide (MTT) از شرکت سیگما آلدردیج آمریکا، محیط کشت سلول (**DMEM**)، مکمل‌های آن و **Trypsin-EDTA** از شرکت **PAA** استرالیا و **Dimethylsulfoxide (DMSO)** از شرکت مرک آلمان خریداری شد.

مشخصه‌یابی کربن نانو تیوب‌ها و الیاف کریزوتایل: بمنظور تعیین ویژگی‌های فیزیکی کربن نانو تیوب‌ها و الیاف کریزوتایل مانند طول و قطر از روش‌های میکروسکوپی الکترونی استفاده گردید. طول و قطر کربن نانوتیوب‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری بدست آمد. مساحت سطح ویژه کربن نانو تیوب‌ها نیز با استفاده از روش جذب نیتروژن در دمای ۷۷ درجه کلون بدست آمد. طول و قطر الیاف کریزوتایل نیز با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی بدست آورده شد. بمنظور آنالیز عنصری الیاف کریزوتایل از میکروسکوپ الکترونی روبشی مجهز به دکتور اسپکتروسکوپی اشعه ایکس (**SEM-EDS**) بهره گرفته شد.

مواجهه کارگران با نانوتیوب چند دیواره ۰/۳۳ میلی‌گرم بر مترمکعب گزارش گردیده است (**Han et al. 2008**). بنابراین انتظار می‌رود مواجهه‌ی شغلی و عمومی با کربن نانوتیوب‌ها به یکی از نگرانی‌های جدی در آینده نزدیک تبدیل شود. کربن نانوتیوب‌ها ساختاری فیبری شکل دارند و از لحاظ ابعاد فیزیکی و مقاومت زیستی (**Bioresistance**) شبیه به آزیست می‌باشند (**Murr and Soto 2004**). از اینرو محققان نگرانی‌هایی در خصوص اثرات فیبرهای نانوتیوب بر سلامتی انسان دارند و می‌کوشند تا اشتباه تاریخی مربوط به آزیست مجدداً تکرار نشود. مطالعاتی در زمینه اثرات ناشی از مواجهه با کربن نانوتیوب و همچنین مقایسه اثرات سمیت سلولی کربن نانوتیوب‌ها و آزیست (کریزوتایل) به صورت **in vitro** و **in vivo** بر سلول‌های انسانی و حیوانی انجام شده است. با این وجود نتایج قطعی درباره اثرات کربن نانو تیوب‌ها بر سلامتی انسان از این مطالعات حاصل نگردیده است (**Gracian et al. 2009**).

با توجه به اینکه اولین و مهمترین راه مواجهه با گازها، بخارات و ذرات در محیط‌های شغلی دستگاه تنفس می‌باشد، در این مطالعه سلول ریه انسان به منظور ارزیابی اثرات سمیت سلولی نانوتیوب‌ها انتخاب شده است. سمیت کربن نانوتیوب‌ها براساس مشخصات فیزیکی- شیمیایی، فرآیند تولید، ناخالصی‌ها و روش‌های تهیه محلول سوسپانسیون کربن نانوتیوب‌ها متفاوت می‌باشد (**Masumi et al. 2010**). در سال‌های اخیر کشور ایران به عنوان یکی از کشورهای در حال توسعه در زمینه نانو تکنولوژی و تولید کربن نانوتیوب‌ها مطرح می‌باشد. لذا مطالعه حاضر با هدف مقایسه میزان اثرات سمی نانوتیوب‌های چند جداره و تک جداره با آزیست (کریزوتایل) در سلول‌های ریه انسان (**A549**) به صورت **in vitro** با استفاده از شاخص‌های **Total No Lethal Concentration (TLC)** و **Observable Adverse Effect Concentration Inhibitory Concentration 50 (NOAEC)** و **(IC50)** انجام پذیرفت.

۷/۸، ۱۵/۶، ۳۱/۲۵، ۶۲/۵، ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۱۰۰، ۱۲۰۰، ۱۳۰۰، ۱۴۰۰ و ۱۵۰۰ میکروگرم بر میلی‌لیتر) رقیق شد.

آزمون ارزیابی سمیت سلولی: به‌منظور ارزیابی سمیت سلولی از آزمون MTT استفاده شد. MTT یک نمک تترازولیوم محلول در آب است و هنگامی که این ترکیب در PBS آماده سازی می‌شود، ترکیب زرد رنگی ایجاد می‌کند. پس از افزودن MTT آماده سازی شده به سلول‌های کشت داده شده، حلقه MTT فقط در میتوکندری سلول‌های زنده توسط آنزیم هیدروژناز شکسته و به ترکیب نامحلول فورمازان تبدیل می‌گردد. بلورهای فورمازان در حلالی مانند DMSO حل شده و به رنگ ارغوانی ظاهر می‌شود که میزان جذب محلول در طول موج ۵۷۰ nm با استفاده از ریدر الیزا اندازه‌گیری می‌شود.

سلول‌ها به تعداد ۱۰۰۰۰ سلول در هر حفره پلیت ریخته شد، پلیت‌ها بمدت ۲۴ ساعت در انکوباتور قرار داده شد تا سلول‌ها در کف ثابت شوند، پس از ۲۴ ساعت، محیط رویی حفره‌ها کامل برداشته شد و با PBS شستشو داده شدند. غلظت‌های مختلف کربن نانوتیوب‌ها و کریزوتایل که در محیط کشت حاوی ۵ درصد سرم و محیط کشت بعلاوه‌ی DMSO آماده شده بود به حفره‌ها اضافه شد. دو عدد حفره به عنوان کنترل استفاده گردید. حفره اول IC_{0} نامگذاری شد که فقط حاوی محیط کشت بود و دیگری IC_{100} نام داشت که محیط کشت حاوی سلول بود. به‌منظور حذف جذب زمینه‌ای ناشی از خود ذرات کربن نانوتیوب‌ها و کریزوتایل از غلظت‌های مورد تست نیز حفره کنترل در نظر گرفته شد. ۲۴ ساعت بعد از مواجهه محیط، مایه رویی حفره‌ها برداشته و هر حفره با ۱۰۰ میکرولیتر PBS شستشو داده شد. محیط بدون سرم به میزان ۱۰۰ میکرولیتر به حفره‌ها افزوده شد، معرف MTT به مقدار ۱۰ میکرولیتر به هر یک از حفره‌ها اضافه شد. پلیت‌ها ۳ ساعت در انکوباتور قرار داده شد و سپس محیط رویی حفره‌ها بیرون ریخته شد. از آنجایی که کریستال‌های آبی رنگ فورمازان در آب غیر محلول

کشت سلول: سلول A459 (ATCC, C137)، که یک لاین سلولی سرطانی اپتلیال ریه انسان می‌باشد، از بانک سلولی ایران (انستیتو پاستور) تهیه گردید. سلول‌ها در محیط کشت Dulbeccos Modified Essential Medium (DMEM) حاوی L-glutamine ۱۰ درصد و Foetal Bovine Serum (FBS) ۱۰ درصد Penicilin/streptomycin در دمای ۳۷ درجه سانتیگراد و ۵ درصد دی‌اکسید کربن انکوباتور کشت داده شدند.

سلول‌های A549 از لحاظ ویژگی‌های مورفولوژیک چسبنده (Adherent) هستند. بنابراین زمانی که سلول‌ها به حالت تلاقی (Confluence) رسیدند، محیط کشت از فلاسک برداشته و سلول‌ها با Phosphate buffered saline (PBS) شستشو داده شدند. سلول‌های چسبیده به کف فلاسک با استفاده از Trypsin/ EDTA در محیط کشت به حالت شناور درآورده شد. زیست پذیری سلولی (Cell Viability) با استفاده از روش رنگ‌آمیزی تریپان بلو ارزیابی و تعداد سلول‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری تعیین گردید.

دیسپرس کردن نانوذرات و کریزوتایل: سوسپانسیون‌های استوک با غلظت ۱/۵ میلی‌گرم بر میلی‌لیتر از کربن نانوتیوب تک جداره، کربن نانوتیوب چند جداره و کریزوتایل در محیط کشت حاوی ۰/۵ درصد DMSO حل شدند. سمیت سلولی محیط کشت حاوی ۰/۵ درصد DMSO بر روی سلول‌های اپتلیال ریه انسان بررسی شد و هیچ‌گونه سمیت سلولی بر سلول‌های اپتلیال ریه‌ی انسان مشاهده نشد. به‌منظور تهیه غلظت‌های مورد تست از عمل اولتراسونه استفاده شد. قبل و بعد از اولتراسونه کردن، سوسپانسیون استوک به مدت ۲۰ دقیقه بطول انجامید شامل ۴ مرحله پیاپی بود که در هر مرحله، سوسپانسیون ۵ دقیقه اولتراسونه و یک دقیقه با شیکر بهم زده می‌شد. سوسپانسیون استوک بلافاصله به طور سریالی به غلظت‌های مورد آزمایش (۱، ۱/۹۵، ۳/۹،

میکروسکوپ الکترونی عبوری از کربن نانو تیوب‌ها آورده شده است.

مشخصات الیاف کریزوتایل با استفاده از میکروسکوپ SEM بدست آورده شد، بطوریکه میانگین طول و قطر ۵۰ لیف مطالعه شده به ترتیب ۲۷/۳۹ و ۲/۹۳ میکرومتر بدست آمد. در شکل ۲ تصاویری از الیاف کریزوتایل که با استفاده از میکروسکوپ SEM تهیه شده است، آورده شده است. در شکل ۳ نیز آنالیز عنصری یک لیف کریزوتایل با استفاده از میکروسکوپ SEM-EDS نشان داده شده است.

تاثیر اولتراسونه کردن بر میزان حل شدن کربن نانوتیوب‌ها در محلول: ویژگی غیر قابل حل بودن کربن نانوتیوب‌ها ممکن است منجر به چسبیدن ذرات به همدیگر (Agglomeration) و آگلومراسیون (Agglomeration) در محلول‌های آبی بشود. بنابراین برای سوسپانسیون کامل کربن نانوتیوب‌ها باید اولتراسونه شوند. در شکل ۴ تاثیر اولتراسونه بر میزان حل شدن کربن نانوتیوب‌ها بعد از ۲۰ دقیقه اولتراسونه در محلول DMSO محیط کشت نشان داده شده است.

تعیین مقادیر شاخص‌های NOAEC، IC₅₀ و TLC: به منظور بدست آوردن مقادیر شاخص‌های سمیت NOAEC، IC₅₀ و TLC از آنالیز پروبیت استفاده شد. آنالیز پروبیت در بررسی سمیت مواد مختلف و مقایسه آنها در سم‌شناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در جدول ۱ مقادیر شاخص‌های سمیت دو نوع کربن نانوتیوب و الیاف کریزوتایل آورده شده است.

مقایسه شاخص‌های سم‌شناسی مواد نانو ساختار در بین آنها: به منظور مقایسه سمیت مواد شیمیائی مورد مطالعه با یکدیگر مقادیر شاخص‌های NOAEC، IC₅₀ و TLC با استفاده از آزمون آماری t-test مورد آزمون قرار گرفت. بنابراین مقادیر سه شاخص در دو دوره مواجهه ۶ و ۲۴ ساعت برای کربن نانوتیوب تک جداره با چند جداره، کربن نانوتیوب تک جداره با کریزوتایل و کربن نانوتیوب چند جداره با کریزوتایل آزمون گردید (جدول ۲). نتایج

می‌باشند و بایستی قبل از رنگ سنجی توسط ماده‌ی حلالی نظیر DMSO به حالت محلول در آیند، ۲۰۰ میکرولیتر DMSO به هر حفره اضافه شد. پلیت‌ها به مدت ۲۰ دقیقه در شیکر قرار داده شدند. در نهایت جذب نوری محلول در طول موج ۵۷۰ با استفاده از دستگاه ریدر الیزا قرائت گردید.

با استفاده از میزان جذب در غلظت‌های مختلف کربن نانوتیوب‌ها و کریزوتایل شاخص‌های Total No Lethal Concentration (TLC) و Observable Adverse Effect Concentration (NOAEC) و Inhibitory Concentration 50 (IC₅₀) بدست آورده شد.

آنالیز نتایج: آزمایش مربوط به هر غلظت سه بار تکرار شد و میانگین آنها بدست آمد. میانگین بدست آمده برای هر غلظت توسط آنالیز پروبیت و با استفاده از نرم افزار SPSS Version 16.0 آنالیز شد و شاخص‌های LC₅₀، NOAEC و TLC محاسبه گردید. مقادیر شاخص‌های NOAEC، LC₅₀ و TLC برابر غلظتی در نظر گرفته شد که مرگ و میر سلول‌ها در آنها به ترتیب ۱۰، ۵۰ و ۹۹ درصد بود. به منظور بررسی معنی‌داری اختلاف این شاخص‌ها در بین مواد نانو ساختار و در دو دوره زمانی مواجهه ۶ و ۲۴ ساعته از آزمون مقایسه t-test استفاده شد.

نتایج

مشخصات کربن نانو تیوب‌ها و الیاف کریزوتایل: طول کربن نانوتیوب‌های تک جداره و چند جداره مشترکاً ۱۰ میکرومتر بود. در حالیکه قطر کربن نانوتیوب‌های تک جداره ۱۰ نانومتر و کربن نانوتیوب‌های چند جداره ۱۶ نانومتر بود. مساحت سطح ویژه کربن نانوتیوب‌های تک جداره و چند جداره به ترتیب ۳۰۳ و ۱۳۳ متر مربع به ازاء هر گرم آنها بود. آهن به عنوان ناخالصی عمده کربن نانوتیوب‌ها با میزان ۱۰ درصد تعیین گردید. در شکل ۱ تصاویر تهیه شده با استفاده از

میکروسکوپ نوری و حتی TEM نیز دیده نشوند. مطالعات کمی در مورد آگلومراسیون و نفوذ (Internalization) کربن نانوتیوبها انجام شده است. در مطالعات Monterio-Rivier و همکارانش و Bussy و همکارانش نشان داده شد که سمیت سلولی ناشی از کربن نانوتیوب چند جداره بر سلولهای کراتینوسیت اپیدرمال انسان ناشی از نفوذ (Internalization) این ذرات به داخل سلول می باشد (Monteiro-

Riviere and et al. 2005; Bussy et al. 2008). در این مطالعه در مرحله اول بر اساس مطالعات Davoren et al. (2007) از محیط کشت حاوی ۵ درصد سرم به منظور دیسپرس کردن کربن نانوتیوبها استفاده شد و به مدت ۱۰ دقیقه اولتراسونه گردید. با این وجود ذرات کربن نانوتیوب در محلول مورد استفاده خوب دیسپرس نشدند و آگلومراسیون صورت گرفت. احتمالاً دلیل اینکه کربن نانوتیوبها مورد استفاده در این مطالعه در مقایسه با مطالعه قبلی در محلول حاوی ۵ درصد سرم به خوبی دیسپرس نشدند بدلیل تفاوت در سایز ذرات مورد استفاده و فرآیند تولید باشد. به طوریکه قطر ذرات کربن نانوتیوب چند جداره و تک جداره مورد استفاده در مطالعه حاضر به ترتیب ۱۶ و ۱۰ نانومتر بود و در مطالعه Davoren و همکارانش ۱ نانومتر بود. بنابراین برای دیسپرس کردن کامل ذرات بر اساس مطالعه (Masumi et al. 2010) از محیط کشت حاوی DMSO استفاده شد. غلظت نهایی DMSO در محیط کشت ۰/۵ درصد بود. این محلول به مدت ۲۰ دقیقه اولتراسونه شد. با استفاده از این محلول ذرات به خوبی دیسپرس و برای مطالعه از این محلول استفاده گردید.

در این مطالعه مقدار شاخص NOAEC و IC50 کربن نانوتیوب چند جداره نسبت به کربن نانوتیوب تک جداره در هر دو دوره‌ی مواجهه ۶ و ۲۴ ساعته کمتر بود. بنابراین کربن نانوتیوب چند جداره سمی تر از کربن نانوتیوب تک جداره است.

آزمون t-test نشان داد که تنها در دوره مواجهه ۲۴ ساعته مقادیر شاخص NOAEC (کربن نانوتیوب تک جداره - چند جداره و کربن نانوتیوب تک جداره - کریزوتایل) و IC50 (کربن نانوتیوب تک جداره - چند جداره) از لحاظ آماری اختلاف معنی داری نداشتند. در بقیه موارد مقایسه مقادیر شاخصها در دو دوره زمانی ۶ و ۲۴ ساعته در بین مواد نانساختار مطالعه شده اختلاف معنی داری نشان نداد.

مقایسه شاخصهای سم شناسی مواد نانو ساختار در دو دوره زمانی مواجهه ۶ و ۲۴ ساعته: علاوه بر مقایسه آماری شاخصهای سمیت در بین مواد نانساختار مطالعه شده به تفکیک دورههای زمانی مواجهه، مقایسه آماری شاخصهای سم شناسی در بین دو دوره زمانی مواجهه برای تک تک مواد نانساختار با استفاده از آزمون آماری t-test بعمل آمد (جدول ۳). همانطور که ملاحظه می گردد به جز شاخص NOAEC کربن نانوتیوب چند جداره، میزان شاخصهای NOAEC، IC50 و TLC هر سه ماده در دو دوره‌ی مواجهه ۶ و ۲۴ ساعته از لحاظ آماری اختلاف معنی داری داشتند.

بحث

ویژگی غیر قابل حل بودن کربن نانوتیوبها ممکن است منجر به چسبیدن ذرات به همدیگر (Agglomeration) در محلولهای آبی گردد (Hirano et al. 2010). تاثیر آگلومره شده کربن نانوتیوبها بر سمیت آنها در مطالعات *In vitro* و *In vivo* مورد بررسی قرار گرفته است. در یک مطالعه تاثیر آگلومراسیون کربن نانوتیوبها بر سمیت سلولی نشان داده شد، به طوری که سمیت کربن نانوتیوبهای خوب دیسپرس شده بیشتر از کربن نانوتیوبهای آگلومره شده بود (Shaobin et al. 2009).

ذرات بزرگ کربن نانوتیوب که آگلومره شده اند نمی توانند وارد سلول شوند ولی ذرات ریز که به طور مجزا هستند وارد سلول می شوند که ممکن است با

دارد. این شاخص در مورد کربن نانوتیوب چند جداره بعد از ۶ و ۲۴ ساعت مواجهه به ترتیب ۴۴۲ و ۱۱۴ میکروگرم بر میلی‌لیتر بدست آمد. اختلاف این دو مقدار در مقایسه با نانوتیوب تک جداره بسیار کم می‌باشد (جدول ۱).

نتیجه‌گیری

کربن نانوتیوب‌ها یکی از محصولات فن آوری نانو می‌باشند که ویژگی‌های فوق‌العاده‌ای دارند بنابراین می‌تواند کاربردهای زیادی در صنایع مختلف داشته باشد. از طرفی سمیت این مواد نگرانی‌هایی را ایجاد کرده است. فاکتورهای موثر بر سمیت کربن نانوتیوب‌ها مشخصات فیزیکی و شیمیایی آنها شامل سایز ذرات، مساحت سطح ویژه و ناخالصی فلزات کربن نانوتیوب‌ها می‌باشد. روش‌های دیسپرس کردن ذرات کربن نانوتیوب نیز بر سمیت این مواد تاثیرگذار است. کربن نانوتیوب‌ها از لحاظ مشخصات فیزیکی شبیه الیاف آزیست بوده و به صورت فیبر هستند. با توجه به نتایج حاصل از این مطالعه می‌توان نتیجه‌گیری کرد که کربن نانوتیوب‌ها همانند الیاف کریزوتایل سمیت سلولی قابل ملاحظه‌ای بر سلول‌های اپیتلیال ریه انسان دارند و باید در نظر داشت که غلظت و مدت زمان مواجهه می‌تواند در تاثیرگذاری بر سلول‌های اپیتلیال ریه انسان نقش قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. بنابراین ملاحظات ایمنی و بهداشت هنگام مصرف و کار با کربن نانوتیوب‌ها باید در نظر گرفته شود تا تجربیات تلخ ماده‌ی شیمیایی آزیست تکرار نشود.

تشکر و قدردانی

این مقاله حاصل طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی تهران به کد ۱۵۱۹۶ می‌باشد. بنابراین از حمایت و پشتیبانی دانشگاه علوم پزشکی تهران قدردانی می‌شود.

مقدار شاخص NOAEC و IC50 کربن نانوتیوب چند جداره نسبت به کریزوتایل در هر دو دوره‌ی مواجهه ۶ و ۲۴ ساعته کمتر بود (جدول ۱) بنابراین کربن نانوتیوب چند جداره سمی‌تر از کریزوتایل است. مقدار شاخص NOAEC در کربن نانوتیوب تک جداره نسبت به کریزوتایل در هر دو دوره‌ی مواجهه ۶ و ۲۴ ساعته بیشتر است (جدول ۱)، بنابراین سمیت سلولی کریزوتایل در غلظت‌های پایین بیشتر از کربن نانوتیوب تک جداره می‌باشد. مقدار شاخص IC50 و TLC در کربن نانوتیوب تک جداره در هر دو دوره‌ی مواجهه ۶ و ۲۴ ساعته نسبت به کریزوتایل کمتر می‌باشد (جدول ۱)، بنابراین سمیت سلولی کربن نانوتیوب تک جداره در غلظت‌های بالا نسبت به کریزوتایل بیشتر می‌باشد.

در مطالعه‌ی که Lone در سال ۲۰۱۱ بر روی سمیت کربن نانوتیوب چند جداره بر روی سلول‌های برونشیل اپیتلیال ریه انسان انجام دادند، از دو نوع کربن نانوتیوب چند جداره که یکی تولید کشور ژاپن و دیگری تولید کشور نروژ بود، استفاده کردند و سمیت این دو کربن نانوتیوب‌ها را با کروسیدولیت مقایسه کردند. نتایج مطالعه نشان داد که کربن نانوتیوب چند جداره کشور ژاپن از کروسیدولیت و کربن نانوتیوب چند جداره تولید کشور نروژ سمی‌تر است (Lone 2011). کربن نانوتیوب چند جداره تولید شده در کشور ژاپن توسط روش رسوب بخار شیمیایی تولید شده بود که کربن نانوتیوب‌های مورد استفاده در این مطالعه نیز با این روش تولید شده‌اند.

نتایج نشان می‌دهد که سمیت سلولی کربن نانوتیوب تک جداره نسبت به کربن نانوتیوب چند جداره و کریزوتایل وابستگی بیشتری به زمان دارد. به عنوان مثال شاخص IC50 کربن نانوتیوب تک جداره بعد از ۶ و ۲۴ ساعت مواجهه به ترتیب ۱۹۹۶ و ۱۳۲ میکروگرم بدست آمد و بین این دو مقدار اختلاف زیادی وجود

جدول ۱ - مقادیر شاخص های NOAEC، IC50 و TLC کربن نانوتیوب ها و الیاف کریزوتایل

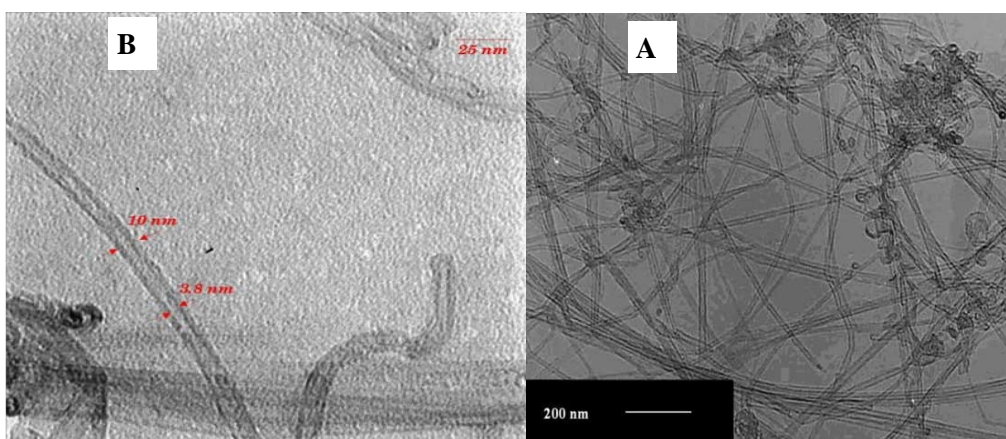
شاخص سمیت		نانوتیوب چند جداره		نانوتیوب تک جداره		کریزوتایل
ساعت		۶	۲۴	۶	۲۴	۶
NOAEC (µg/ml)		۰/۳	۰/۴	۳۴	۳	۲/۵
IC50 (µg/ml)		۴۴۲	۱۱۴	۱۹۹۶	۱۳۲	۵۱۶
TLC (mg/ml)		۵۸۰۰۰۰	۳۱۰۰	۳۰۰۰	۱۵۰	۸۲۰۰

جدول ۲- مقایسه آماری مقادیر شاخص NOAEC، IC50 و TLC برای کربن نانوتیوب ها و کریزوتایل در دو دوره ی مواجهه ی ۶ و ۲۴ ساعته

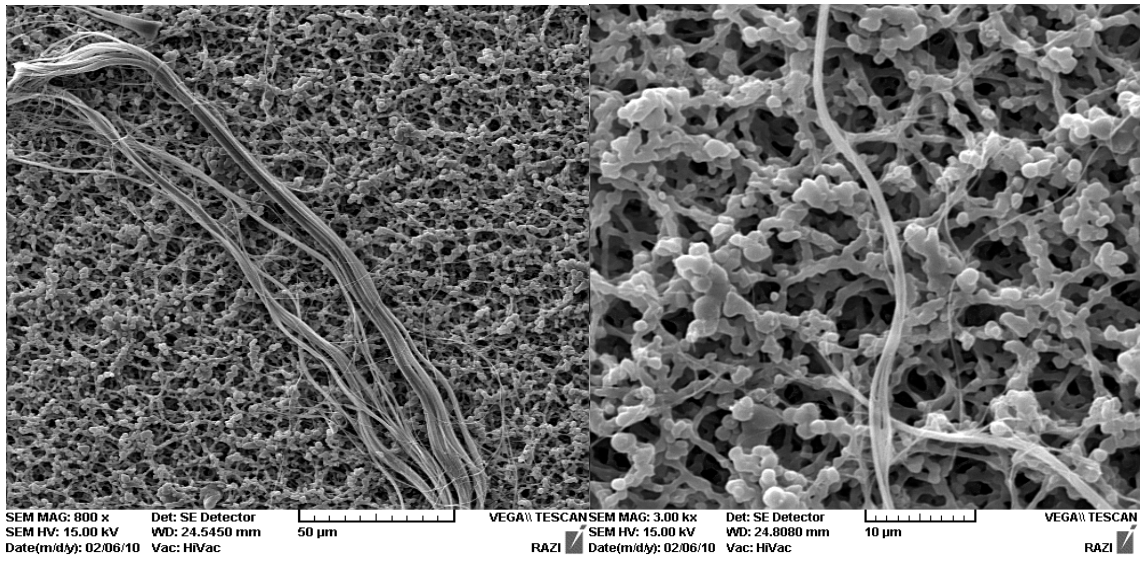
ماده نانوساختار	نتیجه آزمون t تست		شاخص سم شناسی
	مواجهه ۶ ساعته	مواجهه ۲۴ ساعته	
MWCNT-SWCNT	p<۰/۰۱	p=۰/۰۹	NOAEC
MWCNT-chrysotile	p<۰/۰۱	p<۰/۰۱	
SWCNT-chrysotile	p<۰/۰۱	p=۰/۰۴۸	
MWCNT-SWCNT	p<۰/۰۱	p=۰/۰۹	IC50
MWCNT-chrysotile	p<۰/۰۱	p<۰/۰۱	
SWCNT-chrysotile	p<۰/۰۱	p<۰/۰۱	
MWCNT-SWCNT	p<۰/۰۱	p<۰/۰۱	TLC
MWCNT-chrysotile	p<۰/۰۱	p<۰/۰۱	
SWCNT-chrysotile	p<۰/۰۱	p<۰/۰۱	

جدول ۳- مقایسه آماری مقادیر شاخص های سم شناسی مواد نانوساختار در دو دوره مواجهه ۶ و ۲۴ ساعته

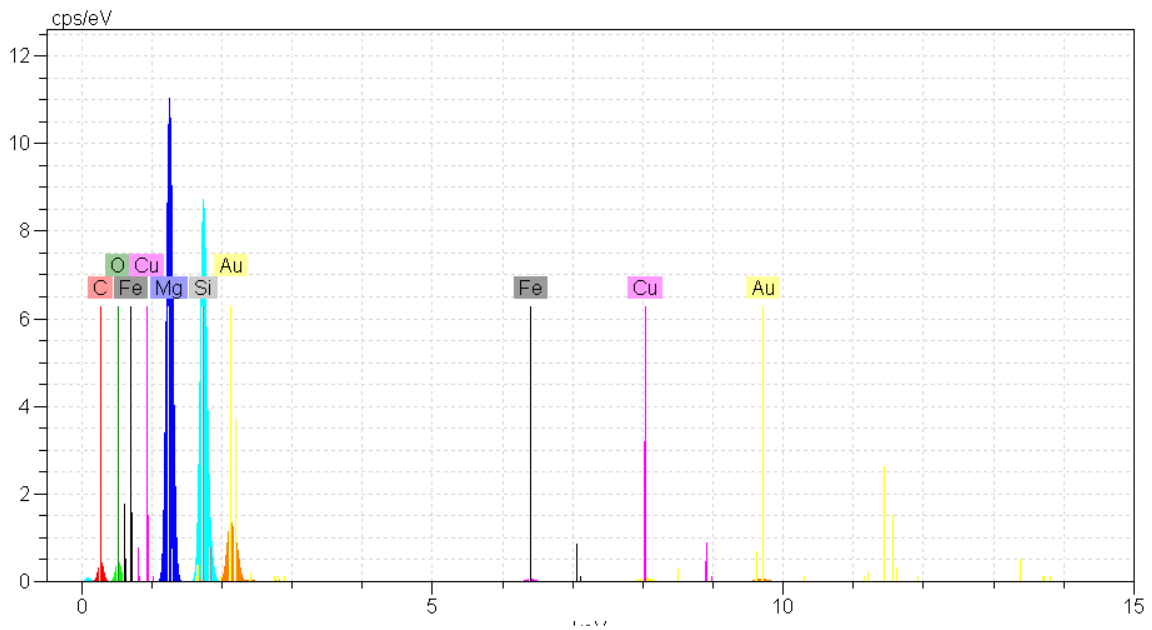
نتیجه آزمون t	مقدار شاخص در مدت زمان مواجهه		شاخص سمیت	ماده نانوساختار
	۲۴	۶		
p= ۰/۲۸	۰/۴	۰/۳	(μg/ml) NOAEC	کربن نانوتیوب چند جداره
p < ۰/۰۱	۱۱۴	۴۴۲	(μg/ml) IC50	
p < ۰/۰۱	۳۱۰۰	۵۸۰۰۰۰	(mg/ml) TLC	
p < ۰/۰۱	۳	۳۴	(μg/ml) NOAEC	کربن نانوتیوب تک جداره
p < ۰/۰۱	۱۳۲	۱۹۹۶	(μg/ml) IC50	
p < ۰/۰۱	۱۵۰	۳۰۰۰	(mg/ml) TLC	
p < ۰/۰۱	۲/۵	۱۷/۵	(μg/ml) NOAEC	کریزوتایل
p < ۰/۰۱	۵۱۶	۲۰۹۹	(μg/ml) IC50	
p < ۰/۰۱	۸۲۰۰	۱۳۰۰۰	(mg/ml) TLC	



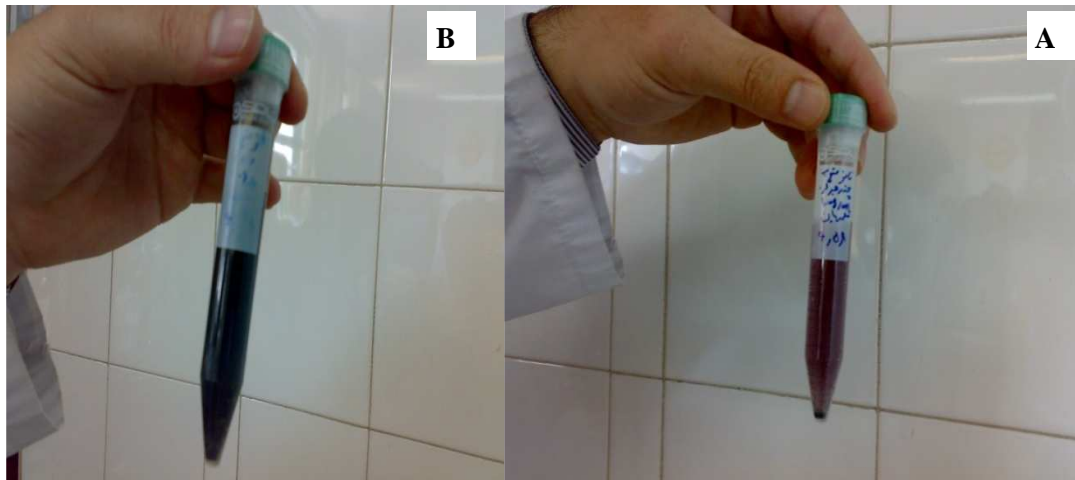
شکل ۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی کربن نانوتیوب تک جداره (A) و چند جداره (B)



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده از الیاف کریزوتایل



شکل ۳ - آنالیز عنصری یک لیف کریزوتایل با استفاده از میکروسکوپ SEM-EDS



شکل ۴- تاثیر اولتراسوننه بر میزان حل شده کربن نانوتیوب چند جداره، قبل از اولتراسوننه (A) و بعد از اولتراسوننه (B)

References

- Bussy, C., Cambedouzou, J., Lanone, S., Leccia, E., Heresanu, V., Pinault, M., Mayne-L'hermite, M., Brun, N., Mory, C., Cotte, M., Doucet, J., Boczkowski, J. and Launois, P., 2008. Carbon Nanotubes in Macrophages: Imaging and Chemical Analysis by X-ray Fluorescence Microscopy. *Nano Lett.*
- Davoren, M., Herzog, E., Casey, A., Cottineau, B., Chambers, G., Byrne, HJ. and Lyng, FM., 2007. In vitro toxicity evaluation of single walled carbon nanotubes on human A549 lung cells, *Toxicol In Vitro*, **21**(3), pp. 438–448.
- Gracian, T, Nagender Reddy, P. and Josef, H., 2009. Carbon nanotubes: toxicological impact on human health and environment, *J Appl Biomed*, **7**(1), pp. 1–13.
- Han, JH., Lee, EJ., Lee, JH., So, KP., Lee, YH., Bae, GN., Lee, SB., Ji, JH., Cho, MH. and Yu, IJ., 2008. Monitoring multiwalled carbon nanotube exposure in carbon nanotube research facility, *Inhal Toxicol*, **20**(8), pp.741-749.
- Hirano, S., Fujitani, Y., Furuyama, A., Kanno., 2010. Uptake and cytotoxic effects of multi-walled carbon nanotubes in human bronchial epithelial cells, *Toxicol Appl Pharmacol*, **249**(1), pp. 8-15.
- Lone Nilson., 2011. Cytotoxic and inflammatory responses of human lung cells exposed to multi-walled carbon nanotubes. Thesis of MSc degree. Norwegian University of Science and technology (NTNU).
- Masumi, A., Toshiaka, S., Toshie, S., Mtsutoshi, T., Shiegeki, k., Kasuke, N., Heihachiro, A. and Shojo, F., 2010. Genotoxicity and Cytotoxicity of Multi-wall Carbon Nanotubes in Cultured Chinese Hamster Lung Cells in Comparison with Chrysotile A Fibers, *J Occup Health*, **52**(3), pp. 155_166.
- Monteiro-Riviere, N., Nemanich, R., Inman, A., Wang, Y. and Riviere, J., 2005. Multi-

walled carbon nanotube interactions with human epidermal keratinocytes, *Toxicol Letters*, **155**(3), pp. 377–384.

Murr, LE. and Soto, KF., 2004. TEM comparison of chrysotile (asbestos) nanotubes and carbonnanotubes, *J Matre Sci Lett*, **39**(15), pp. 4941-4947.

Shaobin, L., Li, W., Lin, H., Ning, F., Matthew, W., Rong, X., Yanhui, Y. and Yuan, C., 2009. Sharper and faster "nano darts" kill more bacteria: a study of antibacterial activity of individually dispersed pristine single-walled carbon nanotube, *ACS Nano*, **3**(12), pp. 891-902.

Determination of toxicological indexes of carbon nanotubes and Chrysotile according to invitro cytotoxicity on Human Lung epithelium cells

Mohammadian, Y., MSPH. Student, Department of Occupational Health, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Shahtaheri, S.J., Ph.D. Professor, Department of Occupational Health, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran- Corresponding author: shahtaheri@tums.ac.ir

Saboor Yaraghi, A., Ph.D. Assistant Professor, Department of Nutrition and Biochemistry, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Kakooei, H., Ph.D. Professor, Department of Occupational Health, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Hajaghazadeh, M., Ph.D. Student, Department of Occupational Health, School of Public Health, Tehran University of Medical Sciences, Tehran, Iran

Received: Sep 3, 2012

Accepted: Jan 16, 2013

ABSTRACT

Background and aim: In this study the cytotoxicity to human epithelial lung cells of single-walled carbon nanotubes, multi-walled carbon nanotubes and chrysotile was compared based on the following cytotoxicity indices: no observable adverse effect concentration (NOAEC), inhibitory concentration 50 (IC50), and Total Lethal Concentration (TLC).

Materials and Methods: Human epithelial lung cells were exposed to different concentrations (1 to 1500 µg/ml) of carbon nanotubes and chrysotile for 6 and 24 hours. Cytotoxicity was assessed using the MTT assay. NOAEC, IC50, and TLC indices were determined by probit analysis.

Results: The results showed statistically significant correlations ($p < 0.001$) between cytotoxicity and exposure concentration in the case of all the three compounds. The NOAEC and IC50 indices were lowest for the multi-walled carbon nanotubes, while the single-walled carbon nanotubes showed the lowest TLC index.

Conclusion: Cytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes at low concentrations was higher than that of single-walled carbon nanotubes and chrysotile. This would mean that exposure to this compound occurs at low concentrations. Thus, cytotoxicity of multi-walled carbon nanotubes is a cause for concern. It can be concluded, then, that, like chrysotile fibers, carbon nanotubes are also considerably toxic to human epithelial lung cells.

Key words: Carbon nanotubes, Chrysotile, Cytotoxicity, Toxicological indexes, MTT assay