



جمهوری اسلامی ایران  
Islamic Republic of Iran

سازمان ملی استاندارد ایران

Iranian National Standard Organization



استاندارد ملی ایران

۱۶۴۶۳

چاپ اول

تیر ۱۳۹۲

**INSO**

**16463**

**1st. Edition**

**Jul.2013**

فناوری نانو – تعیین مشخصات نانولوله‌های کربنی چند  
جداره – فاکتورهای شکل مزوسکوپی

**Nanotechnologies – Characterization of  
multiwall carbon nanotubes– Mesoscopic  
shape factors**

**ICS:07.030**

## به نام خدا

### آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران

مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱ تنها مرجع رسمی کشور است که وظیفه تعیین، تدوین و نشر استانداردهای ملی (رسمی) ایران را به عهده دارد.

نام موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران به موجب یکصد و پنجاه و دومین جلسه شورای عالی اداری مورخ ۹۰/۶/۲۹ به سازمان ملی استاندارد ایران تغییر و طی نامه شماره ۲۰۶/۳۵۸۳۸ مورخ ۹۰/۷/۲۴ جهت اجرا ابلاغ شده است. تدوین استاندارد در حوزه های مختلف در کمیسیون های فنی مرکب از کارشناسان سازمان، صاحب نظران مراکز و مؤسسات علمی، پژوهشی، تولیدی و اقتصادی آگاه و مرتبط انجام می شود و کوششی همگام با مصالح ملی و با توجه به شرایط تولیدی، فناوری و تجاری است که از مشارکت آگاهانه و منصفانه صاحبان حق و نفع، شامل تولیدکنندگان، مصرف کنندگان، صادرکنندگان و وارد کنندگان، مراکز علمی و تخصصی، نهادها، سازمان های دولتی و غیر دولتی حاصل می شود. پیش نویس استانداردهای ملی ایران برای نظرخواهی به مراجع ذی نفع و اعضای کمیسیون های فنی مربوط ارسال می شود و پس از دریافت نظرها و پیشنهادات در کمیته ملی مرتبط با آن رشته طرح و در صورت تصویب به عنوان استاندارد ملی (رسمی) ایران چاپ و منتشر می شود.

پیش نویس استانداردهایی که مؤسسات و سازمان های علاقه مند و ذی صلاح نیز با رعایت ضوابط تعیین شده تهیه می کنند در کمیته ملی طرح و بررسی و در صورت تصویب، به عنوان استاندارد ملی ایران چاپ و منتشر می شود. بدین ترتیب، استانداردهایی ملی تلقی می شوند که بر اساس مفاد نوشته شده در استاندارد ملی ایران شماره ۵ تدوین و در کمیته ملی استاندارد مربوط که سازمان ملی استاندارد ایران تشکیل می دهد به تصویب رسیده باشد.

سازمان ملی استاندارد ایران از اعضای اصلی سازمان بین المللی استاندارد (ISO)<sup>۱</sup>، کمیسیون بین المللی الکتروتکنیک (IEC)<sup>۲</sup> و سازمان بین المللی اندازه شناسی قانونی (OIML)<sup>۳</sup> است و به عنوان تنها رابط<sup>۴</sup> کمیسیون کدکس غذایی (CAC)<sup>۵</sup> در کشور فعالیت می کند. در تدوین استانداردهای ملی ایران ضمن توجه به شرایط کلی و نیازمندی های خاص کشور، از آخرین پیشرفت های علمی، فنی و صنعتی جهان و استانداردهای بین المللی بهره گیری می شود.

سازمان ملی استاندارد ایران می تواند با رعایت موازین پیش بینی شده در قانون، برای حمایت از مصرف کنندگان، حفظ سلامت و ایمنی فردی و عمومی، حصول اطمینان از کیفیت محصولات و ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، اجرای بعضی از استانداردهای ملی ایران را برای محصولات تولیدی داخل کشور و/یا اقلام وارداتی، با تصویب شورای عالی استاندارد، اجباری نماید. سازمان می تواند به منظور حفظ بازارهای بین المللی برای محصولات کشور، اجرای استاندارد کالاهای صادراتی و درجه بندی آن را اجباری نماید. همچنین برای اطمینان بخشیدن به استفاده کنندگان از خدمات سازمان ها و مؤسسات فعال در زمینه مشاوره، آموزش، بازرسی، ممیزی و صدور گواهی سیستم های مدیریت کیفیت و مدیریت زیست محیطی، آزمایشگاه ها و مراکز کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، سازمان ملی استاندارد ایران این گونه سازمان ها و مؤسسات را بر اساس ضوابط نظام تأیید صلاحیت ایران ارزیابی می کند و در صورت احراز شرایط لازم، گواهینامه تأیید صلاحیت به آن ها اعطا و بر عملکرد آن ها نظارت می کند. ترویج دستگاه بین المللی یکاها، کالیبراسیون (واسنجی) وسایل سنجش، تعیین عیار فلزات گرانبها و انجام تحقیقات کاربردی برای ارتقای سطح استانداردهای ملی ایران از دیگر وظایف این سازمان است.

1- International Organization for Standardization

2 - International Electrotechnical Commission

3- International Organization of Legal Metrology (Organisation Internationale de Metrologie Legale)

4 - Contact point

5 - Codex Alimentarius Commission

کمیسیون فنی تدوین استاندارد  
" فناوری نانو - تعیین مشخصات نانو لوله‌های کربنی چند جداره - فاکتورهای شکل  
مزوسکوپی "

**رئیس:**

خانلری، محمدرضا  
(دکترای مواد)

**سمت و / یا نمایندگی**

عضو هیئت علمی دانشگاه بین المللی امام  
خمینی (ره) قزوین

**دبیر:**

نوری خراسانی، سعید  
(دکترای مواد پلیمری)

عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان -  
دانشکده مهندسی شیمی

**اعضاء:** (اسامی به ترتیب حروف الفبا)

اسلامی پور، الهه  
(کارشناس ارشد زیست شناسی)

کارشناس ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

پوی پوی، حسن  
(کارشناس ارشد شیمی)

کارشناس ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

چوخاچی زاده مقدم، امین  
(کارشناس ارشد نانومواد)

کارشناس ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

سیفی، مهوش  
( کارشناس ارشد مدیریت دولتی)

کارشناس استاندارد

مسروری، حسن  
( دکترای شیمی)

عضو هیئت علمی پژوهشگاه استاندارد

## پیش‌گفتار

استاندارد "فناوری نانو - تعیین مشخصات نانولوله‌های کربنی چند جداره- فاکتورهای شکل مزوسکوپی" که پیش‌نویس آن در کمیسیون‌های مربوط توسط سازمان ملی استاندارد ایران تهیه و تدوین شده و در دومین اجلاس کمیته ملی فناوری نانو مورخ ۱۳۹۲/۳/۲۰ مورد تصویب قرار گرفته است، اینک به استناد بند یک ماده ۳ قانون اصلاح قوانین و مقررات سازمان استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، مصوب بهمن ماه ۱۳۷۱، به عنوان استاندارد ملی ایران منتشر می‌شود.

برای حفظ همگامی و هماهنگی با تحولات و پیشرفت‌های ملی و جهانی در زمینه صنایع، علوم و خدمات، استانداردهای ملی ایران در مواقع لزوم تجدید نظر خواهد شد و هر پیشنهادی که برای اصلاح و تکمیل این استانداردها ارائه شود، هنگام تجدید نظر در کمیسیون فنی مربوط مورد توجه قرار خواهد گرفت. بنابراین، باید همواره از آخرین تجدیدنظر استانداردهای ملی استفاده کرد.

منبع و مأخذی که برای تهیه این استاندارد مورد استفاده قرار گرفته به شرح زیر است:

ISO/TS 11888 :2011, Nanotechnologies- Characterization of multiwall carbon nanotubes-  
Mesoscopic shape factors

## فهرست مندرجات

صفحه	عنوان
ب	آشنایی با سازمان ملی استاندارد ایران
ج	کمیسیون فنی تدوین استاندارد
د	پیشگفتار
و	مقدمه
۱	۱ هدف و دامنه کاربرد
۱	۲ اصطلاحات ، تعاریف و اختصارات
۱	۱-۲ اصطلاحات و تعاریف
۳	۲-۲ اختصارات
۴	۳ روش‌های آماده سازی نمونه
۴	۱-۳ آسیاب کردن
۴	۲-۳ روش پخش
۴	۳-۳ آماده سازی نمونه برای میکروسکوپ الکترونی روبشی
۵	۴ دستورالعمل آزمایشگاهی
۵	۱-۴ اندازه گیری SBPL با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی
۵	۱-۱-۴ میکروسکوپ الکترونی روبشی
۶	۱-۲-۴ روش‌های اندازه گیری SBPL
۷	۲-۴ اندازه گیری قطر داخلی و خارجی نانو لوله‌های کربنی چند جداره با استفاده از TEM
۷	۵ گزارش آزمون
۸	پیوست الف (اطلاعاتی) معادلات برای اصطلاحات و تعاریف در بند ۲ و پیوست ب ، پ و ت
۱۳	پیوست ب (اطلاعاتی) گرانروی سنجی
۱۴	پیوست پ (اطلاعاتی) پخش نور پویا و پخش نور پویا غیر قطبی شده
۱۶	پیوست ت (اطلاعاتی) مطالعه موردی و گزارش‌ها
۲۰	کتابنامه

نانو لوله‌های کربنی چند جداره<sup>۱</sup> (MWCNTs) که به روش رسوب دهی شیمیایی بخار<sup>۲</sup> (CVD) تولید شده‌اند برای استفاده در چند سازه‌های پلیمری و پوشش‌های رسانا به طور روزافزونی مورد توجه هستند. در بسیاری از موارد، نانو لوله‌های کربنی چند جداره که به روش CVD سنتز شده‌اند دارای نقاط خم شدگی ایستا (دائمی) هستند که در طول محورهایشان به طور تصادفی پخش شده‌اند. خواص فیزیکی و شیمیایی MWCNTs که به طور انبوه تولید شده‌اند بستگی دارد به توزیع آماری شکل‌های مزوسکوپی، اندازه‌های منفرد MWCNTs (به استاندارد ISO/TS 80004-3 مراجعه شود) در بین دیگر فاکتورها که در تولید انبوه مورد نظر است. بنابر این، این نکته اساسی است که شکل‌های مزوسکوپی برای حصول اطمینان از خواص نهایی برای طیف وسیعی از مواد شامل چند سازه‌های پلیمری و دیگر بخش‌ها علاوه بر مسائل مربوط به محیط‌زیست، ایمنی و سلامتی<sup>۳</sup> (EHS) تکرار پذیر باشد. این استاندارد روش‌های تعیین مشخصات فاکتورهای شکل مزوسکوپی MWCNTs، شامل دستورالعمل آماده‌سازی نمونه را ارائه می‌کند. این استاندارد بویژه روشی آماری را ارائه می‌کند که برای تعیین مشخصات MWCNTs که به روش رسوب دهی شیمیایی بخار (CVD) تولید شده‌اند، در حین تولید MWCNTs، ساختار محوری کاملاً خطی نیست و شامل نقاط خم‌شدگی دائمی هستند. این استاندارد روش‌های تعیین آماری کمی است که نشان دهنده بیشینه طول مستقیمی است که توسط خم‌شدگی دائمی تغییر شکل نداده و "طول پیوسته خم شدگی ایستا"<sup>۴</sup> (SBPL) نامیده می‌شود. مقدار SBPL اطلاعاتی در مورد ارتباط بین شکل و اندازه مزوسکوپی MWCNTs را ارائه می‌کند. اگر دو MWCNTs با طول یکسان، SBPL متفاوت داشته باشند، اندازه‌های کلی آن‌ها (مانند شعاع فرفره‌ای<sup>۵</sup> یا قطری معادل آن مانند قطر پویا) با یکدیگر متفاوت خواهد بود. در موارد کاربردی، متغیر بودن SBPL واکنش پذیری شیمیایی و خواص فیزیکی را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

هدایت الکتریکی و پایداری ابعادی ترکیب‌های پلیمری حاوی MWCNTs بسیار متاثر از SBPL نانو لوله‌های کربنی چند جداره مورد استفاده است.

خواص متفاوت مانند آستانه تحمل نفوذپذیری الکتریکی، سمیت، هدایت حرارتی، خواص رئولوژیکی و

خواص نشر میدانی تحت تاثیر SBPL قرار می‌گیرند. مقدار SBPL در تخمین مقدار افزودن CNT به

ماتریکس پلیمری برای هدایت الکتریکی (حد نفوذ) و همچنین مدل‌سازی خواص مکانیکی کامپوزیت پلیمر

CNT با مقادیر مختلف افزودنی موثر است. پیش از شروع هر تحقیقی در این رابطه کاربران این استاندارد

---

1- Multi Wall Carbon Nano Tubes (MWCNT's)  
 2- Chemical Vapour Deposition (CVD)  
 3- Environmental Health Safety (EHS)  
 4-- Static Bending Persistence Length (SBPL)  
 5- Gyration

باید با آخرین راهنمایی‌ها در مورد کار کردن و دور ریختن MWCNTs به ویژه در رابطه با استفاده از وسایل حفاظت شخصی مناسب آشنا شوند. اطلاعات در مورد روش‌های عملی رایج در ISO/TR12885 ارائه شده است.

## فناوری نانو - تعیین مشخصات نانولوله‌های کربنی چند جداره - فاکتورهای شکل مزوسکوپی

### ۱ هدف و دامنه کاربرد

هدف از تدوین این استاندارد تعیین مشخصات فاکتورهای شکل مزوسکوپی نانولوله‌های کربنی چندجداره (MWCNTs) می‌باشد. روش‌های استفاده شده شامل میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۱</sup> (SEM)، میکروسکوپ الکترونی عبوری<sup>۲</sup> (TEM) گرانروی سنجی و آنالیز بر پایه پخش نور می‌شود. این استاندارد همچنین شامل اصطلاحات دیگری است که برای تعریف طول خم‌شدگی پایدار ایستا (SBPL) جهت تعیین مشخصات لازم است. دو روش تقریبی برای ارزیابی SBPL (معمولاً از چند ده نانو متر تا چند صد نانومتر متغیر است) ارائه شده است. برای تعریف فاکتورهای شکل MWCNTs از عبارات و مفاهیم ریاضی همانند کاربرد آن‌ها در فیزیک و پلیمر استفاده شده است.

### ۲ اصطلاحات، تعاریف و اختصارات

#### ۱-۲ اصطلاحات و تعاریف

در این استاندارد واژه‌ها و تعاریف زیر کاربرد دارد:

یادآوری - معادلات ریاضی برای اصطلاحات و تعاریف در پیوست الف ارائه شده است.

#### ۱-۱-۲ شکل مزوسکوپی

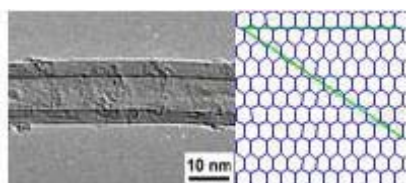
توصیفی از شکل در مقیاس قابل مشاهده از یک نانولوله کربنی چند جداره (MWCNT) منفرد است.

یادآوری ۱ - فاکتورهای شکل "مزوسکوپی" میانگین اندازه و شکل یک MWCNT منفرد و فاکتورهای شکل "ماکروسکوپی" شکل و اندازه توده یا انبوهه MWCNT را بیان می‌کند. "تفکیک در مقیاس اتمی" شکل یک MWCNT منفرد را در مقیاس اتمی را بیان می‌کند (شکل ۱ ملاحظه شود).

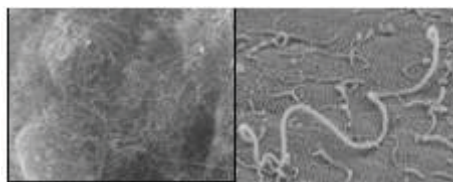
---

1- Scanning Electronic Microscopy(SEM)  
2- Transmission Electron Microscopy(TEM)

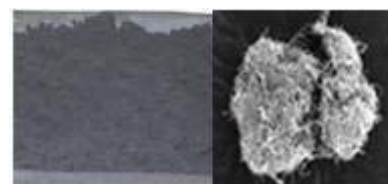




پ- تفکیک در مقیاس اتمی



ب- مزوسکوپی (منفرد)



الف- ماکروسکوپی (انبوهه)

یادآوری ۲ - مرجع [۳] ملاحظه شود.

یادآوری ۳ - حق انتشار © 2010ACS.

### شکل ۱- شکل MWCNTs در مقیاس‌های متفاوت

۲-۱-۲

شکل منظم

خاصیتی که در آن MWCNTs دارای الگوی منظم در طول محور لوله است.

یادآوری - همبستگی‌ها در جهت مماس نشان دهنده شکل تکراری منظم در MWCNTs می‌باشد. نانولوله‌های کربنی چند جداره معمولاً به عنوان MWCNTs به شکل منظم طبقه‌بندی شده‌اند.

۳-۱-۲

شکل تصادفی

خاصیتی که در آن MWCNTs دارای نقاط ایستا یا دائمی خم‌شدگی می‌باشند که به شکل تصادفی (گوسی) در طول محور خود توزیع شده‌اند.

۴-۱-۲

**SBPL**

طول خم‌شدگی پایدار ایستا

$l_{sp}$

بیشینه طول بدون خم‌شدگی ایستا می‌باشد.

۵-۱-۲

طول کانتور<sup>۱</sup>

L

کل طول یک MWCNTs در طول محورش است.

۶-۱-۲

میانگین وزنی طول کانتور

$\bar{L}_w$

وزنی که به میانگین طول کانتور اختصاص داده‌اند.

۷-۱-۲

فاصله بین یک انتها تا انتهای دیگر (فاصله بین دو انتها)

R

فاصله مستقیم بین دو انتهای یک MWCNT است.

۸-۱-۲

نسبت خم شدگی

$D_b$

نسبت متوسط مربع فاصله دو انتها به مربع طول کانتور است.

۹-۱-۲

گرانروی ذاتی

[7]

سهم توزیع MWCNT's در گرانروی پخش آن است.

## ۲-۲ اختصارات

CVD رسوب دهی شیمیایی بخار

DDLS پراکندگی نور پویای غیر قطبی

DLS پراکندگی نور پویا

DMF دی متیل فرمامید

SEM میکروسکوپ الکترونی روبشی

SBPL طول خم شدگی پایدار ایستا

TEM میکروسکوپ الکترونی عبوری

## ۳ روش های آماده سازی نمونه

### ۳-۱ آسیاب کردن

مقدار ۲۰۰ میلی گرم از MWCNTs و ۲۰ میلی لیتر اتانول و گوی‌های از جنس زیرکونیوم را در ظرفی از جنس زیرکونیوم (۱۵۰ میلی لیتری) قرار داده و به مدت ۲ ساعت با سرعت ۵۰۰ دور بر دقیقه با روش آسیاب گلوله‌ای خرد نمایید. نانولوله‌های کربنی چند جداره پخش شده MWCNT در اثر آسیاب گلوله‌ای با ظرف زیرکونیومی را درون لوله دستگاه گریز از مرکز مخروطی شکل ۵۰ میلی لیتری ریخته و با سرعت ۵۰۰۰ دور بر دقیقه سانتریفیوژ نمایید تا MWCNTs جداسازی شده و سپس آن را به مدت ۲۴ ساعت به روش خشک کردن انجمادی خشک نمایید<sup>۱</sup>. نانولوله‌های کربنی چند جداره را در حرارت  $300^{\circ}\text{C}$  به مدت ۳۰ دقیقه خشک کنید و سپس در معرض هوا قرار دهید تا ترکیبات فرار ناخواسته حذف شود. نانولوله‌های کربنی چند جداره خشک توسط آسیاب دستی، آسیاب شود.

**یادآوری-** در مواردی که سرعت و زمان آسیاب گلوله‌ای بیشتر از مقادیر اعلام شده در فوق باشد، ساختار MWCNTs ممکن است از بین برود.

### ۳-۲ روش پخش

مقدار ۰/۰۲ گرم از MWCNTs آسیابی را در ۲۰۰ میلی لیتر دی متیل فرمامید (DMF) توسط یک دستگاه فراصوت با توان خروجی ۴۰ وات به مدت ۳ ساعت پخش کنید. پخش MWCNTs را درون لوله دستگاه گریز از مرکز مخروطی شکل ۵۰ میلی لیتری ریخته و با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۳۰ دقیقه سانتریفیوژ نمایید. محلول را از کاغذ صافی جهت جدا سازی قسمت هایی که پخش نشده باقیمانده‌اند عبور دهید .

**یادآوری-** حلال DMF بهترین حلال برای پخش CNT می‌باشد ( مرجع [۳] ملاحظه شود).

### ۳-۳ آماده سازی نمونه برای میکروسکوپ الکترونی روبشی

از محلول DMF بیشتر برای ده برابر رقیق کردن MWCNT پخش شده استفاده کنید. یک میلی لیتر از محلولی که ده برابر رقیق شده را بر روی صافی سرامیکی ۰/۰۲ میکرومتری بریزید و تحت شرایط خلاء آن را صاف نمایید. صافی سرامیکی حاوی MWCNTs را در ۶۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت خشک کنید.

---

<sup>۱</sup> Freeze drying خشک کردن انجمادی ، در این روش ابتدا مواد در خلاء منجمد شده، سپس در اتمسفر خلاء کلیه حلال‌های انجماد یافته تصعید می‌گردد.

یادآوری - این دستورالعمل برای روش ۱ ( بند ۴-۱-۲-۱ ملاحظه شود) و روش ۳ ( بند ۴-۱-۲-۳ ملاحظه شود) توصیه می‌شود.

برای روش ۲ می‌توان از نمونه های MWCNTs "تازه تهیه شده"<sup>۱</sup> استفاده کرد.

#### ۴ دستورالعمل آزمایشگاهی

##### ۴-۱ اندازه گیری SBPL با استفاده از SEM

###### SEM ۱-۱-۴

###### ۴-۱-۱-۱ کلیات

تصاویر SEM با تفکیک بالا بررسی ویژگی‌هایی را که خیلی نزدیک به یکدیگر می باشند در بزرگنمایی های بالا امکان پذیر می سازد.

###### ۴-۱-۱-۲ آماده سازی تصاویر SEM

صافی سرامیکی حاوی MWCNTs را به تکه‌های کوچک بریده و بر روی نگهدارنده نمونه که روی آن نوار رسانا است قرار دهید. نگهدارنده نمونه را تحت خلاء در  $40^{\circ}C$  به مدت یک ساعت خشک کنید. نمونه خشک شده را با ایرادیوم<sup>۲</sup> یک دقیقه پوشش دهید. اگر ایرادیوم موجود نبود از طلا یا پلاتین به عنوان پوشش می‌توان استفاده کرد. سه یا بیش از سه تصویر SEM در بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر گرفته شود. سه یا بیش از سه تصویر در تفکیک بالاتر، ۲۰۰۰۰ برابر گرفته شود.

یادآوری ۱ - این دستورالعمل برای روش ۱ ( بند ۴-۱-۲-۱ ملاحظه شود) و روش ۳ ( بند ۴-۱-۲-۳ ملاحظه شود) توصیه شده است.

روش جایگزین دیگر نمونه "تازه تهیه شده" MWCNT را روی نگهدارنده نمونه که روی آن نوار رسانا است قرار دهید.

نگهدارنده نمونه را تحت خلاء در  $40^{\circ}C$  به مدت یک ساعت خشک کنید. نمونه خشک شده را با ایرادیوم به مدت یک دقیقه پوشش دهید. اگر ایرادیوم موجود نبود از طلا یا پلاتین به عنوان پوشش می‌توان استفاده کرد. سه یا بیش از سه تصویر SEM در بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر گرفته شود. سه یا بیش از سه تصویر با تفکیک بالاتر، ۲۰۰۰۰ برابر گرفته شود.

یادآوری ۲ - این دستورالعمل برای روش ۲ ( بند ۴-۱-۲-۲ ملاحظه شود) توصیه می‌شود.

---

1- As synthesized  
2- Iridium

#### ۱-۲-۴ روش های اندازه گیری SBPL

##### ۱-۲-۱-۴ روش ۱

از تصاویر SEM، طول های کانتور و فاصله بین دو انتها را برای حد اقل ۱۰۰ MWCNTs جداگانه (منفرد) تعیین کنید. داده های به دست آمده را در بازه های ۱۰۰ نانومتری طول کانتور دسته بندی نمایید. برای هر طیف طول کانتور، متوسط مربع فاصله دو انتها را محاسبه کنید نسبت خم شدگی برای هر دامنه طول کانتور را با تقسیم متوسط مربع فاصله دو انتها به مربع طول متوسط کانتور به دست آورید. معادله الف-۳ (ملاحظه شود). در مواردی که طول کانتور بزرگتر از یک میکرو متر است، مقدار طول کانتور در تصویری که از نمای بالا برداشته شده ممکن است ۱۵ درصد انحراف داشته باشد. در مواردی که تخمین دقیق تری لازم باشد مقدار فاصله دو انتها و طول کانتور را با تصویر سه بعدی اندازه گیری کنید. این تصویر را می توان به وسیله تصویرهای برداشته شده از چند جهت به دست آورد. نمودار نسبت خم شدگی را بر حسب معکوس طول کانتور رسم کنید. شیب خط را به دست آورید. از شیب خط، SBPL را با استفاده از معادله الف-۴ تعیین کنید. وقتی که در این نمودار رابط خطی بین نسبت خم شدگی معکوس طول کانتور به حد مجانب رسید، شیب حاصل دو برابر مقدار SBPL می باشد.

**یادآوری ۱-** برای MWCNTs که شکل تصادفی دارند، فاصله دو انتها در طول کانتور ثابت تغییر می کند. بنابراین مقادیر متفاوت فاصله دو انتها را می توان برای هر دامنه طول کانتور اندازه گیری کرد. توزیع فاصله بین دو انتها MWCNT برای هر دامنه طول کانتور گوسی است زمانی که MWCNT تصادفی هستند. برای به دست آوردن متوسط مربع فاصله دو انتها، متوسط مقدار مربع فاصله دو انتها را محاسبه کنید.

**یادآوری ۲-** به دلیل اینکه MWCNTs خوب پخش شده قبل از تصویر برداری SEM فیلتر می شوند، تعداد ۱۰۰ عدد MWCNTs بیانگر خوبی از شکل MWCNTs در نمونه می باشد. این ادعا با اندازه گیری های پراکندگی نور پویا (DLS) و پراکندگی نور پویای غیر قطبی و اندازه گیری گرانروی ذاتی تأیید شده است. مقدار تقریبی SBPL را می توان با استفاده از روش ۲ یا ۳ به دست آورد.

##### ۱-۲-۱-۴ روش ۲

از تصاویر SEM، شعاع انحنا حداقل ۱۰۰ لوله MWCNTs نمونه "تازه تهیه شده" را اندازه بگیرید سپس متوسط شعاع انحنا را محاسبه کنید. متوسط شعاع تقریباً برابر مقدار SBPL می باشد.

##### ۱-۲-۱-۴ روش ۳

از میان تصاویر SEM، حداقل ده MWCNTs با طول کانتور در محدوده  $2 \pm 0.2$  میکرومتر را انتخاب کنید. فاصله دو انتهای هر MWCNTs را اندازه بگیرید. مقدار تقریبی SBPL را می توان از متوسط مربع فاصله دو انتها و مربع متوسط طول کانتور به دست آورد (روابط الف-۳ و الف-۴ ملاحظه شود).

یادآوری ۱ - روش ۱ دقیق‌ترین روش است اما این روش زمان‌بر می‌باشد. مقدار SBPL که با روش ۲ تخمین زده شده است تا ۲۰ درصد با مقادیر تخمینی روش ۱ انحراف دارد ( روش ۲ مقادیر SBPL را کمتر از مقادیر واقعی نشان می‌دهد). مقدار SBPL که با روش ۳ تخمین زده شده است تا ۱۰۰ درصد با مقادیر تخمینی روش ۱ انحراف دارد.

مرتبه بزرگی SBPL بر موارد کاربردی مانند فیلم رسانا شفاف، الکتروود و چندسازه‌های پلیمری تاثیر گذار است.

یادآوری ۲- مقادیر عددی SBPL که با روش ۱، ۲ و ۳ به دست آمده را می‌توان با روش گرانروی سنجی ( پیوست ب ) و / یا روش پراکندگی نور ( پیوست پ ) تایید کرد.

#### ۴-۲ اندازه گیری قطر داخلی و خارجی MWCNTs با استفاده از TEM

قطره‌ای رقیق شده از پخش MWCNTs/ DMF پخش شده را بر روی شبکه مسی که با کربن پوشش‌دار شده قرار دهید. شبکه را در  $60^{\circ} C$  به مدت ۲۴ ساعت خشک کنید. تصاویر TEM در بزرگنمایی ۱۰۰۰۰ برابر گرفته شود. سه یا بیش از سه تصویر در تفکیک بالاتر در بزرگنمایی ۱۰۰۰۰۰۰ برابر تا ۳۰۰۰۰۰۰ برابر از MWCNT گرفته شود.

به منظور به دست آوردن میانگین‌ها، قطر داخلی و خارجی در حداقل سه موقعیت متفاوت و در طول محور برای حداقل ده MWCNTs متفاوت اندازه‌گیری می‌شود. حداقل ۳۰ اندازه‌گیری کلی لازم است.

## ۵ گزارش آزمون

گزارش آزمون باید شامل اطلاعات زیر باشد ( پیوست ت ملاحظه شود) :

الف- توصیف کامل از روش(های) استفاده شده برای آماده سازی نمونه؛

ب- میانگین قطر داخلی و خارجی؛

پ- روش مورد استفاده برای تعیین SBPL؛

ت - SBPL؛

ث- تمام اطلاعات لازم برای ارزیابی SBPL؛

گزارش آزمون ممکن است شامل اطلاعاتی مربوط به طول میانگین وزنی کانتور و نسبت خم‌شدگی ( اختیاری) باشد.

پیوست الف  
(اطلاعاتی)

روابط برای اصطلاحات و تعاریف در بند ۲ و پیوست های ب، پ و ت

الف-۱ روابط برای واژه‌ها و تعاریف در بند ۲

الف ۱-۱

SBPL

طول خم شدگی پایدار ایستا

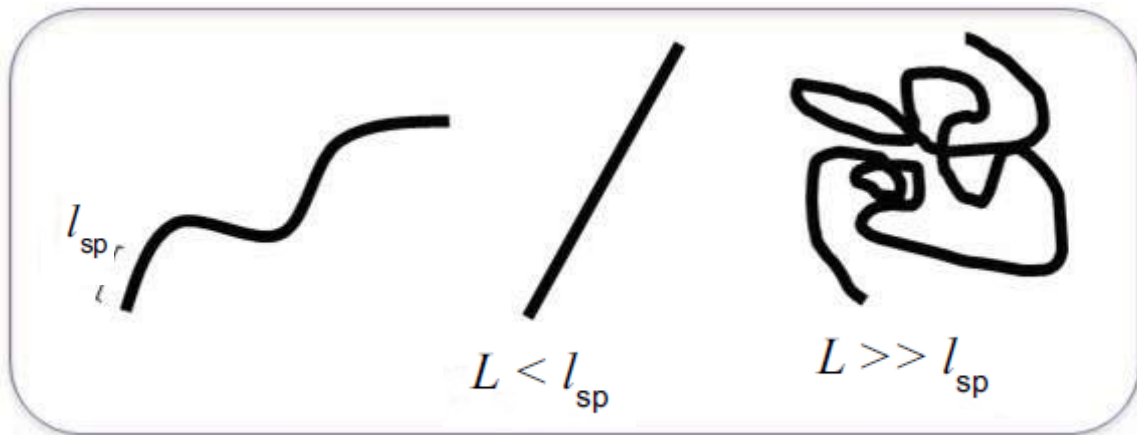
$l_{sp}$

بیشینه طول بدون خم‌شدگی ایستا می‌باشد.

اندازه کلی MWCNTs با شکل تصادفی برابر با مربع ریشه طول کانتور ( $l$ ) آن است و این اندازه برای مواردی که  $L \gg l_{sp}$  باشد طبق رابطه ی (۱) بیان شده است.

$$\langle R^2 \rangle = 2l_{sp}L + 2l_{sp}(e^{-L/l_{sp}} - 1) \quad (1)$$

$l_{sp}$  همان SBPL است. واژه های زیر برای MWCNTs تصادفی معتبر است.



شکل الف-۱ SBPL یک MWCNT

الف ۲-۱

نسبت خم‌شدگی

$D_b$

نسبت متوسط مربع فاصله دو انتها به مربع طول کانتور است.

نسبت خم‌شدگی،  $D_b$  توسط تعداد نقاط خم شده و توزیع آن‌ها در طول محور MWCNT می‌باشد.

مقدار  $D_b$  طبق رابطه (۲) بیان شده است.

(۲)

$$D_b \equiv \frac{\langle R^2 \rangle}{L^2} \cong \sum_{i=1}^k \phi_i^2$$

که در آن:

$\phi_i = N_i / N$  ( هر تکه ،  $i$  ، متشکل از  $N_i$  تکه های واحد می باشد ) :  
 $N$  تعداد کل تکه های واحد در MWCNT ؛  
 $N_i$  تعداد تکه های واحد در تکه های جهت  $i$  ؛  
 $K=m+1$  ، که در این رابطه  $m$  تعداد خم های ایستا ؛  
 $\langle R^2 \rangle$  متوسط مربع فاصله ی دو انتها ؛  
 $L$  طول کانتور می باشد.

مقدار SBPL با رابطه (۳) تعریف شده است استفاده از SBPL بیشتر از نسبت خم شدگی معمول است چون SBPL به طول کانتور وابسته نیست و SBPL از یک حد مجانب به دست می آید.  
 مقدار  $2l_{sp}$  را از شیب خطی نمودار  $D_b$  بر حسب  $1/L$  می توان به دست آورد. در مواردی که طول کانتور به حد کافی بلند باشد، مقدار  $1/L$  به سمت صفر میل می کند.

$$D_b \equiv \frac{\langle R^2 \rangle}{L^2} \equiv \left( \frac{2l_{p0}}{L} \right) \left( \frac{1 + \cos(\theta)}{1 - \cos(\theta)} \right) = C \left( \frac{2l_{p0}}{L} \right) = \frac{2l_{sp}}{L} \quad (3)$$

که در آن:

$C$  ثابت است.

$\theta$  زاویه خم شدگی ایستا بین جهت  $(i+1)$  امین تکه و جهت محور  $i$  امین تکه وقتی  $i$  امین تکه و  $(i+1)$  امین کنار یکدیگر هستند،  $\theta$  ،  $90^\circ$  درجه است.

$l_{p0}$  طول یک تکه است، با فرض بر اینکه تکه ها در MWCNT دارای طول یکسان هستند.

الف -۱-۳ میانگین وزنی طول کانتور

$$\bar{L}_w$$

وزنی که به طول میانگین کانتور اختصاص داده اند.

یاد آوری- از طول میانگین وزنی کانتور  $\bar{L}_w$  رای ارزیابی مقدار SBPL از آنالیز آزمون های SEM، DLS و گرانروی سنجی استفاده می شود.

(۴)

$$\bar{L}_w \equiv \frac{\sum_{i=1}^N N_i L_i^2}{\sum_{i=1}^N N_i L_i}$$



که در آن:

$N$  تعداد کل MWCNT منفرد نانو اشیاء می باشد.

$N_i$  تعداد MWCNT که طول  $l_i$  دارند.

میانگین وزنی فاصله دو انتها  $\overline{R_w}$  را می توان با استفاده از دو رابطه ی (۲) و (۴) با یکدیگر که برای تخمین گرانروی ذاتی که در پیوست ب بررسی شده به دست آورد.

الف ۴-۱

گرانروی ذاتی

$[\eta]$

توصیف سهم توزیع MWCNT's بر گرانروی پخش MWCNT است.

گرانروی  $[\eta]$  طبق روابط (۵)، (۶) و (۷) تعریف شده است.

$$[\eta] = 2,20 \times 10^{21} \frac{f}{M_{aw}} \left\langle \overline{R_w}^2 \right\rangle^{3/2} \quad (5)$$

$$f = \left[ 1 + 0,926 \Delta (D_b)^{1/2} \right]^{-1} \quad (6)$$

$$\Delta = \ln \left( \frac{2l_{sp}}{D_o} \right) - 2,431 \quad (7)$$

الف-۲ روابط برای دیگر اصطلاحات و تعاریف

الف-۲-۱ بیشینه طول بدون خم شدگی پویا

$l_p$

بیشینه طولی که در اثر انرژی گرمایی خم نشده باقی مانده است.

در مواردی که MWCNTs پخش شده ، مقدار طول بدون خم شدگی بستگی به نوع حلال مصرفی دارد.

از رابطه کراتکی-پرود<sup>۱</sup> (۸) برای  $l_p$  استفاده شده است.

$$\left\langle R^2 \right\rangle = 2l_p L + 2l_p (e^{-L/l_p} - 1) \quad (8)$$

که در آن:

$\left\langle R^2 \right\rangle$  مقدار متوسط مربع فاصله ی دو انتها، که متوسط مقدار مربع فاصله دو انتها می باشد.

$L$  طول کانتور است، که طول کل یک MWCNT در امتداد محورش است.

## الف-۲-۲

طول ظاهری بدون خم شدگی

$$l_{ap}$$

مقدار طول بدون خم شدگی یک MWCNT بوسیله پخش نور پویا اندازه گیری شده است. در مواردی که MWCNT به صورت پخش شده در معرض انرژی گرمایی قرار گیرد، اندازه کلی و شکل آن تغییر می کند. طول ظاهری بدون تا شدگی  $l_{sp}$  توسط سهم SBPL،  $L_{sp}$  زاویه خم شدگی ایستا  $\theta$ ، و زاویه خم شدگی پویا،  $\Delta\theta$ ، طبق رابطه (۹) تعیین می شود.  $l_{ap}$  را می توان توسط DLS اندازه گیری نمود. (پیوست پ ملاحظه شود).

$$l_{ap} = l_{sp} \left( \frac{1 + \cos(\theta + \Delta\theta)}{1 - \cos(\theta + \Delta\theta)} \right) \left( \frac{1 - \cos(\theta)}{1 + \cos(\theta)} \right) \quad (9)$$

زاویه خمش پویا، تغییر در زاویه خمش بر اثر انرژی گرمایی می باشد. زاویه خمش پویا در دمای ملایم معمولاً کمتر از  $2^\circ$  می باشد. بنابراین این مقدار طول ظاهری بدون خمش را می توان به طور تقریبی از SBPL به دست آورد.

## الف-۲-۳

وزن مولکولی ظاهری

$$M_a$$

توصیف وزن مولکولی یک MWCNT با فرض اینکه هر MWCNT تکی یک مولکول است. وزن مولکولی ظاهری  $M_a$  طبق رابطه ی (۱۰) تعریف شده است :

$$M_a = \rho N_{avo} \left( \frac{\pi (\bar{D}_0^2 - \bar{D}_1^2) L}{4} \right) \quad (10)$$

که در آن:

$\rho$  وزن مخصوص لایه های گرافن یک MWCNT منفرد می باشد.

$N_{avo}$  عدد آواگادرو می باشد.

$\bar{D}_0$  میانگین قطر خارجی یک MWCNT می باشد.

$\bar{D}_1$  میانگین قطر داخلی یک MWCNT می باشد.

## الف-۲-۴

میانگین وزنی وزن مولکولی ظاهری

$$\bar{M}_{aw}$$

میانگین وزن مولکولی ظاهری که وزنی را به آن تخصیص داده اند.

میانگین وزنی وزن مولکولی ظاهری،  $\bar{M}_{aw}$ ، با رابطه (۱۱) تعریف شده است:

$$\bar{M}_{aw} \equiv \frac{\sum_{i=1}^N N_i M_{ai}^2}{\sum_{i=1}^N N_i M_{ai}}$$

(۱۱)

که در آن:

N تعداد کل MWCNTs منفرد می باشد.

$N_i$  تعداد MWCNTs است که دارای وزن مولکولی ظاهری  $M_{ai}$  می باشد.

$\bar{M}_{aw}$  در تخمین گرانروی ذاتی، که در پیوست ب مورد بررسی قرار گرفته، استفاده می شود.

الف-۲-۵

گرانروی نسبی

$$\eta_r$$

نسبت گرانروی یک پخش به گرانروی حلال استفاده شده می باشد.

گرانروی نسبی،  $\eta_r$ ، را می توان از نسبت بین زمان لازم برای عبور پخش MWCNT از موئینه

گرانروسنجی  $t_{MWCNT}$ ، به زمان لازم برای عبور DMF خالص از موئینه همان گرانروسنج،  $t_{DMF}$ ، تخمین

زد.

(۱۲)

$$\eta_r = \frac{t_{MWCNT}}{t_{DMF}}$$

الف-۲-۶

گرانروی ویژه

$$\eta_r$$

عدد یک را از نسبت گرانروی پخش به گرانروی حلال مصرفی کسر کنید.

گرانروی ویژه،  $\eta_s$ ، می توان از گرانروی نسبی با استفاده از رابطه (۱۳) به دست آورد.

$$\eta_s = \eta_r - 1 \quad (۱۳)$$

پیوست ب  
(اطلاعاتی)  
گرانروی سنجی

ب-۱ کلیات

گرانروی ذاتی، بخش MWCNT را می‌توان از میانگین وزنی مولکولی ظاهری،  $M_{aw}$ ، میانگین کانتور،  $\bar{L}_w$ ، SBPL، و  $L_{sp}$  به دست آورد. اگر مقدار معمولی از  $M_{aw}$  و  $L_{sp}$  وجود داشته باشد مقدار  $L_{sp}$  را از مقدار گرانروی ذاتی اندازه‌گیری شده می‌توان تخمین زد. نتایج به دست آمده از روش گرانروی سنجی می‌تواند مقادیر را SBPL که طبق روش ۴-۱-۲ اندازه‌گیری شده تایید کند.

ب-۲ فاکتور شکل مزوسکوپی از اندازه‌گیری گرانروی ذاتی

گرانروسنج را با حلال DMF سه بار شستشو دهید.

استفاده از گرانروسنجی که دارای قطر موئینگی ۰/۴۶ میلی متر باشد توصیه شده است. این قطر به این دلیل توصیه شده است که در قطرهای بیشتر تفکیک ناکافی است و در قطرهای کوچکتر انبوه‌های شدن MWCNT می‌تواند اتفاق بیفتد. مدت زمانی که طول می‌کشد حلال خالص بدون MWCNTs از موئینه گرانرو سنج عبور کند را اندازه بگیرید. با استفاده از حلال DMF بیشتر، MWCNT پخش شده (نحوه تهیه پخش در قسمت ۲-۳ ارائه شده است) را از ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۵ درصد وزنی رقیق کنید. مقداری MWCNT پخش و رقیق شده را در گرانرو سنج بریزید. مدت زمانی که طول می‌کشد که MWCNT پخش شده ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۵ درصد وزنی از موئین گرانروسنج عبور کند را اندازه بگیرید. گرانروی نسبی و ویژه MWCNT پخش شده را با استفاده از روابط (۱۲) و (۱۳) که در پیوست الف ارائه شده محاسبه کنید. گرانروی ویژه را به مقدار غلظت MWCNT تقسیم کنید. نموداری رسم کنید که محور y آن خارج قسمت نسبت گرانروی به مقدار غلظت MWCNT باشد. گرانروی ذاتی را با برونیابی خارج قسمت تا مقدار غلظت صفر MWCNT تعیین کنید.

از مقدار به دست آمده برای گرانروی ذاتی MWCNT پخش شده می‌توان مقدار SBPL را با استفاده از روابط (۵)، (۶) و (۷) که در پیوست الف ارائه شده است تخمین زد. این در صورتی است که میانگین وزن مولکولی ظاهری و میانگین فاصله دو انتها موجود باشد.

## پیوست پ

### (اطلاعاتی)

#### پراکندگی نور پویا و پراکندگی نور پویای غیر قطبی شده

##### پ-۱ کلیات

ضریب‌های نفوذ انتقالی و چرخشی MWCNTs را می‌توان با استفاده از پراکندگی نور پویا (DLS) و پراکندگی نور پویای غیر قطبی شده (DDLS) اندازه‌گیری کرد. ضریب‌های نفوذ را می‌توان طول پیوسته (بدون خم‌خوردگی) ظاهری،  $L_{ap}$ ، متوسط قطر خارجی MWCNT،  $\bar{D}_O$ ، میانگین وزنی طول کانتور  $\bar{L}_w$  تخمین زد.

روش پراکندگی نور، مقادیر SBPL را که از روش‌های اندازه‌گیری که در ۲-۱-۴ بیان شده را تأیید می‌کند.

##### پ-۲ فاکتور شکل مزوسکوپی از اندازه‌گیری پراکندگی نور

از روش DLS و DDLS برای اندازه‌گیری نفوذ انتقالی و چرخشی MWCNTs استفاده می‌شود. با استفاده از لیزر حالت جامدی پمپ شده (DPSSL) توانی حدود ۱۰۰ mW در  $\lambda_0 = 532$  نانو متر اعمال کنید.

یادآوری - اعمال توان بالاتر می‌تواند باعث افزایش دما در MWCNT بشود که مطلوب نیست.

از همبسته ساز خودکار<sup>۱</sup> دیجیتالی با ۲۵۶ کانال با زمان تاخیر حداقل ۴۸۰ نانو ثانیه برای محاسبه عملکرد زمان همبسته ساز خودکار فوتون‌های پخش شده استفاده کنید.

عملکرد همبسته ساز را در چند زاویه پخش از  $30^\circ$  تا  $90^\circ$  اندازه‌گیری کنید. قطب‌بنده کننده و ردیاب که هر کدام دارای نسبت تفکیک 1 : 100,000 به DLS اعمال کنید. سلول DLS باید در محدوده دامنه دمایی  $k$  تا ۲۷۸ تا ۳۹۳ قابلیت کنترل با دقت یک درجه کلین را داشته باشد. ضریب‌های نفوذ انتقالی و چرخشی را می‌توان از اولین ترکیب میانگین نرخ کاهش،  $\Gamma$ ، میدان الکتریکی همبسته ساز خودکار به دست آورد.

وقتی که نور برخوردی و ردیاب هر دو به طور عمودی جهت دار شوند، ضریب نفوذ انتقالی از شیب نمودار متوسط نرخ کاهش بر حسب مربع اندازه بردار پراکندگی به دست می‌آید.

$$q = 4\pi m \sin(\theta_s / 2) / \lambda_0$$

که در آن:

$n$  ضریب شکست پخش

$\theta_s$  زاویه پراکندگی

$\lambda_0$  طول موج نور فرودی در خلاء

به منظور اجتناب از یک اثر بر همکنش هیدرو دینامیک، پخش بسیار رقیقی از  $n_M L^3 = 0,5$  برای اندازه‌گیری DLS توصیه شده است که در آن  $n_M$  تعداد MWCNTs می‌باشد. میانگین نرخ کاهش،  $\Gamma$ ،

1- Autocorrelator

عملکرد میدان الکتریکی همبسته ساز خودکار را اندازه‌گیری کنید. می‌شود. ضریب نفوذ انتقالی،  $D_T$  با رابطه (۱) مشخص می‌شود.

$$\Gamma_{VW} = q^2 D_T \quad (1)$$

وقتی که نور فرودی عمودی است و آشکار ساز افقی است،  $\Gamma$  بر حسب  $\Gamma_{HV}$  بیان می‌شود. ضریب نفوذ چرخشی،  $D_R$  با رابطه (۲) مشخص می‌شود.

$$\Gamma_{HV} = q^2 D_T + 6D_R \quad (2)$$

سه فاکتور برای شکل و اندازه MWCNTs وجود دارد: میانگین قطر SBPL، و میانگین وزنی طول کانتور که مجهول است. در موردی که اطلاعات میانگین قطر از روشی مستقل به دست آمده، SBPL و میانگین وزنی طول کانتور را می‌توان از مقایسه رابطه (۳) و رابطه (۴) با داده تجربی به دست آورد. در پیوست ت، داده‌های تجربی با داده‌های محاسباتی مقایسه شده است.

$$D_T = \frac{kT}{3\pi\eta_s \bar{L}_w} \left[ 1 + \ln(2L_{ap}) - 2,431 + 1,843(N/2L_{ap})^{1/2} + 0,138(N/2L_{ap})^{-1/2} - 0,305(N/2L_{ap})^{-1} \right] \quad (3)$$

$$L_{ap} = l_{ap} / \bar{D}_O \quad \text{and} \quad N = \bar{L}_w / \bar{D}_O \quad (4)$$

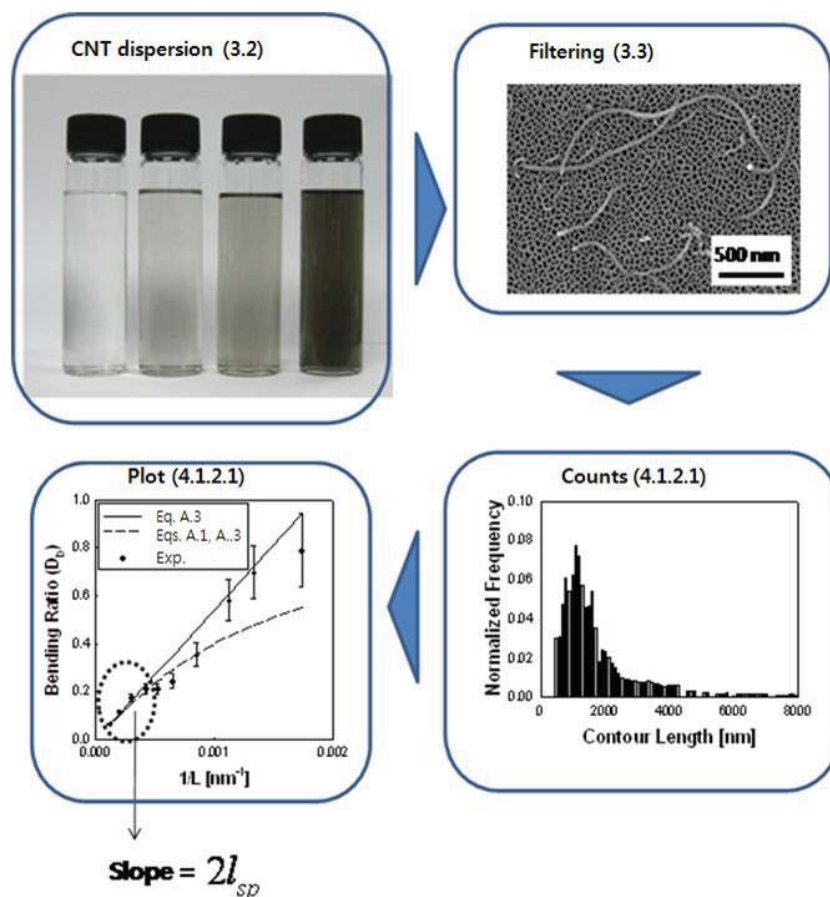
$$D_R = \left( \frac{kT}{\eta_s} \right) \left( \frac{2}{l_{ap} \bar{L}_w^2} \right) \left[ 0,253 \left( \frac{\bar{L}_w}{4l_{ap}} \right)^{1/2} + 0,59 \ln(2L_{ap}) - 0,227 \right]$$

مقدار SBPL ای که توسط DIS اندازه‌گیری شده است شکل میانگین MWCNTs در پخش را نشان می‌دهد.

## پیوست (اطلاعاتی)

### مطالعه موردی و گزارشها

خلاصه‌ای کوتاه از اندازه‌گیری SBPL با استفاده از روش ۱ در شکل ت-۱ نمایش داده شده است.



یادآوری ۱ - حق کپی (پ) ACS ۲۰۱۰

یادآوری ۲ - منبع این تصاویر از مرجع [۳] می‌باشد.

شکل ت-۱ جریان فرآیند برای اندازه‌گیری SBPL با استفاده از روش ۱ به صورت تصویری

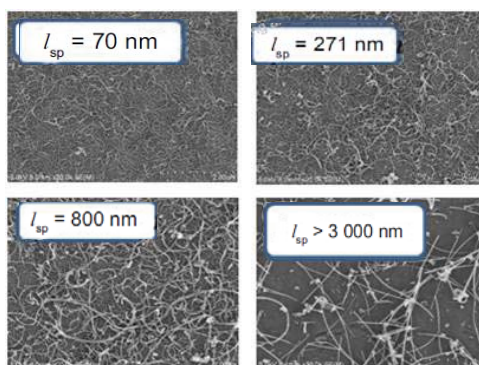
فاکتورهای شکل مزوسکوپی برای MWCNTs متفاوت را می‌توان همانند جدول ت-۱ گزارش نمود. توصیه شده که گزارش فاکتورهای شکل مزوسکوپی شامل میانگین قطر خارجی و  $l_{sp}$ ، SBPL، نیز ارائه شود. روش اندازه‌گیری برای ارزیابی  $l_{sp}$  باید گزارش شود. طول کانتور و نسبت خم‌شدگی به صورت اختیاری می‌تواند گزارش شود.

از آن جایی که مقدار  $l_{sp}$  دارای اهمیت فیزیکی است، توصیه شده است که مقادیر  $l_{sp}$  بیان شود به طور مثال به صورت  $A \times 10^B$ ، که در آن  $A$  و  $B$  اعدادی صحیح می‌باشند.

MWCNT 4	MWCNT 3	MWCNT 2	MWCNT 1	
۵۰	۳۵	۲۱	۹/۵	میانگین قطر خارجی الف nm
$> 3 \times 10^3$	$8 \times 10^2$	$3 \times 10^2$	$7 \times 10^1$	$I_{sp}$ به روش ۱ nm
$> 3 \times 10^3$	$7 \times 10^2$	$2 \times 10^2$	$6 \times 10^1$	$I_{sp}$ به روش ۲ nm
$> 3 \times 10^3$	$7 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3$	$2 \times 10^2 \sim 3 \times 10^2$	$7 \times 10^1 \sim 12 \times 10^1$	$I_{sp}$ به روش ۳ nm
۲۰۳۵	۲۰۴۵	۱۷۱۸	۱۴۱۶	طول کانطور $\bar{L}_w$
۱/۰۰	۰/۵۰	۰/۲۸	۰/۰۹	نسبت خمش $D_b$ میانگین
الف: میانگین حسابی ب: طبق رابطه (الف-۴)				

جدول ت-۱ نمونه مثالی از گزارش فاکتورهای شکل مزوسکوپی

تصاویر SEM برای چند نمونه مختلف MWCNTs در شکل ت-۲ نمایش داده شده است. شکل ت-۲ همین طور نشان می دهد که MWCNTs پیچ و خم دار SBPL کوتاهتری دارند.



یادآوری - شکل های MWCNTs توسط SBPL خیلی خوب مشخص شده اند.

شکل ت-۲ تصاویر SEM از MWCNTs گوناگون

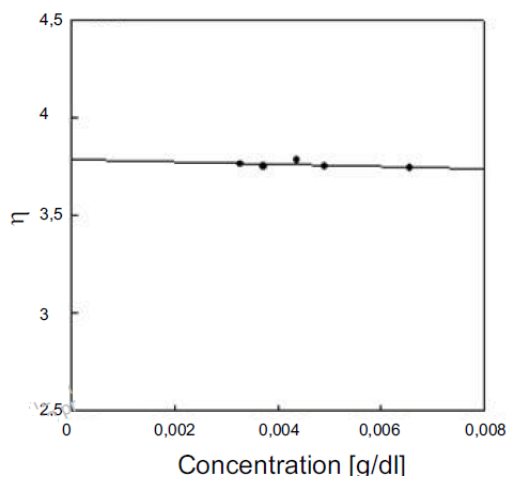
در این پیوست گرانروی ذاتی که از رابطه (۱) این پیوست محاسبه شده است با مقادیر گرانروی ذاتی که به طور آزمایشگاهی به دست آمده مقایسه شده است. در رابطه ۱ این پیوست از فاکتورهای شکل مزوسکوپی طبق آن چه در جدول ت-۱ استفاده شده است.



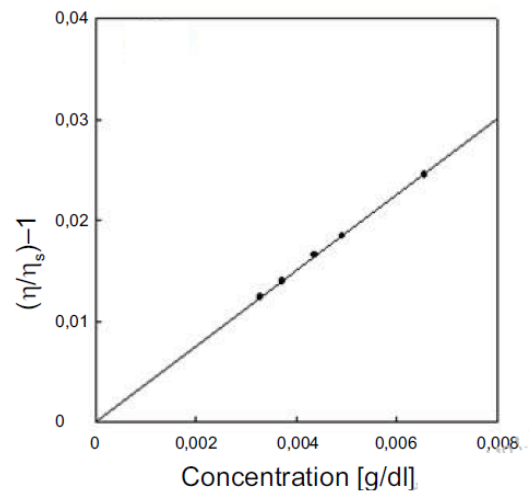
گرانروی ذاتی که از داده‌های آزمایشگاهی با استفاده رابطه (ت-۱) این پیوست به دست آمده در شکل ت-۳ نشان داده شده است.

$$[\eta] = \lim_{C \rightarrow 0} \frac{(\eta / \eta_s) - 1}{C} \quad (\text{ت-۱})$$

خط پر در شکل ت-۳ نشانگر نتایج محاسبه شده با استفاده از رابطه (۱) و استفاده از مقادیر فاکتور شکل در جدول ت-۱ می‌باشد. مقدار اندازه‌گیری شده گرانروی ذاتی برای MWCNT با نتایج محاسبه شده همخوانی دارد. این نتیجه نشانگر این امر می‌باشد که روش‌های مورد بحث در بند ۴ صحیح است.



ب- گرانروی ذاتی



الف- گرانروی ویژه

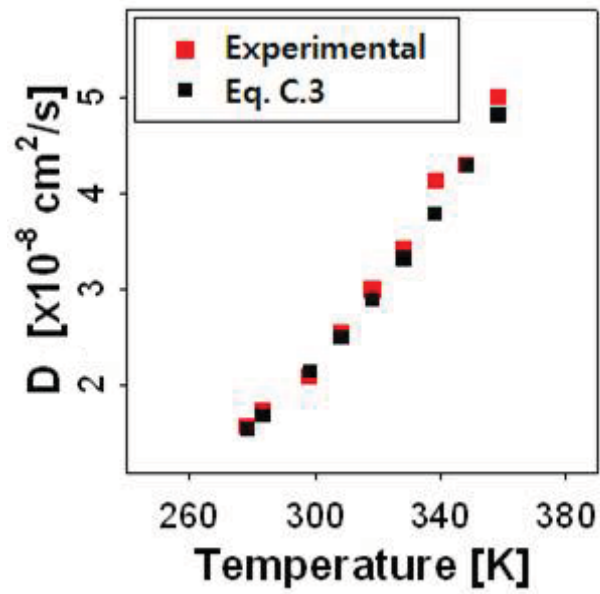
یادآوری ۱ - حق کپی ACS ۲۰۱۰

یادآوری ۲ - مرجع [۳] ملاحظه شود.

شکل ت-۳ گرانروی ویژه و گرانروی ذاتی MWCNT پخش شده

شکل ت-۴ نشان می‌دهد که مقدار ضریب نفوذ انتقالی MWCNT پخش شده با مقداری که با استفاده از رابطه (۳) محاسبه شده یکی است.

نتایج این تحقیق همچنین نشان می‌دهد که اندازه کلی (دو انتها) فاصله MWCNT با افزایش دما کاهش یافته، این کاهش به علت تغییرات گرمایی در نقاط خمش ایستا می‌باشد. اگر اثر تغییرات گرمایی در نظر گرفته نشود، اندازه میانگین MWCNT که از اندازه‌گیری DLS به دست آمده با اندازه‌ای که از مقادیر SEM (روش ۱ در بند ۴-۱-۲-۱) در سراسر طیف دمایی (که در شکل ۴-۱ نمایش داده شده در حد ۲۰ درصد متفاوت است). این نتیجه روش‌های ارائه شده در بند ۴ را اعتبار می‌بخشد.



یادآوری ۱ - حق کپی ACS ۲۰۱۰

یادآوری ۲ - مرجع [۴] ملاحظه شود.

شکل ت-۴ ضریب نفوذ انتقالی MWCNT پخش شده در دما های متفاوت

## کتابنامه

- [1] ISO/TR 12885, *Nanotechnologies — Health and safety practices in occupational settings relevant to nanotechnologies*
- [2] ISO/TS 80004-3, *Nanotechnologies — Vocabulary — Part 3: Carbon nano-objects*
- [3] LEE, H.S., YUN, C.H., KIM, H.M., LEE, C.J., “Persistence Length of Multiwalled Carbon Nanotubes with Static Bending,” *J. Phys. Chem. C* 111, 18882-18887 (2007)
- [4] LEE, H.S., YUN, C.H., “Translational and Rotational Diffusions of Multiwalled Carbon Nanotubes with Static Bending,” *J. Phys. Chem. C* 112, 10653-10658 (2008)
- [5] LEE, H.S., YUN, C.H., KIM, S.K., CHOI, J.H., LEE, C.J., JIN, H.J., LEE, H., PARK, S.J., PARK, M., “Percolation of Two-dimensional Multiwall Carbon Nanotube Networks,” *Appl. Phys. Lett.*, 95, 134104 (2009)
- [6] POLAND, C.A., DUFFIN, R., KINLOCH, I., MAYNARD, A., WALLACE, W.A.H., SEATON, A., STONE, V., BROWN, S., MACNEE, W., DONALDSON, K., “Carbon Nanotubes Introduced into the Abdominal Cavity of Mice Show Asbestoslike Pathogenicity in a Pilot Study,” *Nature Nanotechnology*, 3, 423, (2008)
- [7] POORTEMAN, M., TRAIANIDIS, M., BISTER, G., CAMBIER, F., “Colloidal Processing, Hot Pressing and Characterization of Electroconductive MWCNT-alumina Composites with Compositions near the Percolation Threshold,” *J. Eur. Cer. Soc.*, 29, 669 (2009)
- [8] DENG and XZHENG, “Interaction Models for Effective Thermal and Electric Conductivities of Carbon Nanotube Composites,” *Acta Mechanica Sinica*, 22, No1, (2009)
- [9] HOBBI, E.K., “Shear Rheology of Carbon Nanotube Suspensions,” *Rheol acta*, 49, 323 (2010)
- [10] JANG, H.S., LEE, H.-R., KIM, D.-H., “Field Emission Properties of Carbon Nanotubes with Different Morphologies,” *Thin Solid Films*, 500, 124 (2006)
- [11] BERNE, B., PECORA, R., *Dynamic Light Scattering*, Wiley, New York, 1976, Chapter 8