

تأثیر میزان نانوذرات بر روی پایداری و هدایت حرارتی نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی آرایش یافته با نانوذرات TiO_2

صدیقه عباسی^{۱*}، سید مجتبی زبرد^۲، سید حسین نوعی باغبان^۳، عباس یوسفی^۴

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۳- استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۴- مدیر عامل، موسسه تحقیقاتی پرتاووس، مشهد، ایران

*abasi_1362@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۸/۲۵، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۰/۱۸)

چکیده

هدف از این تحقیق، اتصال کووالانسی نانوذرات TiO_2 روی سطح نانولوله‌های کربنی و بررسی پایداری و هدایت حرارتی نانوسیال می‌باشد. نانولوله‌های آرایش یافته با میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) جهت اطمینان از اتصال نانوذرات TiO_2 و طیفسنجی رامان جهت بررسی تغییرات میزان گرافیت شدن مورد بررسی قرار گرفتند. پایداری نانوسیال به کمک پتانسیل زتا بررسی گردید. تصاویر TEM نشان دهنده اتصال نانوذرات TiO_2 روی سطح نانولوله‌ها می‌باشد. طیفسنجی رامان نشان دهنده افزایش میزان عیوب ایجاد شده در ساختار نانولوله با افزایش میزان نانوذرات متصل شده می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی پایداری نانوسیال نشان داد که با افزایش میزان نانوذرات متصل شده، پایداری نانوسیال کمتر می‌شود. همچنین نتایج بررسی‌ها نشان داد که دما و غلظت تأثیر معناداری بر روی میزان هدایت حرارتی نانوسیال دارند.

واژه‌های کلیدی:

نانولوله‌های کربنی، نانوسیال، نانوذرات TiO_2 ، پایداری، هدایت حرارتی

۱- مقدمه

میلی متر هستند، می‌شود [۲]. مخلوط سیال‌های دو فازی مرسوم به دلیل درشت تر بودن ذرات، باعث انسداد کانال‌های جریان می‌گردد. علاوه بر آن سرعت ته نشینی ذرات در آنها بالاتر بوده و افت فشار بیشتری را ایجاد می‌کنند. ولی حرکت براونی و برهم کنش‌های بین ذرات و سطح سبب کاهش این آثار در نانوسیال می‌گردد [۳].

ذرات معلق فوق ریز دانه به دلیل دارا بودن خواص انتقالی موثر پتانسیل بالایی در بهبود انتقال حرارت از نشان می‌دهند [۴]. مهم

نانوسیال‌ها از معلق ساختن نانوذراتی با اندازه متوسط کمتر از ۱۰۰ nm در سیال‌های انتقال دهنده حرارت مانند آب، روغن، اتیلن گلیکول و پروپیلن گلیکول ساخته می‌شوند. با توجه به اندازه بسیار کوچک این نانوذرات سوسپانسیون ایجاد شده تا اندازه‌ای پایدار است ولی در مواردی جهت پایداری بیشتر از مواد فعال کننده سطحی^۱ و یا پخش کننده^۲ استفاده می‌شود [۱]. ویژگی‌های منحصر به فرد نانوسیال‌ها سبب متمایز شدن این نوع سیال‌ها از مخلوط سیال‌های دو فازی که شامل ذرات در ابعاد میکرو یا

نانولوله، میزان افزایش هدایت حرارتی تا حدود ۳۸٪ گزارش شد.

در تحقیق انجام شده توسط چن^۵ و همکاران [۱۱]، تاثیر نوع نانولوله کربنی از جمله تک دیواره، دو دیواره و چند دیواره بر روی میزان هدایت حرارتی نانوسیال مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل نشان داد که در غلظت حجمی یکسان از نانولوله و دمای عملیاتی مشابه، نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی تک دیواره دارای بیشترین میزان هدایت حرارتی و نانوسیال حاوی نانولوله‌های چند دیواره دارای کمترین میزان هدایت حرارتی می‌باشند.

مطالعات انجام شده بر روی تاثیر استفاده از عامل پایدار کننده چیتوسان^۶ با غلظت‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ درصد وزنی بر روی میزان هدایت حرارتی نانوسیال حاوی ۰/۵ و ۳ درصد وزنی نانولوله کربنی نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیال به ترتیب به میزان ۲/۳٪ و ۱۳٪ افزایش می‌یابد [۱۲].

جا^۷ و همکاران [۱۳]، تاثیر نانولوله‌های اصلاح شده با نانوذرات Au، Ag، Pd را در سیال پایه آب و اتیلن گلیکول، بر روی میزان هدایت حرارتی مورد بررسی قرار دادند.

نتایج نشان داد با توجه به اینکه هدایت حرارتی نانوذرات به ترتیب در $Ag > Au > Pd$ است در هیبرید نانولوله نیز بیشترین هدایت حرارتی مربوط به Ag-MWCNT است. همچنین در صداهای حجمی یکسان از هر نانوذره میزان هدایت حرارتی در نانوسیال آب از اتیلن گلیکول بیشتر است که این امر به دلیل سهولت انتقال انرژی حرارتی در آب نسبت به اتیلن گلیکول می‌باشد.

با توجه به خاصیت تجمع‌ی نانولوله‌های کربنی، استفاده از آسیاب گلوله‌ای سبب برش نانولوله به قطعات کوچکتر می‌شود. مطالعات انجام شده در زمینه تاثیر دما و زمان آسیاب گلوله‌ای بر روی میزان هدایت حرارتی نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی نشان می‌دهد که با افزایش دما میزان هدایت حرارتی افزایش می‌یابد ولی با افزایش زمان آسیا کاری هدایت حرارتی کاهش می‌یابد [۱۴].

ترین اثر مشاهده شده در نانو سیال‌ها، افزایش قابل توجه هدایت گرمایی حتی در غلظت‌های پایین می‌باشد.

خواص حرارتی نانوسیال تحت تاثیر عواملی از جمله درصد حجمی نانو ذرات، شکل، نوع و اندازه نانوذرات و همچنین نوع سیال پایه می‌باشد به طوریکه هدایت حرارتی نانوسیال ممکن است صدها برابر بزرگتر از هدایت حرارتی سیال پایه باشد [۵]. تاکنون بیشترین نانوذرات استفاده شده شامل نانوذرات فلزی مانند طلا، مس، آهن، نقره و الماس و همچنین نانوذرات اکسید فلزی مانند $[6]TiO_2$ ، $[7]Al_2O_3$ ، $[5]Fe_3O_4$ و $[8]CuO$ می‌باشد. نانولوله‌های کربنی به دلیل دارا بودن نسبت سطح به حجم زیاد و هدایت حرارتی ذاتی منحصر به فرد، قابلیت کاربرد در نانوسیال و افزایش میزان هدایت حرارتی نانوسیال را دارند.

مطالعات انجام شده در رابطه با تاثیر شکل نانوذرات TiO_2 به دو شکل میله‌ای و کروی، بر روی میزان هدایت حرارتی نانوسیال نشان داد که با تغییر شکل نانوذرات در سیال مشابه و درصد حجمی یکسان، میزان هدایت حرارتی نیز تغییر می‌کند به طوری که در صورت استفاده از TiO_2 میله‌ای و کروی به ترتیب افزایش هدایت حرارتی به میزان ۳۳٪ و ۳۰٪ است که این امر نشان دهنده تاثیر شکل نانوذرات بر روی هدایت حرارتی نانوسیال می‌باشد [۶].

نتیجه بررسی تاثیر درصد حجمی نانوذرات و دمای عملیاتی بر روی میزان هدایت حرارتی نانوسیال حاوی نانوذرات TiO_2 نشان داد که در محدوده غلظت حجمی ۰/۲ تا ۲ درصد و همچنین دمای عملیاتی ۱۵ تا ۳۵ درجه سانتیگراد، میزان هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش غلظت حجمی و دما افزایش می‌یابد [۹].

با توجه به ماهیت آب‌گریزی نانولوله‌های کربنی، جهت پراکندگی بهتر نانولوله در سیال می‌توان از انواع مختلف مواد فعال کننده سطحی استفاده نمود. در مطالعه انجام شده توسط اسائل^۳ و همکاران [۱۰]، مواد فعال کننده سطحی از جمله سدیم دو سولفات^۴ در نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی چند دیواره مورد استفاده قرار گرفت و در حضور ۰/۶٪ حجمی از

مورد عمل اختلاط قرار می‌گیرد. جهت ایجاد فرایند هسته زایی نانوذرات TiO_2 بر روی سطح خارجی نانولوله‌ها، دمای مخلوط به 80°C افزایش می‌یابد و به مدت ۳ ساعت در این دما و تحت عمل اختلاط قرار می‌گیرد. سپس مخلوط حاصل شده با استفاده از کاغذ صافی فیلتر و به مدت یک ساعت در دمای 80°C خشک می‌شود. در انتها، پودر خشک شده به مدت ۳ ساعت در دمای 370°C در کوره کلسینه می‌گردد تا سنتز نانوذرات TiO_2 کامل شود.

نحوه آرایش نانوذرات TiO_2 بر روی سطح نانولوله با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM, LEO 912 AB) ساخت آلمان مورد مطالعه قرار گرفت. جهت بررسی تغییرات میزان گرافیت شدن و همچنین میزان عیوب ایجاد شده در ساختار نانولوله آرایش یافته با درصد‌های مختلف نانوذرات TiO_2 ، آنالیز طیف سنجی رامان (Raman, TWIN ANODE) با استفاده از لیزری با طول موج 532 nm ، در محدوده 4200 cm^{-1} - 100 cm^{-1} و با دقت 4 cm^{-1} ساخت آلمان مورد استفاده گرفته است. جهت بررسی تغییرات میزان پایداری نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی آرایش یافته با درصد‌های متفاوت از نانوذرات TiO_2 (۳۴٪ و ۶۱٪)، پتانسیل زتا با استفاده از دستگاه (Malvern) DLS مدل Nano ZS (red badge) ZEN 3600، ساخت انگلستان انجام شد. تغییرات میزان هدایت حرارتی نانوسیال در محدوده دمایی 70°C - 25°C و غلظت $1/5$ - $0/25$ درصد وزنی با استفاده از دستگاه KD2 Pro که مجهز به یک حمام آب گرم (Thermo) (Haake K10 TT4310) جهت ثابت نگه داشتن دما و همچنین سیرکولاسیون آب حول ظرف دوجداره که حاوی نمونه است، می‌باشد. آنالیز آماری جهت بررسی تأثیر پارامترهای دما و غلظت بر روی میزان هدایت حرارتی نانوسیال با استفاده از نرم افزار Mstac (Ver 1.42) انجام شد.

۳- نتایج و بحث

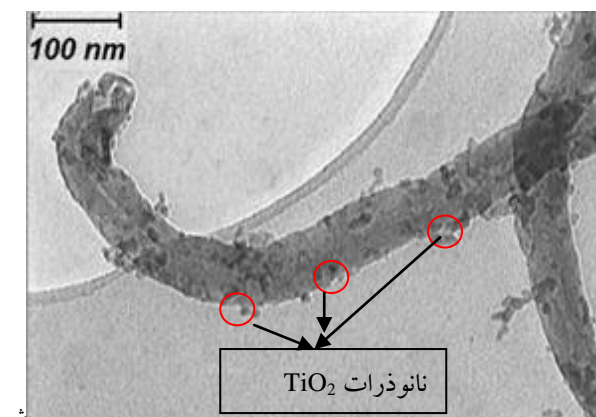
۳-۱- آرایش نانولوله کربنی با نانوذرات TiO_2

با وجود مطالعات متعددی که در زمینه هدایت حرارتی نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی انجام شده، ولی تغییرات میزان هدایت حرارتی نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی آرایش یافته با نانوذرات TiO_2 هنوز مورد بررسی قرار نگرفته است. بنابراین هدف اصلی از انجام این بررسی، مطالعه تأثیر میزان نانوذرات TiO_2 متصل شده به سطح خارجی نانولوله‌های کربنی بر روی تغییرات میزان پایداری و هدایت حرارتی حاصل شده می‌باشد.

۲- روش تحقیق

سنتز نانولوله‌های کربنی آرایش یافته با نانوذرات TiO_2 با استفاده از فرایند دو مرحله‌ای انجام شد که شامل اکسیداسیون نانولوله کربنی چند دیواره (MWCNT، خلوص ۹۶٪، قطر 60 nm - 40 nm ، طول $5\text{ }\mu\text{m}$ - $15\text{ }\mu\text{m}$) در اسیدنیتریک (HNO_3 ، ۶۵٪) و اتصال نانوذرات TiO_2 بر روی سطح خارجی نانولوله‌های اکسید شده با استفاده از فرایند هیدرولیز تتراکلرید تیتانیوم (TiCl_4 ، خلوص ۹۹٪) می‌باشد. جهت انجام فرایند اکسیداسیون، $0/1$ گرم از نانولوله خام را در 50 میلی لیتر اسید نیتریک پراکنده نموده و سپس به مدت ۲ ساعت در حمام اولتراسونیک و ۲ ساعت بر روی همزن مغناطیسی با سرعت بالا مورد اختلاط قرار گرفت [۱۵]. در نهایت نانولوله‌های اکسید شده را از کاغذ صافی عبور داده و آنقدر با آب مقطر شستشو داده تا آب خروجی از فیلتر خنثی شود و نانولوله‌های خنثی شده‌ای که بر روی فیلتر باقی مانده است به مدت یک شبانه روز در آون با دمای 90°C خشک می‌شود. جهت سنتز نانوذرات TiO_2 بر روی سطح خارجی نانولوله‌های اکسید شده، 1 میلی لیتر اسید کلریدریک (HCl ، ۳۷٪) به 100 میلی لیتر آب مقطر که بر روی همزن مغناطیسی با دور بالا قرار دارد، اضافه می‌شود. حضور اسید کلریدریک سبب کنترل فرایند هیدرولیز می‌شود. سپس مقدار معینی از تتراکلرید تیتانیوم (با تغییر میزان TiCl_4 دو نوع هیبرید شامل ۳۴٪ و ۶۱٪ نانوذرات TiO_2 سنتز می‌شود) به آب مقطر حاوی اسید کلریدریک اضافه نموده و به مدت ۲ ساعت در حمام اولتراسونیک و ۲۲ ساعت بر روی همزن مغناطیسی با دور بالا

روی سطح خارجی نانولوله تحت تاثیر حجم $TiCl_4$ استفاده شده می‌باشد. بنابراین در صورت افزایش حجم $TiCl_4$ مصرفی، میزان یون تیتانیوم حاصل شده نیز افزایش می‌یابد که این امر سبب افزایش میزان نانوذرات متصل شده بر روی سطح نانولوله‌های کربنی می‌باشد. میزان نانوذرات TiO_2 متصل شده بر روی سطح نانولوله‌های کربنی به کمک آنالیز TGA محاسبه می‌شود (نتایج در این مقاله ذکر نشده است).



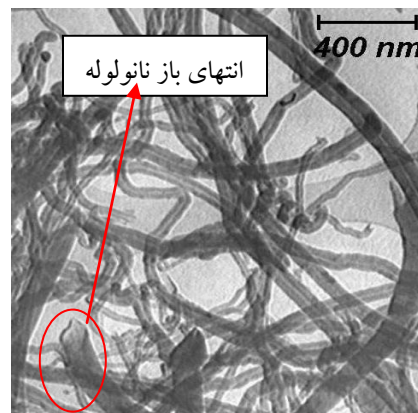
کل (۲): تصویر تهیه شده توسط TEM از نانولوله کربنی آرایش یافته با نانوذرات TiO_2 .

۳-۲- آنالیز طیف سنجی رامان

شکل (۳) طیف سنجی رامان نانولوله کربنی آرایش یافته با نانوذرات TiO_2 را نشان می‌دهد. در طیف سنجی رامان، مواد کربنی غیر کریستالی دارای یک پیک مشخصه در محدوده طول موج $1350-1360\text{ cm}^{-1}$ می‌باشند که به عنوان D-band در نظر گرفته می‌شود و به ساختار کریستالی نامنظم و یا هیبریداسیون sp^3 کربن در نانولوله نسبت داده می‌شود.

در حالی که ساختار کریستالی منظم گرافیت دارای یک پیک مشخصه در محدوده طول موج $1580-1600\text{ cm}^{-1}$ می‌باشند که مربوط به G-band و یا هیبریداسیون sp^2 اتم‌های کربن ($C=C$) در ساختار نانولوله کربنی است. بنابراین میزان I_D/I_G به عنوان گرافیت شدن مواد کربنی بیان می‌شود بطوریکه با کاهش این نسبت، ساختار کریستالی منظم گرافیت و یا هیبریداسیون sp^2 نانولوله (I_G) افزایش می‌یابد و در نتیجه میزان گرافیت شدن نانولوله کربنی افزایش و میزان عیوب موجود در ساختار نانولوله

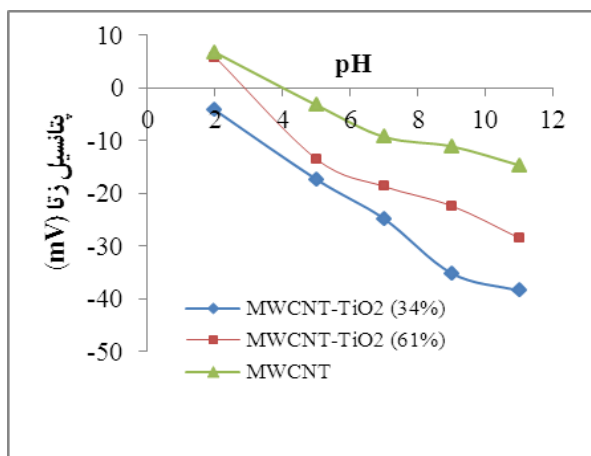
شکل (۱) تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانولوله‌های کربنی اکسید شده در اسید نیتریک را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که انتهای نانولوله‌های کربنی در اثر اکسیداسیون در اسید باز می‌شود.



شکل (۱): تصویر تهیه شده توسط TEM از نانولوله کربنی اکسید شده.

فرایند اکسیداسیون نانولوله‌های کربنی در اسید نیتریک سبب باز شدن انتهای نانولوله‌ها و همچنین اتصال گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار مانند هیدروکسیل (OH) و کربوکسیل (COOH) بر روی سطح خارجی نانولوله می‌شود. حضور این گروه‌های عاملی بر روی سطح نانولوله، همانند مکان‌های فعال جهت جذب یون‌های تیتانیوم حاصل از فرایند هیدرولیز $TiCl_4$ می‌باشد. در واقع پراکنده نمودن نانولوله‌های اسید شویی شده در آب مقطر سبب یونیزاسیون گروه‌های عاملی هیدروکسیل و ایجاد یون‌های COO^- می‌شود [۱۶]. جاذبه الکترواستاتیک بین یون‌های منفی تولید شده و یون‌های مثبت حاصل از هیدرولیز $TiCl_4$ سبب تولید هسته‌های اولیه نانوذرات TiO_2 می‌گردد [۱۷]. بنابراین پس از فرایند کلسینه نمودن نانولوله‌های آرایش یافته، نانوذرات کریستالی TiO_2 بر روی سطح خارجی نانولوله تشکیل می‌شود. شکل (۲) تصویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانولوله‌های آرایش یافته با نانوذرات TiO_2 را نشان می‌دهد. این شکل اتصال نانوذرات TiO_2 بر روی سطح خارجی نانولوله را تایید می‌نماید. میزان نانوذرات TiO_2 متصل شده بر

شکل (۴) تغییرات میزان پتانسیل زتای نانوسیال حاوی نانولوله کربنی خام و نانولوله کربنی آرایش یافته با درصد‌های متفاوت نانوذرات TiO_2 را به صورت تابعی از pH نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود برای نانولوله خام نقطه ایزوالکتریک در pH حدود ۵ رخ می‌دهد و بدلیل کمبود میزان بار سطحی روی نانولوله خام، مقادیر پتانسیل زتا کم و بنابراین پراکندگی در آب مشکل است زیرا در این حالت نیروهای جاذبه و اندروالس بین دیواره‌های نانولوله بر نیروهای دافعه غلبه نموده و سبب تجمع و ناپایداری ذرات می‌شود [۲۰]. همچنین در نانوسیال‌های حاوی نانولوله‌های کربنی آرایش یافته با نانوذرات TiO_2 با افزایش میزان pH مقادیر مطلق پتانسیل زتا افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش میزان نانوذرات TiO_2 متصل شده به سطح نانولوله، مقادیر مطلق پتانسیل زتا کاهش می‌یابد که این امر به دلیل کاهش میزان گروه‌های عاملی ایجاد شده روی سطح نانولوله پس از فرایند اسیدشویی می‌باشد زیرا نانوذرات TiO_2 به واسطه گروه‌های عاملی به سطح نانولوله متصل می‌شوند بنابراین با افزایش میزان نانوذرات TiO_2 روی سطح نانولوله میزان دانسیته بار سطحی روی نانولوله کاهش می‌یابد.

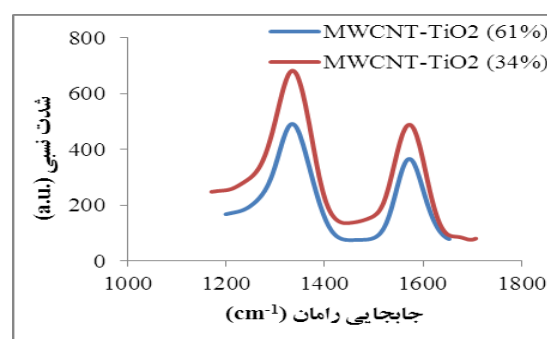


شکل (۴): تغییرات میزان پتانسیل زتای نانولوله‌های کربنی آرایش یافته با درصد‌های متفاوت از نانوذرات TiO_2 .

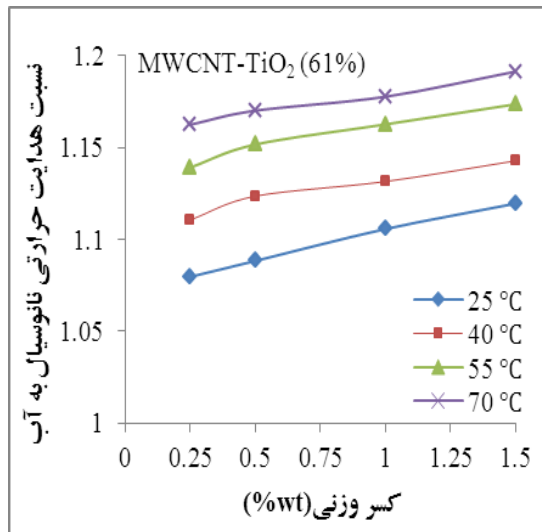
نیز کاهش می‌یابد با توجه به شکل (۳) مشاهده می‌شود که در نانولوله کربنی آرایش یافته که دارای ۳۴٪ نانوذره TiO_2 می‌باشد، شدت این دو پیک (I_D/I_G) که به عنوان خاصیت گرافیته شدن مواد کربنی بیان می‌شود برابر ۱/۳۴ می‌باشد. درحالی که برای نانولوله‌های کربنی آرایش یافته که دارای ۶۱٪ نانوذره TiO_2 می‌باشد، شدت این دو پیک (I_D/I_G) برابر ۱/۴۲ می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان نانوذرات متصل شده به سطح خارجی نانولوله، شدت این دو پیک نیز افزایش می‌یابد که این امر نشان دهنده کاهش ساختار کریستالی منظم گرافیت و یا هیبریداسیون sp^2 نانولوله (I_G) می‌باشد. کاهش ساختار کریستالی منظم گرافیت سبب افزایش ساختار کریستالی نامنظم و یا هیبریداسیون sp^3 کربن در ساختار نانولوله می‌شود. بنابراین با افزایش میزان نانوذره متصل شده به نانولوله میزان عیوب ایجاد شده در ساختار نانولوله افزایش می‌یابد و این نشان دهنده اتصال کولانسی نانوذرات بر روی سطح نانولوله می‌باشد که با نتایج ارائه شده توسط یاداو^۸ و همکارانش [۱۸]، تایید می‌شود.

۳-۳- تغییرات میزان پایداری نانوسیال

بررسی تغییرات میزان پتانسیل زتای ذرات نشان می‌دهد که ذراتی که دارای میزان پتانسیل زتای بیشتر از +۱۵ mV و کمتر از -۱۵ mV می‌باشند، دارای پایداری بیشتری در محلول‌های آبی بوده و تمایل کمتری به تجمع و انباشتگی دارند [۱۹].



شکل (۳): طیف رامان نانولوله کربنی آرایش یافته با درصد‌های متفاوت از نانوذرات TiO_2 .



شکل (۶): تغییرات نسبت هدایت حرارتی نانولوله کربنی آرایش یافته با نانوذرات TiO₂ (۶۱٪) به هدایت حرارتی آب.

۴- نتیجه گیری

- ۱- نانولوله‌های کربنی چنددیواره به طور موفقیت آمیزی با نانوذرات TiO₂ آرایش یافته اند.
- ۲- تغییر حجم ماده پیش ساز اولیه سبب تغییر میزان نانوذره متصل شده به سطح نانولوله می شود.
- ۳- افزایش میزان نانوذرات سبب افزایش میزان عیوب ساختاری در نانولوله می شود.
- ۴- افزایش میزان نانوذرات متصل شده به سطح خارجی نانولوله سبب کاهش میزان پایداری نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی آرایش یافته با نانوذرات TiO₂ می شود.
- ۵- با افزایش دما و درصد وزنی نانولوله‌های کربنی آرایش یافته، میزان هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می یابد.

۵- تشکر و قدردانی

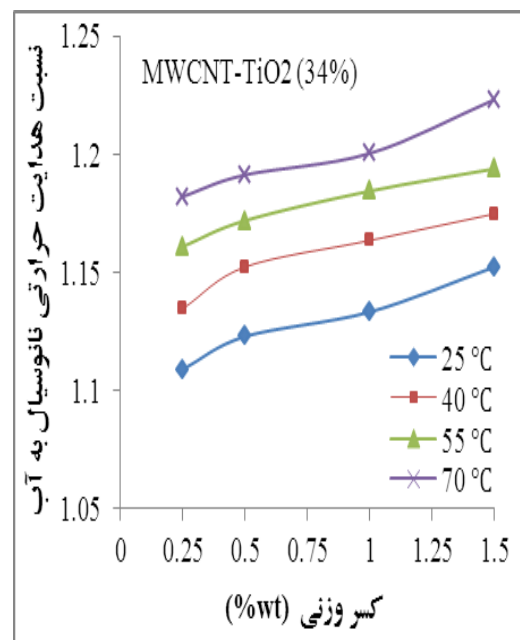
از سرکار خانم سعیدی مسئول آزمایشگاه موسسه تحقیقاتی پرطاووس تشکر و قدردانی می گردد.

۶- مراجع

- [1] K. P. Namburu, D. P. Kulkarani & D. Misra and D. K. Das, "Viscosity of copper oxide

۳-۴- تغییرات میزان هدایت حرارتی نانوسیال

شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب تغییرات نسبت هدایت حرارتی نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی آرایش یافته با نانوذرات TiO₂ که حاوی ۳۴٪ و ۶۱٪ نانوذره TiO₂ می باشد را به هدایت حرارتی نانوسیال پایه آب نشان می دهد. با توجه به شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می شود که با افزایش دما و درصد وزنی نانوذرات، میزان نسبت هدایت حرارتی هر دو نانوسیال نیز افزایش می یابد ولی واضح است که تاثیر دما بر روی افزایش میزان هدایت حرارتی از تاثیر درصد وزنی نانوذرات بسیار بیشتر است. زیرا با افزایش دما، پیوندهای هیدروژنی مولکول‌های آب ضعیف شده و ساختار مولکول‌های توده‌ای آب از بین می رود بنابراین تعداد مولکول‌های آزاد آب که حول نانولوله‌های کربنی آرایش می یابند، افزایش می یابد. این لایه مایع که به واسطه نیروهای واندروالس مولکول‌های آب و سطح شیمیایی نانولوله کربنی ایجاد می شود دارای هدایت حرارتی بالاتری نسبت به آب توده‌ای می باشد [۲۱].



شکل (۵): تغییرات نسبت هدایت حرارتی نانولوله کربنی آرایش یافته با نانوذرات TiO₂ (۳۴٪) به هدایت حرارتی آب.

- [12] T. X. Phuoc, M. Massoudi and R. H. Chen, "Viscosity and thermal conductivity of nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes stabilized by chitosan", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, pp. 12-18, 2011
- [13] N. Jha , S. Ramaprabhu, "Thermal conductivity studies of metal dispersed multiwalled carbon nanotubes in water and ethylene glycol based nanofluids", *Applied physics*, Vol. 106, p. 084314, 2009.
- [14] H. Xie , L. Chen, "Adjustable thermal conductivity in carbon nanotube nanofluids", *Physics Letters A*, Vol. 373, pp. 1861-1864, 2009.
- [15] S. Abbasi, S. M. Zebarjad and S. H. N. Baghban, "Decorating and Filling of Multi-Walled Carbon Nanotubes with TiO₂ Nanoparticles via Wet Chemical Method", *Engineering*, Vol. 5, pp. 207-212, 2013.
- [16] H. Hu, A. Yu, E. Kim, B. Zhao, M. E. Itkis, E. Bekyarova and R. C. Haddon, "Influence of the Zeta Potential on the Dispersability and Purification of Single-Walled Carbon Nanotubes", *J. Phys. Chem.*, Vol. 109, pp. 11520-11524, 2005.
- [17] C. Y. Hu, F. Y. Li, L. HU and R. B. Zhang, "A study concerning the pretreatment of CNTs and its influence on the performance of NiB/CNTs amorphous catalyst", *J. Serb. Chem. Soc*, Vol. 71, pp. 1153-1160, 2006.
- [18] S. K. Yadav, S. R. Madeshwaran and J. W. Cho, "Synthesis of a hybrid assembly composed of titanium dioxide nanoparticles and thin multi-walled carbon nanotubes using "click chemistry"", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 358, pp. 471-476, 2011.
- [19] C. Hai, H. Watanabe, F. Wang, T. Shirai and M. Takahashi, "Evaluation of surfactant-free stabilized vapor grown carbon fibers with zeta potential and Raman spectroscopy", *Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, Vol. 381, pp. 70-73, 2011.
- [20] Z. Talaie, A. R. Mahjoub, A. m. Rashidi, A. Amrollahi and M. E. Meibodi, "The effect of nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture", *Exp. Thermal Fluid science*, Vol. 32, pp. 397-402, 2007.
- [2] A. K. Singh, "Thermal Conductivity of Nanofluids", *Defence Science Journal*, Vol. 58, pp. 600-607, 2008.
- [3] S. K. Das, S. U. S. Choi and H. E. Patel, " Heat Transfer in Nanofluids- A Review", *Heat Transfer Engineering*, Vol. 27, pp. 3-19, 2006.
- [4] Y. Xuan , W. Roetzel, "Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 3701-3707, 2000.
- [5] M. Abareshi, E. Goharshadi, S. M. Zebarjad, H. K. Fadafan and A. Youssefi, "Fabrication, characterization and measurement of thermal conductivity of Fe₃O₄ nanofluids ," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol. 322, pp. 3895-3901, 2010.
- [6] S. M. S. Murshed, K. C. Leong and C. Yang, "Enhanced thermal conductivity of TiO₂-water based nanofluids", *Thermal Sciences*, Vol. 44, pp. 367-373, 2005.
- [7] H. Masuda, A. Ebata, K. Teramae and N. Hishinuma, "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles (dispersion of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ ultra-fine particles)", *Netsu Bussei*, Vol. 4, pp. 227-233, 1993.
- [8] L. P. Zhou , B. X. Wang, *Annu. Proc. Chin. Eng. Thermophys*, pp. 889-892, 2002.
- [9] W. Duangthongsuk , S. Wongwises, "An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of TiO₂-water nanofluids flowing under a turbulent flow regime", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 334-344, 2010.
- [10] M. J. Assael, C. F. Chen, I. N. Metaxa and W. A. Wakeham, "Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water", *Thermophysics* Vol. 25, pp. 971-985, 2004.
- [11] L. Chen , H. Xie" ,Surfactant-free nanofluids containing double- and single-walled carbon nanotubes functionalized by a wet-mechanochemical reaction", *Thermochemica Acta*, Vol. 497, pp. 67-71, 2010.

۷- پی نوشت

- [1] Surfactant
- [2] Dispersant
- [3] Assael
- [4] Sodium Dodecyl Sulfate
- [5] Chen
- [6] Chitosan
- [7] Jha
- [8] Yadav

functionalized group concentration on the stability and thermal conductivity of carbon nanotube fluid as heat transfer media", International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011.

- [21] S. M. S. Murshed, K. C. Leong and C Yang, "Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids- A critical review", Appl. review", Appl. Therm. Eng., Vol. 28, pp. 28, p. 2109-2125, 2008.