

# اهمیت نانوسیال‌های دارای نانولوله های کربنی اصلاح سطح شده در افزایش توان گرمایی مبدل های پوسته - لوله و صفحه ای

امین کاظمی بیدختی<sup>+</sup>\*

گروه مهندسی شیمی، دانشکده ی نفت و پتروشیمی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

**چکیده:** با توجه به ویژگی های یگانه نانولوله های کربنی و توانایی های نهفته آن‌ها به ویژه در ساختار یگانه و ویژگی های فیزیکی، شیمیایی و گرمایی آن‌ها، در این پژوهش تلاش شده که با ایجاد اصلاح سطحی به دو روش فیزیکی و شیمیایی و تغییر کنترل شده این ویژگی ها، برای استفاده ویژه از آن در صنایع مرتبط به ویژه نفت و گاز مورد بررسی و پژوهش قرار گیرد. با توجه به ساختار شبکه ای کربنی این نانوذره و ویژگی آب‌گریزی آن، از دو فناوری اکسیداسیون به عنوان یک روش شیمیایی و پگیلاسیون سطحی یا پلیمره کردن نانولوله توسط پلیمر پلی اتیلن گلاکول به عنوان یک روش فیزیکی برای تغییر ویژگی آب‌گریزی آن به آب‌دوست استفاده شده است. نتیجه‌ها بیانگر تغییر دلخواه این پارامترها در شرایط گوناگون هستند و از این جهت قابلیت توزیع بهینه آن را در محیط های آلی یا آبی و یا هر دو را فراهم می نماید. از داده های این بخش در شبیه سازی گرمایی نانوسیال‌های مرتبط با آن‌ها در دو مبدل پر کاربرد پوسته - لوله و صفحه ای بر اساس یک الگوی استاندارد طراحی مبدل ها، استفاده شده است. نتیجه‌ها بیانگر افزایش محسوس برداشت گرمایی با استفاده از این نانوسیال‌ها دارد. این نتیجه‌ها می‌تواند برای افزایش توان گرمایی سیال‌های فرایندی و همچنین برای افزایش راندمان مبدل‌های گرمایی موجود و در حال استفاده، مفید و کاربردی باشد.

**کلمات کلیدی:** نانولوله کربنی، نانوسیال، اصلاح سطحی، مبدل گرمایی پوسته - لوله، مبدل گرمایی صفحه ای

**KEYWORDS:** Carbon nanotube, Nanofluid, Surface modification, Shell and tube heat exchanger, Plate heat exchanger.

## مقدمه

گرمایی آن‌ها توانایی مناسبی در افزایش توان گرمایی نانوسیال‌ها دارند که از آن جمله می‌توان به نانوذرات مس و اکسید مس اشاره کرد [۴، ۵]. درباره سیال پایه مورد استفاده در نانوسیال‌ها نیز بسته به سیال آلی یا آبی بودن آن و کنش بین سیال و نانوذره مورد استفاده در آن حالت های متفاوتی به لحاظ عملیاتی ممکن می‌شود. در این زمینه، پژوهش‌ها بیانگر اثر گذاری چهار پارامتر اصلی در این بخش وجود دارد.

نانوسیال‌ها که به عنوان سوسپانسیون های دارای نانوذره‌های گوناگون در دو دهه اخیر مطرح شده اند دارای توانایی و پتانسیل های نهفته و نوین می‌باشند که در افزایش بهره وری سامانه‌های گوناگون بسیار کارآمد و تأثیر گذار می‌باشند [۱-۳]. با توجه به نوع نانوذره مورد استفاده و سیال پایه آن می‌توان انتظارهای متفاوتی به لحاظ فرایندی و عملیاتی از آن داشت. نانوذره‌های فلزی به دلیل شرایط فیزیکی و

\* عهده دار مکاتبات

+E-mail: a.kazemi@hsu.ac.ir

انجام شده ستر شده و اثر تفاوت گرمایی آن‌ها در دو نوع مبدل پوسته - لوله و صفحه ای، با پارامترهای گوناگون مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. همچنین به دلیل قیمت پایین تر، از نانولوله های چند دیواره به جای نانولوله های تک دیواره استفاده شده که ارزش اقتصادی طرح نیز در نظر گرفته شود. نتیجه ها بیانگر از بهبود محسوس شرایط گرمایی نانوسیال و همچنین توان مفید برداشت حرارت از مبدل های پوسته - لوله و صفحه ای دارد. با توجه به گستره عملیاتی مبدل های پوسته - لوله و صفحه ای در صنایع گوناگون و به ویژه نفت، گاز و پتروشیمی از یک سو و همچنین اهمیت بهره‌وری بیش‌تر انرژی از سامانه های گرمایی موجود از سوی دیگر، این نتیجه‌ها می‌تواند مفید و موثر واقع شود.

### بخش تجربی

#### مواد و دستگاهها

نانولوله های چنددیواره استفاده شده از شرکت US Research Nanomaterials آمریکا بوده که دارای خلوص بیش از ۹۵ درصد می باشد. قطر خارجی این نانولوله نیز ۲۰ تا ۳۰ نانومتر می باشد. پلی اتیلن گلايکول مورد استفاده نیز از شرکت کیمیاگران امروز با کد KEPEG4000 می باشد. در آزمایش TGA از دستگاه Shimadzu Model TGA-50 استفاده شده است. از سولفوریک اسید ۹۵درصد و نیتریک اسید ۷۰ درصد شرکت سیکما برای اصلاح سطحی نانولوله ها بهره گرفته شد. از حلال کلروفرم ۹۹/۵درصد شرکت مرک برای توزیع پلیمر استفاده شد. از صافی های قطر ۹۰ میلی متر شرکت واتمن برای صاف کردن نمونه های اسیدی استفاده شد.

#### آماده سازی نانوسیال

##### نانوسیال دارای نانولوله اکسیدی

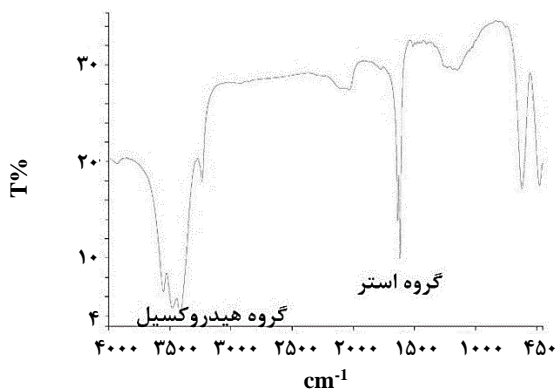
برای آماده سازی این نانوسیال، ابتدا نانولوله آماده شده و سپس به سیال آب افزوده شد. این روش بر اساس چند مرجع و تجربه های گذشته نویسنده اصلاح شده است [۲۱، ۲۲]. از این رو، نانولوله پس از وزن شدن دقیق به ظرف واکنش که یک بالن ۵۰۰ میلی لیتر می باشد افزوده شد. با استفاده از یک سامانه چگالشی که در آن جریان مناسبی از آب سرد برقرار است، امکان تبرید گاز حاصل از واکنش به وجود آمد. کل واکنش و دستگاهها مرتبط با آن سعی می شود در زیر هود بود تا از هرگونه خطر استنشاق گاز تولید شده از واکنش جلوگیری شود. با دقت مناسب نسبت حجمی دو به سه از نیتریک اسید و سولفوریک اسید به بالن افزوده شد و با استفاده از یک همزن مغناطیسی مخلوط درون

ایستمن و همکاران [۶] نشان دادند که حرکت های براونی، پدیده خوشه اس شدن نانوذره ها، اثر لایه ای شدن و اثر فونونی مکانیسم های اصلی تأثیر گذار می باشند. هر کدام از این مکانیسم ها بسته به شرایط سیال پایه، نانوذره موجود در آن و برهمکنش های بین آن ها باعث توزیع متفاوت نانوذره ها در سیال پایه و سرانجام پایداری آن می شوند [۹-۷]. در این میان نیز برخی نانوذره های آلی وجود دارند که با توجه به اهمیت و قابلیتشان، استفاده از آن ها در محیط های آبی، گریز ناپذیر می باشد. نانولوله های کربنی به عنوان یکی از این نانوذرات مطرح می باشد که اولین بار توسط ایجیما ارایه شد [۱۰]. این نانوذره ها که از شبکه منظم کربنی و به شکل لوله تشکیل شده اند، به طور معمول در انواع نانولوله های تک دیواره و چند دیواره طبقه بندی می شوند [۱۱]. با توجه به ساختار شبکه ای کربنی نانولوله ها، حالت آلی داشته و برای توزیع در محیط های آبی و به ویژه آب به عنوان سیال عامل اصلی گرمایی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی، مشکل توزیع یکنواخت و پایداری ساختاری را دارد [۱۲، ۱۳]. این ویژگی باعث محدود شدن امکان استفاده از آن به ویژه در محیط آب می شود. ولی این امکان با ایجاد برخی اصلاح های سطحی در سطح این نانوذره و ایجاد برخی گروه های آب دوست امکان پذیر می باشد. به طور معمول از روش های گوناگونی برای رفع این مشکل و توزیع مناسب آن در آب استفاده می شود. در این میان می توان با توجه به اهمیت برهم زدن یا نزدن ساختار یکپارچه نانولوله به روش های فیزیکی مانند استفاده از اتصال فیزیکی پلیمرهایی طولی مانند پلی استایرن سولفونات با سطح نانولوله [۱۴]، جذب فیزیکی پلیمرهای غیر بارداری مانند پلی وینیل پیرولیدین [۱۵] و یا جذب سطحی فعال کننده سطحی [۱۶] اشاره کرد. در روش شیمیایی از اتصال شیمیایی بین یک گروه یک سر آب دوست به سطح نانولوله مانند واکنش های کربوکسیلیک، استری و آمیدی [۱۸، ۱۷] استفاده می شود. روش غیر کووالانسی اگرچه ساختار اولیه نانولوله را تغییر نمی دهد ولی پیوندهایی با قدرت کم تر و ناپایدارتر را ایجاد می کند که در شرایطی که ماندگاری بیش تری از نانوسیال به مرور زمان در شرایط فرایندی لازم باشد کاربرد کم تری خواهد داشت [۱۹]. برای تغییرهای شیمیایی در سطح نانولوله عکس این حالت وجود دارد. به گونه ای که اگرچه ساختار یکنواخت نانولوله دچار تغییر می شود بنابراین پیوندهای کووالانسی تشکیل می شود که استحکام بیش تری داشته و همچنین تطابق ساختاری بهتری را می تواند با سیال پایه ایجاد نماید [۲۰].

در این پژوهش، سه نمونه نانوسیال یکی دارای نانولوله اکسید شده، یکی نانولوله پگیله شده<sup>۲</sup> و یکی نانولوله ای که هر دو فرایند بر روی آن

(۱) surfactants

(۲) PEGylated carbon nanotube



شکل ۱- طیف IR نانوله های اکسید شده.

### نانوسیال دارای نانولوله اکسیدی پگیله شده

فرآیندی همانند تهیه نانوسیال دارای نانولوله پگیله برای این نمونه ولی این بار با نانولوله اکسیدی که در مرحله پیش سنتز شده، در نظر گرفته شد. فرآورده نمونه‌ای است که این بار افزون بر پلیمرهای سطحی پیچیده شده دارای گروه های کربوکسیلیک آبدوست نیز می باشد.

### نتیجه‌ها و بحث

#### اکسیداسیون سطحی نانولوله

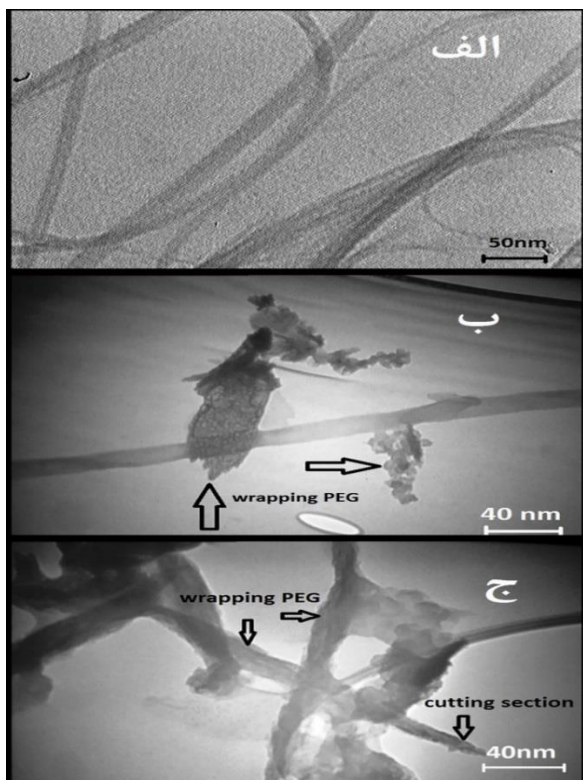
برای اطمینان از انجام اکسیداسیون موثر بر روی نانولوله های کربنی، از IR استفاده شد. شکل ۱ به روشنی تشکیل گروه کربوکسیل (گروه های هیدروکسیل و استر) را بر روی نانولوله نشان می دهد. برای تعیین میزان اکسیداسیون سطحی نانولوله از آزمون آنالیز وزنی گرمایی<sup>۱</sup> یا TGA استفاده شده است. نمودار شکل ۲ نتیجه این آنالیز را پیشین و پس از اکسیداسیون سطحی نشان می دهد. این نمودار به روشنی تغییرهای برآمده از اکسیداسیون سطحی نانولوله را با اسیدهای اکسند قوی نشان می دهد. محور عمودی سمت چپ بیانگر تغییرها درصد وزنی و نمودار عمودی سمت راست مشتق این تغییرها را نشان می دهد. نمودار (الف-۲) که از نانولوله ابتدایی گرفته شده با توجه به ساختار یکنواخت نانولوله، تنها در یک منطقه محدود دچار تخریب ساختاری شده (حدود ۶۰۰ درجه سلسیوس) است. این در حالی است که پس از اصلاح سطحی نانولوله روند تغییرهای گرمایی در نانولوله دچار تغییرهای چشمگیری شده است. بخش ابتدایی شکل (ب-۲) نشان دهنده حذف رطوبت سطحی نانولوله به دلیل حضور گروه‌های آب‌دوست کربوکسیل است. در بازه ۴۰۰ درجه سلسیوس گروه‌های کربوکسیل شروع به سوختن کرده و سرانجام پس از آن ساختار نیمه تخریب شده نانولوله اکسید شده است.

بالن هم زده شد. این واکنش را به مدت ۱۲ ساعت انجام داده و در طی آن با استفاده از سامانه تغییر سرعت دستگاه مغناطیسی همزن، سرعت برای اختلاط بهتر و کنترل و یکنواختی بهتر آن تغییر داده شد. پس از این مدت فرآورده به دست آمده از واکنش را با آب یون زدایی رقیق کرده (در طی چند مرحله و تا ۱۰ برابر) و سپس آن را از یک صافی مقاوم به خوردگی واتمن با اندازه ۰/۴ میکرومتر عبور داده شد. سعی می‌شود شست و شوی فرآورده پشت صافی را نیز در چندین نوبت و تازمانی که pH خروجی از پشت صافی خنثی باشد ادامه دهیم. فرآورده پشت صافی در یک آون با دمای ملایم ۶۰ درجه سلسیوس خشک شده و به سیال پایه با نسبت مشخص افزوده شد. از حمام فراصوت نیز برای توزیع بهتر نانولوله در آب استفاده شد و در چند نوبت با استفاده از یک دستگاه سانتریفیوژ با دور پایین نانولوله‌های ته‌نشین شده جدا شد.

### نانوسیال دارای نانولوله پگیله

برای آماده سازی این نانوسیال از پلی اتیلن گلیکول (PEG) صنعتی استفاده می شود. روش آماده سازی نانولوله های پگیله شده در این بخش یک روش ابتکاری و البته مبتنی بر ترکیب چندین کار مانند می‌باشد [۲۳، ۲۴]. نخست مقدار ۵ گرم از پگ در داخل یک لوله آزمایش که دارای ۲۰ میلی لیتر کلروفرم می‌باشد ریخته شده و به مدت مناسب در یک حمام فراصوت با دمای ۵۰ درجه سلسیوس قرار می‌گیرد. پس از یکنواخت شدن نمونه، به آرامی نانولوله کربنی اولیه در زمان عمل اختلاط افزوده شد. سعی شد که افزودن نانولوله به مخلوط به صورت تدریجی باشد تا امکان یکنواختی و توزیع مناسب تر نانولوله در حجم سیال بهتر فراهم شود. پس از پایان این بخش، نمونه به مدت ۳۰ دقیقه دیگر نیز تحت عمل اختلاط در حمام فراصوت قرار گرفت. با توجه به دمای حمام، بیش تر کلرفرم موجود در نمونه تبخیر شده و به صورت خود به خود حذف شد. در مرحله بعد مقدار ۲۰ میلی لیتر آب یون زدایی شده به نمونه افزوده شده و نمونه دوباره به مدت ۳۰ دقیقه تحت عمل اختلاط فراصوت قرار گرفت. پس از این مدت، فرآورده یک نمونه یکنواخت از نانولوله های پگیله خواهد بود که افزون بر یکنواختی بسیار مناسب، پایداری بالایی نیز به جهت عدم ته‌نشینی در نمونه خواهد داشت. با توجه به ایجاد حالت یونی فعال در نانولوله های کربنی اکسید شده و همچنین استفاده گسترده از پیوند پی- پی در اتصال پلیمر به نانولوله ها، استفاده از آب یون زدایی شده ایجاد تداخل های یونی غیر موثر را در نمونه تهیه شده پایانی نانوسیال کم تر کرده و باعث ایجاد شرایط بهتری از پایداری نانولوله های کمپلکس شده در محیط سیال پایه می کند.

(1) Thermogravimetric analysis



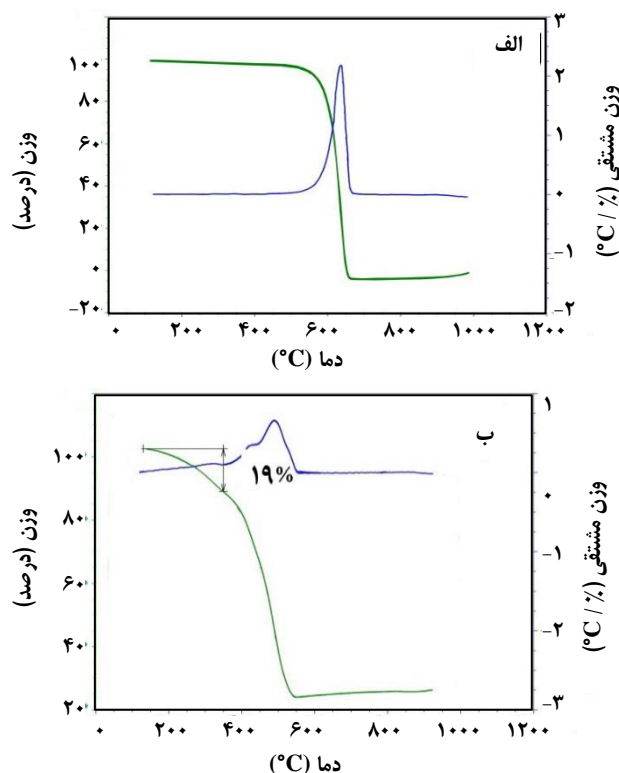
شکل ۳ - عکس TEM از نانولوله ها الف) قبل از فرایند اکسیداسیون و ب) نانولوله غیراکسیدی پگیله ج) نانولوله اکسیدی پگیله.

برش های اسیدی مشخص شده است.

نکته جالب توجه در این عکس حجم بالاتر پیچیده شدن پلیمر به دور نانولوله می باشد. همچنین لازم به ذکر است که با استفاده از عکس های TEM تنها پلیمرهای پیچیده شده به دور نانولوله و همچنین برش های عرضی و طولی مشخص می شود که با پیکان های مشکی در شکل نشان داده شده است.

#### مقایسه پایداری نانوسیال ها

نکته مهم دیگر در استفاده از نانوسیال ها در میدل های گرمایی، اهمیت پایداری و توزیع یکنواخت نانوذره ها در سیال پایه و به مرور زمان می باشد. ممکن است که یک نانوسیال در زمان های ابتدایی ساخت، دارای توزیع مناسب و نبود ناپایداری محسوس باشد اما با گذشت زمان و به دلیل فعل و انفعال ها ساختاری و بار یونی نانولوله ها، در درون سیال پایه دچار پدیده تجمع<sup>۲</sup> شده و به سرعت ته نشین شود که این مشکل برای میدل های گرمایی باعث مشکل های بسیار بعدی خواهد شد. از این رو در نظر گرفتن این پارامتر برای هر نوع استفاده از نانوسیال در میدل های گوناگون گریزناپذیر می باشد.



شکل ۲ - نمودار آنالیز وزنی گرمایی نانولوله الف) قبل و ب) بعد از اکسیداسیون

در حقیقت پیک خفیف اولیه این نمودار مربوط به حذف رطوبت است که مقدار آن کمتر از ۲ درصد می باشد. پیک دوم که در یک گستره حدودی ۳۲۰ تا ۴۳۰ سلسیوس قرار دارد مربوط به سوختن گروه های کربوکسیل می باشد. با توجه به درصد این تغییرات (۱۹ درصد) و محاسبه های وزنی و مولی مربوطه می توان نشان داد که به ازای هر ۱۶ اتم کربن به تقریب یک گروه عاملی بر روی سطح نانولوله وجود دارد.

#### عکس TEM از نانولوله پگیله شده

شکل ۳ عکس TEM مربوط به نانولوله ها را در سه نوع سیال آماده شده نشان می دهد. با توجه به نوع اتصال پی - پی<sup>۱</sup> نانولوله با پگ و پیچیده شدن زنجیره پلیمری در اطراف نانولوله، این عکس ها به روشنی این پدیده را نشان می دهد. شکل (الف-۳) نانولوله اولیه را با ساختار یکدست نشان می دهد. در شکل (ب-۳) پگیلاسیون اطراف نانولوله های غیر اکسیدی به روشنی نشان دهنده از اتصال گروه پگ دارد. شکل (ج-۳) نیز حالت پگیلاسیون نانولوله اکسیدی را نشان می دهد که در این حال نیز محل قرار گیری پلیمر و محل

(۱) π - π

(۲) Agglomeration

جدول ۱- پارامترهای تغییر یافته نانوسیال در جدول داده های TEMA مبدل گرمایی

مرجع	رابطه ریاضی	پارامتر محاسباتی
[۲۶]	$\rho_{nf} = (1-\phi) \rho_f + \phi \rho_p$	دانسیته
[۲۷]	$\nu/\delta_{bf} = (1-\phi) - \mu_{nf}/\mu$	گرانروی
[۲۸]	$C_{nf} = (1-\phi) C_f + \phi C_p$	ظرفیت گرمایی
[۲۹]	رابطه تجربی در پژوهش‌های گذشته	رسانش گرمایی

پس از بهینه کردن شرایط طراحی با مشخصه‌های اولیه نشان داده شده در جدول ۲، به جای سیال فرایندی قرارداد شده در لوله<sup>۵</sup> برای مبدل پوسته - لوله و همچنین سیال سرد<sup>۶</sup> در مبدل صفحه ای، نانوسیال آماده شده با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی جدید جایگزین شده و بهینه سازی فرایندی و مکانیکی بر روی آن انجام گرفته است. در حقیقت، ابتدا شبیه سازی با ورود داده های اولیه که بر مبنای سیال پایه اب است انجام گرفته و در مرحله بعدی با استفاده از داده های کسب شده الگوی شبیه سازی با اصلاح داده‌ها انجام گرفته است. شایان ذکر است که نرم افزار داده های پایه برای آب را در داخل پایگاه داده‌های نرم افزار وجود داشته و با تنظیم داده‌های تازه مدل اصلاح شد.

### تغییرهای رسانش گرمایی

رسانش گرمایی به عنوان یکی از پارامترهای تأثیرگذار در استفاده از نانوسیال‌های گرمایی می‌باشد. رسانش گرمایی به پارامترهای بسیاری وابسته می‌باشد که پژوهش‌های گذشته نویسنده، نشان دهنده اثربخشی بیش تر پارامتر غلظت در مرحله اول و دما در مرحله دوم می‌باشد [۸]. همچنین پژوهش‌های دیگر انجام شده توسط نویسنده بیانگر افزایش برداشت گرمایی از نانوسیال به واسطه افزایش میزان این پارامترها در سیال هدف می‌باشد [۲۵]. روند تغییرهای نسبی رسانش گرمایی نانوسیال به سیال پایه (knf/kbf) مربوط به این سه نانوسیال با غلظت نانولوله توزیع شده در آن در شکل ۴ نشان داده شده است. شایان ذکر است که برای این سه نمونه، از اختصارهای OX-CNT برای نانوسیال اکسیدی، PEG-CNT برای نانوسیال پگیله غیر اکسیدی و PEG-OX-CNT برای نانوسیال پگیله اکسیدی استفاده شده است.

از این رو برای شبیه سازی این بخش، نانوسیال آماده شده در درون یک بشر شیشه ای قرار داده شده و بر روی یک گرم کن مغناطیسی<sup>۱</sup> با یک دور مشخص که توسط مگنت و دمای مشخص توسط گرم کن آن ایجاد شده، در شرایط مکانیکی و گرمایی به نسبت همانند مبدل قرار می‌گیرد. با در نظر گرفتن سرعت دور آهن ربا، دمای نانوسیال درون بشر و زمانی که این شرایط اعمال می‌شود، سه نانوسیال آماده شده در آزمایش قرار گرفتند. میزان ته‌نشینی نانولوله در همه نمونه‌ها در بازه های زمانی سه روزه، وزن شده و سرانجام با یکدیگر مقایسه شدند. نتیجه‌ها حاکی از کمترین میزان ته‌نشینی برای دو نانوسیال نانولوله پگیله اکسیدی و غیر اکسیدی و همچنین بیشترین میزان ته‌نشینی برای نانوسیال اکسیدی دارد. البته همه نانوسیال‌های آماده شده دارای پایداری نسبی مناسب می‌باشند به گونه ای که کمترین میزان پایداری در نانوسیال اکسیدی بعد از گذشت بیست روز دیده شده و نانوسیال‌های دارای نانولوله های پگیله پایداری تا حدود دو ماه نیز داشته اند. از این رو به نظر می‌رسد که استفاده از بسپارش مناسب نانولوله به شدت می‌تواند توانایی پایداری نانولوله را در سیال پایه افزایش دهد. البته شایان ذکر است که به لحاظ کیفی، شکل و یکنواختی نانوسیال آماده شده در طی این آزمایش به روشنی کیفیت پایداری آن را حتی با چشم غیر مسلح نیز دیده می‌شود. اما به لحاظ کمی استفاده از وزن ته‌نشین شده نانوسیال در طی زمان و همچنین فناوری جذب نور<sup>۲</sup> که البته در اینجا استفاده نشده، می‌تواند در تعیین پایداری نانوسیال مورد بهره برداری قرار گیرد.

### شبیه سازی نرم افزاری توان گرمایی نانوسیال در یک مبدل پوسته - لوله<sup>۳</sup>

این شبیه سازی و محاسبه‌های مربوط به طراحی مبدل پوسته - لوله آن بر اساس الگوی استاندارد<sup>۴</sup> TEMA و با استفاده از نرم افزار ASPEN HTFS+ 2006 صورت گرفته است. همچنین در این شبیه سازی مبدل پوسته و لوله در نظر گرفته شده که در آن گرمای بخار آب داغ توسط نانوسیال آماده شده گرفته می‌شود [۲۵]. برای این شبیه‌سازی در تعیین پارامترهای دانسیته، گرانروی، ظرفیت گرمایی ویژه و رسانش گرمایی از رابطه‌های جدول ۱ استفاده شده است: ویژگی‌های و شرایط فرایندی دومبدل پوسته - لوله و صفحه ای و سیال‌های فرایندی آن‌ها، پیش از انجام محاسبات مربوط به استفاده از سه نوع نانوسیال در جدول ۲ و طبق الگوی استاندارد TEMA نشان داده شده است.

(۱) Magnetic stirrer

(۲) Light absorption

(۳) Shell and tube heat exchanger

(۴) Tubular Exchanger Manufacturers Association

(۵) Tube side

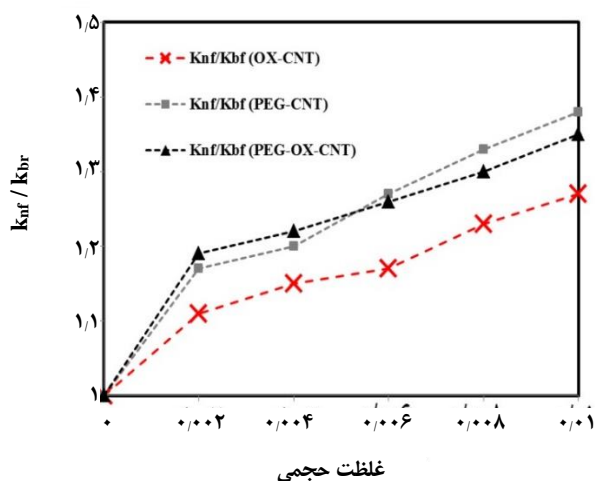
(۶) Cold side

جدول ۲: الگوی TEMA مشخصات گرمایی مبدل لوله - پوسته (۱-۲) و صفحه ای (۲-۲)

مبدل پوسته - لوله (2-1)					
تیوب	پوسته		محل سیال		
آب	بخار		نام سیال		
۱۳۲/۷۶	۶/۵		مقدار کل سیال		
۹۰	۱۳۷/۷۸	۱۳۷/۷۸	C	دمای ورودی، خروجی	
۹۶۶	۹۲۷/۵۲	۱/۷۹	kg/m <sup>3</sup>	دانسیته	
۰/۳۰۹	۰/۲۱۳	۰/۰۱۴	mPa*s	ویسکوزیته	
۴/۱۹۷	۴/۲۲۸	۲/۲۸۱	kJ/(kg*K)	گرمای ویژه	
۰/۶۷۱	۰/۶۹	۰/۰۲۸	W/(m*K)	رسانش گرمایی	
	۲۱۴۳	۲۱۴۳	kJ/kg	گرمای نهان	
۱۰/۳۴	۳/۴		bar	فشار	
kW		۱۳۹۲۹/۵	مقدار تبادل گرمایی		

مبدل صفحه ای (2-2)					
بخش سرد		بخش گرم		محل سیال	
آب		بخار		نام سیال	
۲۰۰		۱۰		مقدار کل سیال	
۵۸/۴۴	۲۸	۴۸/۸۸	۱۶۰	C	دمای ورودی، خروجی
۹۸۴/۰۷	۹۹۶/۲۱	۹۸۹/۷۹	۳/۱۷	kg/m <sup>3</sup>	دانسیته
۰/۴۷۸	۰/۸۳۳	۰/۵۲۶	۰/۰۱۴	mPa*s	ویسکوزیته
۴/۱۹۲	۴/۱۸۹	۴/۲۲۸	۲/۶۷۳	kJ/(kg*K)	گرمای ویژه
۰/۶۲۵	۰/۶۱۶	۰/۶۹	۰/۰۳	W/(m*K)	رسانش گرمایی
		۲۱۴۳	۲۱۴۳	kJ/kg	گرمای نهان
	۶		۴	bar	فشار
kW		۲۵۷۱۳		مقدار تبادل گرمایی	

روند این تغییرها بیانگر اثردهی بهتر تغییرهای فیزیکی نسبت به تغییرهای شیمیایی بر روی نانولوله توزیع شده در سیال پایه دارد. به طوری که نانوسیال دارای نانولوله پگیله در هر دو حالت اکسیدی و غیراکسیدی افزایش محسوس تری را نشان می دهد. به نظر می رسد استفاده از فناوری پلیمیزاسیون سطحی نانولوله قابلیت بالاتری در افزایش توان گرمایی نانوسیال به جهت توزیع بهتر و یکنواخت تر ایجاد می کند. نکته قابل توجه دیگر در این شکل مقایسه روند نسبی تغییرهای در دو حالت نانوسیال های دارای نانولوله پگیله اکسیدی و غیراکسیدی است. مقدار نسبی رسانش گرمایی در نانوسیال دارای نانولوله پگیله اکسیدی در غلظت های پایین تر، بیش تر از مقدار این پارامتر نسبت به نانوسیال دارای نانولوله پگیله غیر اکسیدی می باشد. به عبارت دیگر اثر پوشش سطحی پلیمر نانولوله ابتدایی در غلظت های بالاتر تأثیرگذارتر عمل کرده است و این امکان را برای نانوسیال به وجود آورده که بدون ایجاد تغییر شیمیایی سطحی بر روی نانولوله اولیه، تأثیرگذاری گرمایی بیش تری در نانوسیال به ایجاد کنیم.



شکل ۴- روند تغییر رسانش گرمایی نسبی نانوسیال های دارای نانولوله اکسیدی، نانولوله پگیله غیراکسیدی و نانولوله پگیله اکسیدی به سیال پایه (k\_nf/k\_bf).

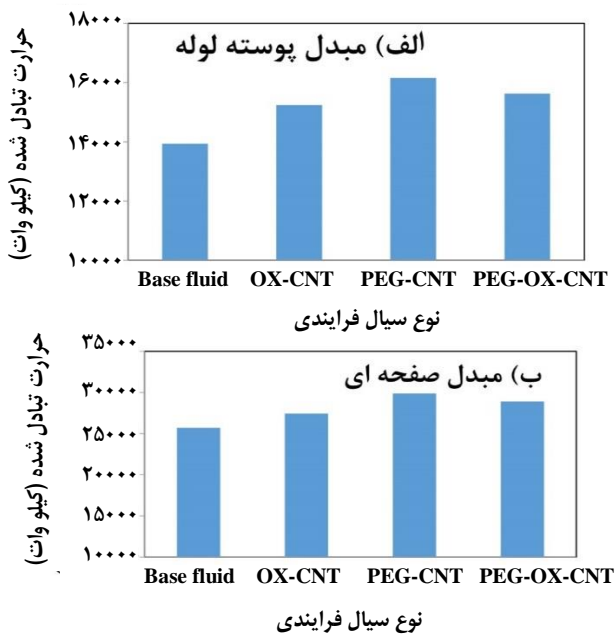
### مقایسه توان گرمایی مبدل‌ها

تلاش شد که با یکسان قرار دادن پارامترهای ورودی در طراحی مبدل، شرایط بهینه طراحی در نرم افزار به دست آورده شود. مهم‌ترین این پارامتر شامل دما، فشار و فلوی ورودی به آن می باشد که با توجه به درصد بسیار پایین نانوترکیب افزوده شده چندان دچار تغییر نمی‌یابد. در این میان پارامترهای فیزیکی بیان شده در بخش‌های پیشین دچار تغییرهای چشمگیری شدند که اثرهای تأثیرگذار آن‌ها در طراحی نهایی باعث افزایش راندمان گرمایی مبدل شده است. نمودار میله ای تغییرها بار گرمایی در دو مبدل نمونه پوسته - لوله و صفحه ای در شکل ۵ برای سیال‌های گرمایی متفاوت نشان داده شده است.

آنچه از شکل ۵ به روشنی مشخص می‌شود این است که این نانوسیال‌ها دارای نانولوله، توانایی گرمایی مبدل را افزایش داده اند ولی این افزایش بسته به شرایط عملکردی نانولوله در سیال پایه با یکدیگر متفاوت می باشند. در مبدل‌های پوسته - لوله نانولوله پگیله غیراکسیدی بهترین عملکرد گرمایی را نتیجه داده است که این چیزی در حدود ۱۶ درصد افزایش برداشت گرمایی نسبت به سیال پایه اولیه می باشد. نتیجه‌ها همچنین نشان دهنده از افزایش برداشت بیش‌تر حتی در مقایسه با نانولوله پگیله اکسیدی نیز می باشد. از این‌رو به نظر می‌رسد اگرچه ایجاد حالت گروه‌های عاملی آب‌دوست در سطح باعث افزایش توزیع نانولوله شده ولی از طرفی باعث تخریب ساختار اصلی نانولوله و عامل اصلی مزیت‌های بالقوه این نانوذره شد و در نتیجه حتی پگیلاسیون سطحی نانولوله اکسیدی باعث افزایش بیش‌تر این توان گرمایی نشده است. این روند برای مبدل صفحه‌ای نیز با شرایطی به تقریب همانند، تکرار شده است. بنا بر نتیجه‌های گرفته شده در این پژوهش به نظر می‌رسد اگرچه استفاده از نانولوله اصلاح شده در سیال پایه باعث بهبود شرایط گرمایی نانوسیال‌ها می‌شود ولی اصلاح فیزیکی و استفاده از پلی‌میزاسیون سطحی به جهت نبود تغییرهای ساختاری در نانولوله باعث شرایط گرمایی بهتر سیال شده است.

### ملاحظه‌های اقتصادی

با توجه شرایط کنونی کشور و همچنین قیمت پایین انرژی در کشور، در دیدگاه اولیه به نظر می‌رسد که این افزایش ظرفیت گرمایی، اثر چشمگیری بر اقتصاد انرژی واحدهای صنعتی نداشته باشد. ولی به همین دلیل و به علت این‌که نرخ فروش و تهیه انرژی با یکدیگر برابر نیست، از این‌رو این امر باعث خسارت‌های فراوان برای منابع و سازمان‌های تولید انرژی خواهد شد. ارایه مدل‌هایی که بتواند در این بخش این تفاوت را کاهش دهد بسیار مفید و مهم خواهد بود.



شکل ۵ - توان گرمایی مبدل‌های (الف) پوسته - لوله و (ب) صفحه ای برای چهار حالت سیال پایه، نانوسیال دارای نانولوله اکسیدی، نانوسیال دارای نانولوله پگیله و نانوسیال دارای نانولوله اکسیدی پگیله.

از مدل ارایه شده می‌توان به عنوان یک راهکار، به ویژه در صنایعی که با این نوع از مبدل‌ها روبرو هستند، استفاده کرد. به ویژه که در این راهکار نیاز به تغییر ساختار این نوع از مبدل‌ها نیست و تنها باید بتوان سیال عامل گرمایش یا سرمایش را جایگزین نمود. یعنی در حقیقت امکان استفاده بهینه‌تر از تجهیزهای گرمایی موجود به وجود می‌آید.

از این‌رو از یک سو، با توجه به این‌که در بیش‌تر وقت‌ها، حجم اصلی انرژی در واحدهای نفت، گاز و پتروشیمی توسط این دو نوع مبدل جابجا می‌شود، و از سوی دیگر میزان این تبادل انرژی بسیار بالاست، به سادگی می‌توان به این نتیجه رسید که حتی کاهش ۱۰ تا ۱۵ درصدی در مصرف انرژی سالانه واحد، می‌تواند اثر چشمگیری در اقتصاد انرژی واحد و حتی کشور داشته باشد. به این نکته، باید بحث راهبردی بودن انرژی را نیز در شرایط کنونی افزود.

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش با توجه به اهمیت انرژی و اثر آن بر اقتصاد کشور، تلاش شده راهکاری برای اصلاح گرمایی دو نوع از پرکاربردترین مبدل‌های صنعتی، ارایه شود. به همین دلیل، در مرحله اول سه نانوسیال گرمایی مبتنی بر نانولوله‌های کربنی

مناسب آن در جهت افزایش راندمان گرمایی دارد که این نتیجه‌ها به ویژه در مبدل‌های پوسته - لوله و صفحه‌ای به علت افزایش برداشت گرمایی، باعث افزایش راندمان گرمایی آن از یک سو و کاهش هزینه ساخت از سوی دیگر در کلیه صنایع و به ویژه در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی خواهد شد. همچنین، با توجه به اهمیت بهینه سازی مصرف انرژی در واحدهای گوناگون صنعتی، می‌تواند نقش چشمگیری در اقتصاد انرژی واحد و همچنین کشور داشته باشد.

### فهرست نمادها

C	ظرفیت گرمایی، $\text{kJ/kg. K}$
$\rho$	چگالی، $\text{kg/m}^3$
$\varphi$	درصد حجمی
$\mu$	ویسکوزیته، $\text{mPa}\cdot\text{s}$
	<b>زیرنویس</b>
f	سیال پایه
nf	نانوسیال
p	نانوذره

ساخته شود. از دو روش یکی روش فیزیکی که شامل پگیلاسیون یا بسپارش سطحی با پلیمر پلی اتیلن گلاکول و همچنین روش شیمیایی که شامل اکسیداسیون سطحی می باشد برای آماده سازی نانولوله‌ها به جهت توزیع بیش‌تر، بهتر و یکنواخت‌تر در سیال پایه آب، استفاده شد. از این رو پس از اصلاح‌های ساختاری بر روی نانولوله کربنی و ایجاد حالت آب‌دوستی، به کمک پیوندهای کربوکسیل و پلیمرهای سطحی بر روی آن، در سیال پایه آب توزیع شد. سه نوع نانوسیال برای آزمایش‌های فرآیندی که در حقیقت ترکیبی از فناوری‌های گفته شده بود، شامل نانوسیال اکسیدی، پگیله غیر اکسیدی و پگیله اکسیدی آماده شد. نتیجه‌های به دست آمده از آزمون گرمایی آن بر روی نانولوله‌های اکسیدی نشان دهنده ایجاد تعداد چشمگیری گروه‌های عاملی کربوکسیل بر روی سطح نانولوله است. همچنین این نانوذره‌ها توزیع مناسب و یکنواختی را در سطح سیال پایه نشان می دهند. بررسی پایداری این نانوسیال‌ها نیز بیانگر از پایداری چشمگیر نانولوله‌های اکسیدی و غیر اکسیدی پگیله شده در سیال پایه دارد. در پایان، شبیه سازی این نانوسیال‌ها با ویژگی‌ها و داده‌های نوین و استفاده از استاندارد TEMA بر روی مبدل گرمایی پوسته - لوله و همچنین صفحه‌ای انجام شد که حکایت از افزایش چشمگیر برداشت گرمایی توسط نانوسیال تا ۱۶ درصد را دارد. نتیجه‌های به دست آمده از این پژوهش بیانگر اهمیت فناوری اصلاح سطحی در نانوذره‌ها و نانولوله‌ها و به ویژه پلیمیزاسیون

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۲۴ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۶/۱۹

### مراجع

- [1] Saidur R., Leong K.Y., Mohammad H.A., [A Review on Applications and Challenges of Nanofluids](#), *Renew. Sus. Ener. Rev.*, **15**(3): 1646-68 (2011).
- [2] Taylor R., Coulombe S., Otanicar T., Phelan P., Gunawan A., Lv W., Rosengarten G., Prasher R., Tyagi H., [Small Particles, Big Impacts: A Review of the Diverse Applications of Nanofluids](#), *J. Appl. Phys.*, **113**(1): 011301 (2013).
- [3] Mohebbi K., Rafee R., Talebi F., [Effects of Rib Shapes on Heat Transfer Characteristics of Turbulent Flow of  \$\text{Al}\_2\text{O}\_3\$ -Water Nanofluid inside Ribbed Tubes](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng.(IJCE)*, **34**(3): 61-77 (2015).
- [4] Sahu R.K., Somashekhar S.H., Manivannan P.V., [Investigation on Copper Nanofluid Obtained through Micro Electrical Discharge Machining for Dispersion Stability and Thermal Conductivity](#), *Proc. Eng.*, **64**: 946-55 (2013).
- [5] Chang M.-H., Liu H.-S., Tai C.Y., [Preparation of Copper Oxide Nanoparticles and Its Application in Nanofluid](#), *Pow. Tech.*, **207**(1-3): 378-86 (2011).



- [6] Koblinski P., Phillpot S. R., Choi S.U.S., Eastman J.A., [Mechanisms of Heat Flow in Suspensions of Nano-Sized Particles \(Nanofluids\)](#), *Int. J. Heat Mass Transfer*, **45**(4): 855-63 (2002).
- [7] Habibzadeh S., Kazemi-Beydokhti A., Khodadadi A.A., Mortazavi Y., Omanovic S., Shariat-Niassar M., [Stability and Thermal Conductivity of Nanofluids of Tin Dioxide Synthesized Via Microwave-Induced Combustion Route](#), *Chem. Eng. J.*, **156**(2): 471-78 (2010).
- [8] Kazemi-Beydokhti A., Heris S. Z., Moghadam N., Shariati-Niasar M., Hamidi A.A., [Experimental Investigation of Parameters Affecting Nanofluid Effective Thermal Conductivity](#), *Chem. Eng. Comm.*, **201**(5): 593-611 (2014).
- [9] Jafari A., Shahmohammadi A., Mousavi S.M., [CFD Investigation of Gravitational Sedimentation Effect on Heat Transfer of a Nano-Ferrofluid](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng.(IJCCE)*, **34**(1): 87-96 (2015).
- [10] Iijima S., *Nature*, **354**: 56 (1991).
- [11] De Volder, M.F.L., Tawfick S.H., Baughman R.H., Hart A.J., [Carbon Nanotubes: Present and Future Commercial Applications](#), *Science*, **339**(6119): 535-39 (2013).
- [12] Zhang H., Li H.X., Cheng H.M., [Water-Soluble Multiwalled Carbon Nanotubes Functionalized with Sulfonated Polyaniline](#), *J. Phys. Chem. B*, **110**(18): 9095-9099 (2006).
- [13] Kazemi-Beydokhti A., Hajiabadi S.H., Sanati A., [Surface Modification of Carbon Nanotubes as a Key Factor on Rheological Characteristics of Water Based Drilling Muds](#), *Iran. J. Chem. Chem. Eng.(IJCCE)*, **37**(4): 1-14 (2018).
- [14] Stevens, J.L., Huang A.Y., Peng H., Chiang I.W., Khabashesku V.N., Margrave J.L., [Sidewall Amino-Functionalization of Single-Walled Carbon Nanotubes through Fluorination and Subsequent Reactions with Terminal Diamines](#), *Nano Lett.*, **3**(3): 331-36 (2003).
- [15] Zhao B., Brittain W.J., [Polymer Brushes: Surface-Immobilized Macromolecules](#), *Prog. in Poly. Science*, **25**(5): 677-710 (2000).
- [16] Georgakilas V., Kordatos K., Prato M., Guldi D. M., Holzinger M., Hirsch A., [Organic Functionalization of Carbon Nanotubes](#), *J. Amer. Chem. Soci.*, **124**(5): 760-61 (2002).
- [17] Sano, M., Kamino A., Okamura J., Shinkai S., [Self-Organization of PEO-graft-Single-Walled Carbon Nanotubes in Solutions and Langmuir-Blodgett Films](#), *Langmuir*, **17**(17): 5125-28 (2001).
- [18] Pompeo F., Resasco D.E., [Water Solubilization of Single-Walled Carbon Nanotubes by Functionalization with Glucosamine](#), *Nano Lett.*, **2**(4): 369-73 (2002).
- [19] Van Thu, L., Cao Long N., Quoc Trung L., Trinh Tung N., Duc Nghia N., Minh Thanh V., [Surface Modification and Functionalization of Carbon Nanotube with Some Organic Compounds](#), *Adv.Nat. Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, **4**(3): 035017 (2013).
- [20] Hong C.-Y., You Y.-Z., C.-Y. Pan, [A New Approach to Functionalize Multi-Walled Carbon Nanotubes by the Use Of Functional Polymers](#), *Polymer*, **47**(12): 4300-09 (2006).
- [21] Eitan, A., Jiang K., Dukes D., Andrews R., Schadler L.S., [Surface Modification of Multiwalled Carbon Nanotubes: Toward the Tailoring of the Interface in Polymer Composites](#), *Chem. Mat.*, **15**(16): 3198-201 (2003).

- [22] Kanbur Y., Küçükyavuz Z., [Surface Modification and Characterization of Multi-Walled Carbon Nanotube](#), *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, **19**(6): 497-504 (2011).
- [23] Ravelli, D., Merli, D., Quartarone E., Profumo A., Mustarelli P., Fagnoni M., [PEGylated Carbon Nanotubes: Preparation, Properties and Applications](#), *RSC Advances*, **3**(33): 13569-82 (2013).
- [24] Chattopadhyay J., de Jesus Cortez F., Chakraborty S., Slater N.K.H., Billups W.E., [Synthesis of Water-Soluble PEGylated Single-Walled Carbon Nanotubes](#), *Chem. Mate.*, **18**(25): 5864-68 (2006).
- [25] Kazemi-Beydokhti A., Zeinali Heris S., [Thermal /optimization of Combined Heat and Power \(CHP\) Systems Using Nanofluids](#), *Energy*, **44**(1): 241-47 (2012).
- [26] Pak B.C., Cho Y.I., [Hydrodynamic and Heat Transfer Study of Dispersed Fluids with Submicron Metallic Oxide Particles](#), *Expe. Heat Tran.*, **11**(2): 151-70 (1998).
- [27] Brinkman H.C., [The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions](#), *J. Chem. Phys.*, **20**(4): 571-71 (1952).
- [28] Gherasim I., Roy G., Nguyen C.T., Vo-Ngoc D., [Experimental Investigation of Nanofluids in Confined Laminar Radial Flows](#), *Int. J. Ther. Scie.*, **48**(8): 1486-93 (2009).
- [29] Kazemi-Beydokhti A., Heris S.Z., Jaafari M.R., [Experimental Investigation of Thermal Conductivity of Medical Nanofluids Based on Functionalised Single-Wall Carbon Nanotube And Conjugated Cisplatin](#), *IET Mic. Nano Lett.*, **10**(5): 241-47 (2015).