**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده مهندسی شیمی

# بررسی ضریب انتقال جرم نانوسیال سیلیکا به روش الکتروشیمی در لوله مدور

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

**نوروان کشیشیان**

استاد راهنما

**دکتر محسن نصر اصفهانی**

۱۳۹۱

به نام خدا

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکده مهندسی شیمی

# بررسی ضریب انتقال جرم نانوسیال سیلیکا به روش الکتروشیمی در لوله مدور

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی

**نوروان کشیشیان**

استاد راهنما

**دکتر محسن نصر اصفهانی**

۱۳۹۱

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی شیمی

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی آقای نوروان کشیشیان تحت عنوان

**بررسی ضریب انتقال جرم نانوسیال سیلیکا به روش الکتروشیمی در لوله مدور**

در تاریخ ۱۳۹۱/۱۲/۲۱ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

| | |
|---|---|
| ۱- استاد راهنمای پایان‌نامه | دکتر محسن نصر اصفهانی |
| ۲- استاد مشاور پایان‌نامه | دکتر نسرین اعتصامی |
| ۳- استاد داور | دکتر احمد محب |
| ٤- استاد داور | دکتر مسعود حق شناس فرد |
| سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده | دکتر حمید زیلویی |

**بر خود لازم می‌دانم که از جناب دکتر محسن نصر اصفهانی که در اجرای این پژوهش همواره راهنما و پشتیبان من بوده اند صمیمانه تشکر کنم.**

**کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.**

## تقدیم به :

همه کسانی که لحظه ای بعد انسانی و وجدانی خود را فراموش نمی کنند و بر آستان گران سنگ انسانیت سر فرود می آورند و انسان را با همه تفاوت هایش ارج می نهند.

# فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ..... ۱

**فصل اول: مقدمه**

۱-۱ مقدمه ..... ۲

۱-۲ تاریخچه فناوری نانو ..... ۳

۱-۳ نانومواد ..... ٤

۱-۳-۱ روش های تهیه نانو ذرات ..... ٥

۱-۳-۲ انواع نانوذرات ..... ٦

۱-۳-۳ تعیین مشخصات نانوذرات ..... ٦

۱-٤ نانوسیال ..... ٦

۱-٤-۱ امتیازات نانو سیال ..... ۸

۱-٤-۲ روش های تهیه نانوسیال ..... ۹

۱-٤-۳ انواع روش های پایدار سازی نانوسیالات ..... ۱۱

۱-٥ هدف از پژوهش های حاضر ..... ۱۲

۱-٦ ساختار رساله ..... ۱۳

**فصل دوم: بررسی پژوهش های انجام شده**

۲-۱ مقدمه ..... ۱٤

۲-۲ انتقال جرم در نانوسیالات ..... ۱٤

۲-۲-۱ پژوهش های انجام شده در زمینه ضریب نفوذ در نانوسیالات ..... ۱٥

۲-۲-۲ پژوهش های انجام شده در زمینه ضریب انتقال جرم در نانوسیالات ..... ۲۳

۲-۲-۳ پژوهش های انجام شده در زمینه استخراج مایع-مایع در نانوسیال ..... ۳٦

۲-۲-٤ روابط تقریبی ارائه شده برای انتقال جرم در نانوسیالات ..... ۳۷

۲-۳ مکانیسم‌های موجود انتقال جرم در نانوسیالات ..... ٤۰

۲-۳-۱ بررسی مدل لغزشی سیال ..... ٤۲

۲-٤ روش الکتروشیمیایی برای بدست آوردن ضریب انتقال جرم ..... ٤٥

۲-٤-۱ جریان فاراد و سرعت الکترولیز ..... ٤٦

۲-٤-۲ عوامل موثر بر سرعت واکنش الکترود و جریان ..... ٤۷

۲-٤-۳ شرط کنترل کننده بودن انتقال جرم در واکنش الکتروشیمیایی ..... ٤۸

۲-٤-٤ حالت پایا انتقال جرم در سطح الکترود ..... ٥۰

۲-٤-٥ جریان حدی بحرانی ..... ٥۳

**فصل سوم :دستگاه آزمایشگاهی،مواد و نحوه محاسبات**


۳-۱ مقدمه ..... ٥٤
۳-۲ بررسی دستگاه آزمایشگاهی برای اندازه گیری ضریب انتقال جرم ..... ٥٤
۳-۳ تهیه نانوسیال ..... ٥٧
۳-٤ نحوه انجام آزمایش ..... ٦٠
۳-٥ نحوه انجام محاسبات ضریب انتقال جرم ..... ٦١
۳-٦ روابط استفاده شده به منظور بررسی صحت کار دستگاه آزمایشگاهی ..... ٦٥


**فصل چهارم: نتایج آزمایشگاهی و بحث**


٤-۱ مقدمه ..... ٦٦
٤-۲ نتایج ضریب انتقال جرم در جریان آرام ..... ٦٦
٤-۳ نتایج ضریب انتقال جرم در جریان درهم ..... ٧١
٤-٤ بررسی دلایل تغییرات ضریب انتقال با در نظر گرفتن مکانیسم های ذکر شده ..... ٧٥
٤-٥ مقایسه نتایج با تحقیقات انجام شده قبلی ..... ٧٨
٤-٦ جمع بندی نتایج ..... ٨٠
٤-٧ پیشنهادات ..... ٨١
فهرست علائم ..... ٨٢
پیوست ..... ٨٥
پیوست الف) ..... ٨٥
پیوست ب) ..... ٨٨
مراجع ..... ٩٢

## چکیده

در این پژوهش انتقال جرم در نانوسیال الکترولیتی درون لوله مدور مستقیم افقی در جریان آرام و درهم کاملاً توسعه یافته هیدرودینامیکی و در حال توسعه غلظتی به روش الکتروشیمیایی بررسی شده است. در این پژوهش از نانوذره اکسید سیلیکا با قطر متوسط ۱۳-۷ نانومتر برای ساخت نانوسیال استفاده شده است. محلول الکترولیت شامل فرو-فری سیانید و سدیم هیدرواکسید می باشد. از روش جریان حدی برای اندازه گیری ضریب انتقال جرم نانوسیال بطور مستقیم استفاده شده است و به منظور ایجاد کنترل کنندگی واکنش کاتدی اندازه کاتد بسیارکوچکتر از آند در نظر گرفته شده است، برای ساخت الکترود ها از جنس استیل ۳۱٦ استفاده شده است. ضریب انتقال جرم اندازه گیری شده برای سیال پایه با روابط تئوری و تجربی مقایسه شده که خطای متوسط ۱۸/۲ درصد را برای جریان آرام و خطای متوسط ۲۹/٤۷ درصد را برای جریان درهم نشان داده است. نانوسیال با غلظت های حجمی بین ۰/۰۰۰۲٪ تا ۰/۰۲٪ نیز مورد آزمایش قرار گرفته که ضریب انتقال جرم اندازه گیری شده در جریان درهم تفاوتی را با ضریب انتقال جرم در سیال پایه نشان نمی دهد. ولی در جریان آرام ضریب انتقال جرم در نانوسیال الکترولیتی با افزایش غلظت نانوذره ابتدا افزایش سپس کاهش را موجب می شود که در غلظت حجمی ۰/۰۰۵۷۱٤٪ بیشترین افزایش را بمقدار متوسط ۱۵/۲۵ درصد نشان می دهد همچنین نتایج نشان دادند که ضریب انتقال جرم افزایش یافته با افزایش رینولدز کاهش می یابند. با توجه به اینکه نانوذرات بسیار کوچکتر از ضخامت لایه مرزی می باشند بنابرین توانایی حرکت در لایه مرزی غلظتی را دارا می باشند پس نانوذرات وارد فیلم غلظتی شده و به واسطه میکروجابجایی با ایجاد اختلاط ضخامت لایه مرزی را کاهش می دهد و موجب افزایش در انتقال جرم می شوند.همچنین حرکات بروانی نانوذرات نیز در نانوسیال موجب ایجاد میکرو جابجایی شده و نفوذ جرم را بطور غیر مستقیم تقویت می کند از طرف دیگر نانوذرات با جذب سطحی یون های فعال، به واسطه حرکت بروانی و همچنین با توجه به وجود نفوذ الکتروفرسیز یون های فعال تمایل دارند به سطح الکترود برسند و افزایش انتقال جرم را موجب شوند البته این مکانیسم ها فقط در جریان آرام موثر واقع شد زیرا در جریان درهم ادی ها و همچنین مهاجرت ذرات به واسطه گرادیان القایی برش نقش غالب را ایفا می کنند و نقش نانوذرات اکسید سیلیکا در جریان درهم کاهش می یابد. در غلظت های بالای نانوذرات، انتقال جرم کاهش یافته است که دلیل این کاهش را به این صورت می توان عنوان کرد که با افزایش غلظت تمایل نانوذرات به چسبیدن به هم افزایش می یابد و حالت کلوخه شدن در آنها ایجاد می شود که در این صورت با افزایش اندازه ذرات حرکات بروانی برای ذرات بزرگتر از حد نانو نقش خود را از دست داده و از طرف دیگر در غلظت های بالای نانوذرات، ذرات به صورت مانعی در برابر انتقال جرم در آمده و کاهش در انتقال جرم را موجب می شوند.



کلمات کلیدی:۱-ضریب انتقال جرم ۲-نانوسیالات ۳-الکتروشیمی ٤-هیدرودینامیک

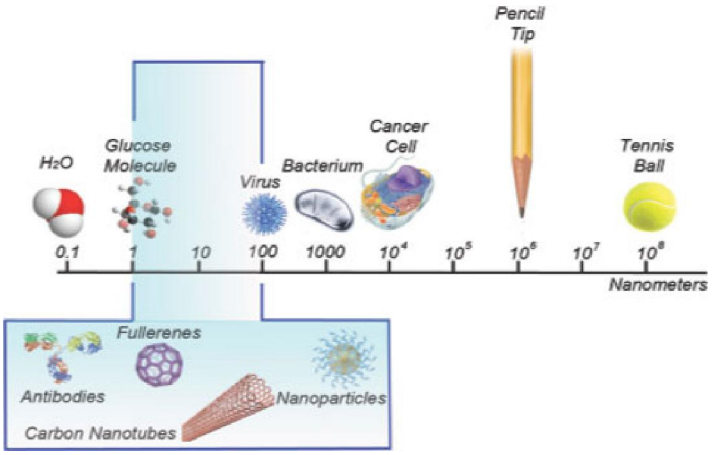
# فصل اول
# مقدمه ای بر نانوتکنولوژی

## ۱-۱ مقدمه

نانوتکنولوژی تولید کارآمد مواد و دستگاهها و سیستمها با کنترل ماده در مقیاس طولی نانومتر، و بهره برداری از خواص و پدیده های نوظهوری است که در مقیاس نانو توسعه یافته اند. از همین تعریف ساده بر می آید که نانوتکنولوژی یک رشته جدید نیست، بلکه رویکردی جدید در تمام رشته هاست. از این فناوری در کلیه علوم پزشکی، پتروشیمی، علوم مواد، صنایع دفاعی، الکترونیک، کامپیوترهای کوانتومی وغیره باعث شده که تحقیقات در زمینه نانو به عنوان یک چالش اصلی علمی و صنعتی پیش روی جهانیان باشد. با تولید ساختارهایی در مقیاس نانومتر ، امکان کنترل خواص ذاتی مواد بدون تغییر در ترکیب شیمیایی بوجود می‌آید. استفاده از این پتانسیل به محصولات و تکنولوژی های جدیدی با کارآیی بالا منتهی می‌شود که پیش از این میسر نبود .

ساختارهایی در مقیاس نانو مانند نانو ذرات و نانولایه‌ها دارای نسبت سطح به حجم بالایی هستند که آنها را برای استفاده در مواد کامپوزیت ، واکنشهای شیمیایی ، تهیه دارو و ذخیره انرژی ایده‌ال می‌سازد.

واژه نانو به معنی $10^{-9}$ است.برای درک مقیاس نانو در بعد طول با ایجاد ارتباط میان اندازه اتم‌ها و مقیاس نانو می‌توان یک نانومتر را راحت‌تر تصورکرد. یک نانومتر برابر قطر ۱۰ اتم هیدروژن و یا ۵ اتم سیلسیم می‌باشد. برای درک بهتر در شکل (۱-۱) اجسامی با اندازه های مختلف با هم مقایسه شده اند [۱] .




شکل(۱-۱) مقایسه اندازه اجسام [۱]

## ۱-۲ تاریخچه فناوری نانو

در سال۱۹۵۹ ریچارد فاینمن[۱] مقاله ای را درباره قابلیت های فناوری نانو در آینده منتشر ساخت. باوجود موقعیت هایی که توسط بسیاری تا آن زمان کسب شده بود، ریچارد فاینمن را به عنوان پایه گذار این علم می شناسند. فاینمن که بعدها جایزه نوبل را در فیزیک دریافت کرد در آن سال در یک مهمانی شام که توسط انجمن فیزیک آمریکا برگزار شده بود، سخنرانی کرد و ایده فناوری نانو را برای عموم مردم آشکار ساخت. عنوان سخنرانی وی فضای زیادی در سطوح پایین وجود دارد بود. در سال ۱۹۷٤ نوریو تانیگوچی[۲] استاد دانشگاه علوم توکیو عبارت نانوفناوری را در مقاله برای اولین بار تعریف کرد و بدین ترتیب قدمها مدون شدن این فناوری را گذاشت. تعریفی که این روزها با تمامی گسترشی که یافته است اما هنوز به عنوان سنگ بنای مفهوم ناموتکنولوژی

۱ Richard Feynman

۲ Norio Taniguchi

شناخته می شود. شاید بتوان گام اساسی بعد را به اریک دکسلر[۱] امریکایی نسبت داد، که توانست یک قالب‌کاری برای" مطالعه وسایلی که توانایی حرکت دادن اشیاء مولکولی و مکان آنها را با دقت اتمی دارند" ایجاد کند، که در سپتامبر ۱۹۸۱ در مقاله‌ای با نام " پروتئین راهی برای تولیدانبوه مولکولی ایجاد میکند[۲]" آن را ارائه داد. دکسلر آن را با کتابی بنام " موتورهای خلقت"[۳] دنبال کرد و توسعه مفهوم نانوتکنولوژی را همانند یک کوشش علمی ادامه داد[۲، ۳].

### ۱-۳ نانومواد

موادی که حداقل یکی از ابعاد آنها در مقیاس ۱ الی ۱۰۰ نانومتر باشد، مواد نانویی یا نانو مواد خوانده می‌شوند. مواد نانو متری انواع گوناگونی دارند که شاید بتوان بصورت زیر طبقه بندی نمود.[٤]

۱) نانو ذرات[٤] : نانوذرات از ده ها یا صدها اتم یا مولکول و با اندازه های مختلف ساخته شده است. اغلب نانوذرات که به طور تجاری مورد استفاده قرار می گیرند، به شکل پودر خشک و یا به صورت پخش در محلول می‌باشند. این ذرات در شکل ها و مورفولوژی[٥] های گوناگونی یافت می شوند، ساختارهایی از کروی ، ورقه ای، شاخه ای، لوله ای و غیره.

۲ ) نانو لوله ها[٦] : لفظ نانو لوله در حالت عادی در مورد نانولوله های کربنی به کار می رود، هر چند که اشکال دیگری از نانولوله همچون انواع ساخته شده از نیترید بور نیز وجود دارد. نانولوله ها با خواص مکانیکی، الکتریکی و اپتیکی برجسته، در مصارف الکترونیکی با بیشترین توجه روبه رو شده اند. همچنین نانولوله ها برای نگهداری هیدروژن و هیدروکربن ها جهت استفاده در پیل های سوختی نیز مورد مطالعه قرار گرفته اند.

۳) نانو سیم ها[۷]: عموماً سیم به ساختاری گفته می شود که در یک جهت (جهت طولی) گسترش داده شده باشد و در دو جهت دیگر بسیار محدود شده باشد. یک خصوصیت اساسی از این ساختارها که دارای دو خروجی

---

۱ **Eric Drexler**

۲ **Protein design as a pathway to molecular manufacturing**

۳ **Engines of Creation**

٤ **nanoparticle**

٥ **Morphology**

٦ **Nanotubes**

۷ **Nanowires**

می باشند، رسانایی الکتریکی می باشد. با اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی در دو انتهای این ساختارها و در امتداد طولی شان انتقال بار الکتریکی اتفاق می افتد.

٤) نانو خوشه ها[۱]: با توجه به تحقیقات و محاسبات، محققین به این نتیجه رسیدند که اتم ها، سطح را برای پیدا کردن مکانی که به کمترین مقدار انرژی برسند جست و جو می کنند. آرایش های ۱ تا ۲ نانومتری از این خوشه ها برای وسایل پیشرفته نوری و الکترونیکی مناسب هستند، همچنین به عنوان کاتالیست ها برای واکنش های شیمیایی می تواند استفاده شوند.

۵) نانو پوشش ها[۲] : نانو پوشش های حفاظتی برای افزایش مقاومت در مقابل خوردگی، افزایش سختی سطوح و حفاظت در مقابل عوامل مخرب محیطی ساخته می شوند.

٦) نانو حفره ها[۳]: موادی با اندازه های حفره ای در محدوده نانومتری که به علت ویژگی برجسته آنها با توجه به عایق حرارتی بودن، همچنین به عنوان پرکننده هایی برای کاتالیزورها در علم شیمی، مورد توجه زیادی می‌باشد.

### ۱-۳-۱ روش های تهیه نانو ذرات

برای تولید نانوذرات روشهای بسیار متنوعی وجود دارد. این روش ها اساساً به سه دسته تقسیم می شوند.[۵]

۱)روش چگالش از بخار: که شامل تبخیر فلز جامد سپس چگالش سریع آن برای تشکیل خوشه های نانومتری است که به صورت پودر ته نشین می شوند.

۲)روش سنتز شیمیایی: شامل رشد نانوذرات در محیط مایع حاوی انواع واکنشگرها است . روش سل ژل[٤] نمونه ای از چنین روش است، در روش های شیمیایی اندازهِ نهایی ذره را می توان با توقف فرآیند هنگامی که اندازه مطلوب به دست آمد یا با انتخاب مواد شیمیایی تشکیل دهنده ذرات پایدار و توقف رشد در یک اندازه خاص کنترل نمود.

۳) روش فرایندهای جامد (آسیاب یا پودر کردن): می توان برای ایجاد نانوذرات استفاده نمود. از این روش می توان برای تولید نانوذرات به صورت فیزیکی در موادی استفاده نمود که در دو روش قبلی به آسانی تولید نمی شوند.

---

۱ **Nano Cluster**

۲ **Nano-Coating**

۳ **Nanopore**

٤ **Sol-Gel**

### ۱-۳-۲ انواع نانوذرات

نانوذرات استفاده شده در نانوسیال ها از مواد مختلفی ساخته شده اند،که رایج ترین آنها نانوذرات سرامیکی، فلزی ،پلیمری و نانوذرات نیمه رسانا هستند.

رایج ترین نانوذرات، نانوذرات سرامیکی هستند که رایج ترین این نوع نانوذرات سرامیک های اکسید فلزی نظیر اکسید های تیتانیوم، روی، آلومینیوم و آهن هستند. سیلیکات ها یا اکسیدهای سیلیکون نیز سرامیک هستند که عموماً به شکل ذرات نانومقیاسی خاک رس هستند. نانوذرات سرامیکی از روشهای سنتز شیمیایی و فرآیندهای حالت جامد بدست می آیند. اصلاح شیمیایی سطح نانوذرات تاثیر زیادی در کارایی و کاربرد آنها دارد. ایجاد خواص آبدوستی وآبگریزی جزء روش های اصلاح شیمیایی نانوذرات محسوب می شوند. نانوذرات سیلیکاتی برای بدست آوردن خاصیت آب گریزی بیشتر، باید به صورت شیمیایی اصلاح شوند، مثلاً می توان با استفاده از یونهای آمونیوم، این اصلاح شیمیایی را انجام داد [۵، ٦] .

### ۱-۳-۳ تعیین مشخصات نانوذرات

تعیین مشخصات نانوذرات برای کنترل سنتز، خواص و کاربرد آنها ضروری است. مشخصات این ترکیبات با استفاده از روش های گوناگونی نظیر آنالیز میکروسکوپ الکترونی،طیف سنجی فوتوالکترونی ،X-ray و FT-IR سنجیده می شود.

در سیالاتی که نانوذرات پخش شده اند نیز از میکروسکوپ الکترونی روبشی[۱] و میکروسکوپ الکترونی عبوری[۲] ، که با تابش پرتو الکترونی به محلول شکل نانوذرات،اندازه و توزیع ذرات را در محلول معلوم می سازند استفاده فراوانی دارند[۷] .

## ۱-٤ نانوسیال

هدایت حرارتی برخی از جامدات نظیر فلزات چند صد برابر مایعات متداول حامل انرژی است. بر این اساس ایدهٔ بهبود و افزایش هدایت حرارتی مایعات با افزودن ذرات جامد بسیار ریز شکل گرفته است. برخی از ذرات جامد مانند ذرات فلزی، غیر فلزی و پلیمری را می‌توان با مایعات مخلوط کرده و از آن‌ها سیال دوغابی شکل

---

۱ SEM

۲ TEM

تهیه کرد. این ایده سابقه طولانی دارد به طوری که برای اولین بار ماکسول[۱] به مدل سازی ضریب هدایت حرارتی در اثر افزودن ذرات جامد به سیالات پرداخت. ذرات جامد مورد مطالعه تا سال‌های اخیر در اندازه‌های میلیمتری یا نهایتاً میکرومتری بوده‌اند که به دلیل سنگینی، ته نشینی سریع و بروز مشکلاتی مانند انسداد مجاری، ایجاد سایش و خوردگی جداره‌ها و افزایش افت فشار را به دنبال داشته‌اند. در نتیجه استفاده از ذرات جامد جهت بهبود راندمان حرارتی مبدل‌ها با مشکل جدی مواجه شد. تا اینکه فن آوری جدید نانو امکان تولید ذرات در ابعاد نانو را فراهم آورد [۸، ۹].

با پراکنده کردن نانو ذرات در سیال، نوع جدیدی از سیال به وجود می‌آید که نانو سیال نامیده می‌شود. نانو ذرات معلق خواص حرکتی و حرارتی سیال پایه را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. ایده معلق کردن ذرات با ابعاد نانومتر در سیالات از سال۱۹۹۳ به ذهن چوی[۲] خطور کرد. چوی در سال۱۹۹۵ اولین بار موضوع نانو سیال را به عنوان محیط جدید انتقال حرارت مطرح نمود [۸، ۹].

تأثیر فناوری نانو بر ذرات و موادی که با این تکنولوژی تولید می‌شوند به حدی است که می‌توان این گونه مواد را نسبت به مواد مشابه در سایز ماکرو مولکولی را مجزا دانست و خواص جدیدی برای آن‌ها تعریف نمود. از جمله خواص تحت تأثیر از فناوری نانو می‌توان به خواص شیمی فیزیکی ذرات نانومتری و سیالات حاوی آن‌ها اشاره نمود که نسبت به مواد ماکرو مولکولی تفاوت‌های فراوانی دارند.از طرف دیگر ضریب هدایت ذرات ریز چندین برابر هدایت سیالات را دارند به این ترتیب می‌توان ضریب هدایت سیالات را با استفاده از ذرات سوسپانس شده در آن‌ها تا حدود زیادی افزایش داد. این ذرات می توانند اکسیدهای فلزی یا نانو لوله‌های کربنی معلق در سیال یا نانوذرات دیگری باشند.

جهت کاربرد مطلوب نانو سیالات، دست‌یابی به یک درک اساسی از مکانیزم‌های انتقال حرارت و انتقال جرم با توجه به تشابه این دو پدیده انتقال در نانو سیالات ضروری است. همچنین صحت مدل‌ها و مکانیزم‌های جدید ارائه شده در زمینه نانو سیالات هنوز مورد بحث است و توافقی در جامعه محققین نانو سیالات در استفاده از آن‌ها وجود ندارد و تاکنون تئوری جامعی برای پدیده انتقال در نانو سیالات ارائه نشده است. علاوه بر این، داده‌های آزمایشگاهی کمی جهت بررسی مدل‌های مختلف وجود دارند. سهم واقعی مکانیزم‌های مختلف و پتانسیل آن‌ها، تنها با آزمایشات منظم و قاعده‌مند زیاد قابل ارزیابی است. در کنار بررسی آزمایشگاهی مکانیزم‌های جدید، جمع

---

۱ Maxwell

۲ Choi

آوری داده‌ها، مدل سازی، شبیه سازی و مطالعات تئوری نیز لازم است. در نتیجه مبحث نانو سیالات یکی از زمینه‌های تحقیقاتی و پژوهشی مهم پیش روی محققین است.

### ۱-٤-۱ امتیازات نانو سیال

فرآیند انتقال حرارت و استفاده از مبدل‌های حرارتی در اغلب صنایع کوچک و بزرگ به چشم می‌خورد. افزایش میزان انتقال حرارت و کارایی مبدل‌های حرارتی به معنی صرفه جویی در هزینه‌های صنایع می‌باشد. با رفتاری که نانو سیال در زمینه انتقال حرارت از خود نشان داده است، امید به چنین صرفه جویی در صنایع، به ویژه صنایع بزرگ بیشتر شده است. مزایای استفاده از نانو سیالات را می‌توان به صورت بهبود انتقال حرارت، کاهش توان پمپ و هزینه عملکرد، کوچک و سبک‌تر شدن دستگاه‌ها و مبدل‌های حرارتی، امکان کاهش دبی سیال انتقال حرارت برشمرد که همه این موارد را بطور مجزا در اینجا مورد بررسی قرار می دهیم[۸].

۱- بهبود انتقال گرما: کاهش اندازه ذرات یک جامد که توأم با افزایش تعداد آن‌ها در واحد جرم می‌باشد، منجر به افزایش سطح مخصوص می‌گردد. با کاهش اندازه ذرات به حدود نانومتر درصد بیشتری از اتم‌های آن در نزدیکی سطح قرار می‌گیرند. از آنجا که انتقال حرارت یک پدیده سطحی بوده و سطح ذرات در آن مؤثر هستند، استفاده از نانو سیال به افزایش سطح موثر در انتقال حرارت منجر می‌گردد.

۲- کاهش توان مصرفی برای انتقال سیال: در سیالات متداول حامل انرژی، افزایش میزان انتقال حرارت جابجایی مستلزم افزایش سرعت سیال برای بالا بردن عدد رینولدز و به دنبال آن عدد ناسلت و در نتیجه، ضریب انتقال حرارت جابجایی است. این افزایش سرعت در تجهیزات به نوبه خود، مستلزم افزایش توان مصرفی پمپ می باشد. اما اگر نانو سیال برای انتقال حرارت به کار گرفته شود، در یک سرعت مشخص، افزایش انتقال حرارت، متأثر از افزایش هدایت حرارتی سیال خواهد بود. بنابراین کاهش هزینه انرژی و کاهش توان مصرفی پمپ‌ها، از دیگر مزایای نانو سیالات است.

۳- افزایش پایداری وکاهش گرفتگی مجاری: ذراتی که در تحقیقات گذشته به سیالات افزوده می‌شدند، دارای ابعاد بزرگ‌تر و در مقیاس میکرو بوده‌اند. این ذرات پایداری لازم در سوسپانسیون را نداشته و

به سرعت ته نشین می‌شدند. همین امر سبب می‌شود که مجاری عبور سیال به سرعت مسدود می گردید. در حالی که ذرات با اندازه نانو، تشکیل سوسپانسیون های بسیار پایدارتری داده و پایین بودن سرعت ته نشینی آن‌ها سبب می‌گردد تا مشکل گرفتگی و انسداد مجاری، به حداقل برسد.

٤- کاهش اندازه سیستم‌های انتقال حرارت: به توجه به قابلیتی که نانو سیال از خود در انتقال حرارت نشان داده، وقتی که از نانو سیال بجای سیال معمولی برای انتقال حرارت استفاده شود، به ازای انتقال یک مقدار مشخص حرارت، تجهیزات و مبدل‌های حرارتی لازم از حجم و اندازه کوچک‌تری برخوردار خواهند شد.

٥- کاهش هزینه‌ها و کاهش مصرف انرژی: به دلیل کاهش توان مصرفی پمپ‌های انتقال سیال از طرفی و کاهش اندازه و وزن تجهیزات انتقال حرارت از طرف دیگر، با به‌کارگیری نانو سیال صرفه جویی قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های سرمایه گذاری و عملیاتی واحدهای صنعتی ایجاد می‌گردد.

### ۱-٤-۲ روش های تهیه نانوسیال

نانو سیالات را می‌توان به دو روش کلی تهیه کرد[۷]:

۱-روش یک مرحله ای

۲-روش دو مرحله ای

در روش یک مرحله ای تولید نانو ذره و وارد کردن آن درون سیال پایه در یک مرحله صورت میگیردکه روش نسبتاً مشکلی می باشد.معمولاً در این روش نانودرات به طور مستقیم از روش رسوبگیری بخار به طریق فیزیکی[۱] و یا به طریق شیمیایی از فاز مایع انجام می گیرد در شیوه اول جسم جامد تبخیر شده، در تماس مستقیم با سیال سرد جاری به صورت نانو ذره در می‌آید، که تبخیر خلأ در روغن جاری[۲] نام یکی از این شیوه ها می باشد(در شکل۱-۲ به صورت شماتیک نمایش داده شده است) [۷]. ایستمن[۳] و همکاران[۱۰] سپس روش اصلاح شده ای را با شیوه تبخیر خلأ در روغن جاری ابداع کردند،که برای تمام مشکلات پایداری و پخش مناسب، فائق آمد روش

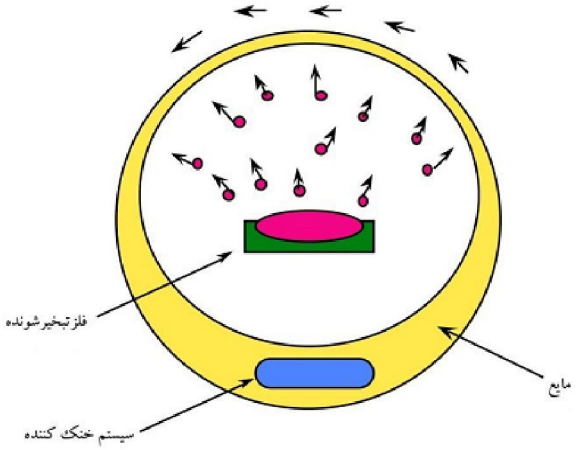
---

۱ physical vapor deposition (PVD)

۲ Vacuum Evaporation onto Running Oil Substrate (VEROS)

۳ Eastman

مستقیم تبخیر–چگالش منجر به تولید نانوذراتی بدون هر گونه انباشتگی تولید کردند که از جنس مس بود، با این حال روش استفاده شده توسط ایستمن دارای دو ایراد می باشد، اول اینکه روش قابل تولید انبوه برای استفاده در صنایع نمی باشد و دوم اینکه برای سیالاتی که دارای فشار بخار بالای می باشند مناسب نیست.سپس ژو و همکاران[۱۱] روش شیمیایی جدیدی برای تولید نانوسیال ابداع کردند و اداع آنها بر این بود که این روش یک مرحله ای شیمیایی سریع تر و ارزانتر از روش یک مرحله ای فیزیکی است.




شکل (۱-۲): روش یک مرحله‌ای تولید نانو سیال

مزیت عمده روش یک مرحله‌ای این است که کلوخه شدن ذرات را به حداقل مقدار ممکن می‌رساند و اشکال آن این است که فقط برای سیالات پایه با فشار بخار پایین مناسب می‌باشد و برای استفاده انبوه صنعتی مناسب نمی باشد [۷].

در روش دو مرحله ای ابتدا نانوذره مورد نظر تهیه می شود و سپس به سیال پایه افزوده می شود. این روش با توجه به اینکه محقق درگیر فرآیند تهیه نانو ذره نیست و فقط باید فرآیند مناسبی برای تهیه سوسپانسیون انتخاب نماید، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.این روش بیشتر برای نانوذرات اکسیدی مناسب می باشد و برخلاف روش یک مرحله ای تهیه نانوسیالات مناسب نانوذرات فلزی نمی باشد.همچنین این روش برای غلظت های بالای نانوسیالات مناسب نمی باشد ولی مزیت عمده این روش این است که می تواند کاربرد صنعتی داشته باشد [۷].