

# بررسی روش‌های موجود برای پایداری نانوسیالات

## و تاثیر آن‌ها بر ضریب هدایت حرارتی

نویسندگان: سید حسین حسینی<sup>۱</sup>، محمد محمدی<sup>۲</sup>

۱. استادیار گروه مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، دانشگاه تبریز

h\_hosseini@tabrizu.ac.ir

### ۱ مقدمه

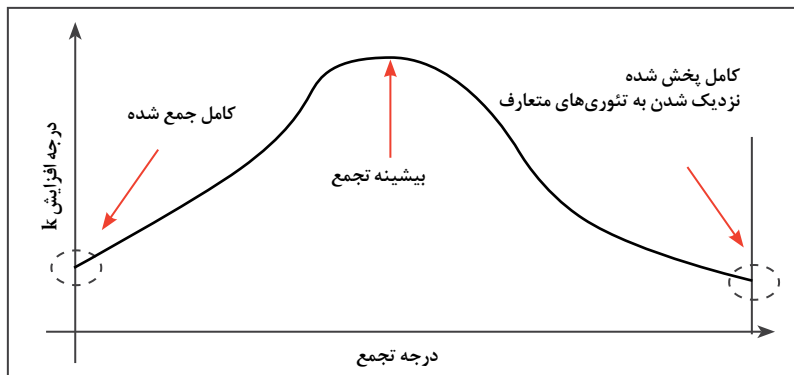
هر کدام از این مکانیسم‌ها می‌توان از شبیه‌سازی مولکولی استفاده کرد. تشکیل خوشه از مواردی است که پایداری سوسپانسیون را تحت تاثیر قرار می‌دهد. بحث مربوط به اجتماع ذرات منفرد و تشکیل خوشه را می‌توان از دو جنبه مورد بررسی قرار داد. بر اساس یک سری از آزمایش‌ها، خوشه‌ها مسیری را با مقاومت حرارتی کمتر برای عبور گرما فراهم می‌آورند. از طرفی، ممکن است با ایجاد توده‌های بزرگ یکنواختی سوسپانسیون را از بین ببرند یا با ایجاد نواحی خالی از ذرات نانو در مایع موجب افزایش مقاومت و کاهش انتقال حرارت شوند [۱۰-۱۱]. این مقاله روش‌های تهیه نانوسیال، متدهای موجود برای ایجاد یکنواختی در سوسپانسیون، و مزایا و معایب استفاده از هر کدام از این روش‌ها را مورد بررسی قرار

با توجه به رشد روزافزون کاربرد نانوسیالات در سیستم‌های حرارتی، صنایع میکروالکترونیک، روغن موتورها، روان‌کننده‌ها، و سایر فناوری‌ها، این دسته از سیالات امروزه به‌شدت در کانون توجه محققان قرار گرفته‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد نانوسیالات دارای ضریب انتقال حرارت و پایداری سوسپانسیونی بالاتری نسبت به سایر سیالات متداول و سوسپانسیون‌های با ابعاد بزرگ‌تر هستند [۱۸].

از دید کبلینسکی و همکاران [۹]، مکانیسم‌های افزایش ضریب هدایت حرارتی نانوسیال شامل حرکت براونی ذرات، لایه‌سازی مایع در سطح مشترک آن با فاز جامد، انتقال گرما توسط فونون‌ها و تشکیل خوشه بود. برای بررسی تاثیر

نانوسیالات دسته جدیدی از سیالات هستند که از پراکنده‌سازی نانوذرات (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) در یک سیال پایه ایجاد می‌شوند. بررسی‌های انجام گرفته نشان‌دهنده بهبود ویژگی‌های حرارتی سوسپانسیون نسبت به سیال پایه است. یکی از فاکتورهای کلیدی در بهینه شدن خواص این دسته از سیالات مسئله پایداری آن‌ها است. تهیه سوسپانسیون یکنواخت و پایدار تاثیر بسزایی در بهبود خواص حرارتی نانوسیال دارد. یکی از مواردی که بر پایداری نانوسیال تاثیر می‌گذارد پدیده تشکیل خوشه یا تجمع است. عوامل مختلفی بر این پدیده تاثیر گذارند؛ اندازه ذرات، نوع ذرات، ویژگی‌های سیال پایه، و روش تهیه نانوسیال از جمله این عوامل هستند. برای ایجاد محلول پایدار روش‌های مختلفی وجود دارد. استفاده از هر کدام از این روش‌ها باید با دقت خاصی انجام شود تا بهترین نتایج به دست آید. این مقاله مروری بر روش‌های ایجاد سوسپانسیون پایدار، ملاحظات استفاده از این روش‌ها، و متدهای ارزیابی میزان پایداری نانوسیال است.

**کلمات کلیدی:** نانوسیال، پایداری، سوسپانسیون، ضریب هدایت حرارتی.



شکل ۱. اثر تشکیل خوشه بر ضریب هدایت حرارتی [۱۸].

عامل اصلی عبور سریع حرارت از روی فواصل زیاد است. نتیجه دیگری که از آزمایش‌ها به دست آمد این بود که مواردی که کاملاً پراکنده می‌شوند، افزایش انتقال حرارت کمتری را نشان می‌دهند، حال آنکه سوسپانسیون‌های با تجمع فراکتالی افزایش بیشتری در ضریب هدایت حرارتی نشان می‌دهند [۱۵ و ۱۶]. برعکس، تئوری دیگری اشاره می‌کند که تجمع ذرات باعث کاهش پایداری سوسپانسیون می‌شود [۱۲]. آزمایش‌های هانگ و همکاران [۱۷] افزایش ضریب انتقال حرارت را بر اثر شکست خوشه‌های نانوذرات آهن توسط ارتعاش فراصوت نشان داد، اگرچه این بهبود به‌صورت تابعی از زمان سپری‌شده بعد از تولید نانوسیال به‌مرور کاهش می‌یابد.

برخی از محققان [۱۲ و ۱۸] نیز یک حالت بهینه را در تشکیل خوشه برای حصول ضریب هدایت حرارتی بیشینه پیش‌بینی می‌کنند (شکل ۱). بنابراین، برای دسته‌بندی این تئوری‌ها تحقیقات آزمایشگاهی بیشتری نیاز است تا نقش تشکیل خوشه و تجمع ذرات در بهبود هدایت حرارتی مشخص شود. اما به‌طور کلی برای حصول سوسپانسیون با کیفیت بالا، ذرات ریز باید این دو ویژگی را داشته باشند:

**۱. اصل نفوذ:** ذرات به‌وسیله واسطه مایع از هم جدا شوند و در آن نفوذ کنند.

**۲. اصل پتانسیل زتا (پتانسیل الکتریکی پیرامون ذرات در محلول):** مقدار مطلق پتانسیل زتا باید تا حد امکان برای به وجود آوردن نیروهای دافعه بین ذرات بزرگ باشد. بر اساس بررسی‌ها سه روش متداول برای ایجاد سوسپانسیون پایدار وجود دارد که در برخی آزمایش‌ها از یکی از روش‌ها در برخی از دوتای آن‌ها و در تعدادی از آن‌ها از هر سه روش استفاده شده است. این روش‌ها به شرح زیرند:

### ۱.۳ افزودن مواد فعال‌کننده سطح (سورفکتانت‌ها)

عملکرد این مواد به‌گونه‌ای است که سطح آبریز نانوذرات را در محلول‌های آبدار به سطوح آبدوست تغییر می‌دهند؛ درواقع، نقش تغییر

اسیدیته اشاره کرد. از آنجا که نانوذرات در این روش به‌صورت نسبی پراکنده می‌شوند و پراکندگی ضعیفی دارند، برای افزایش انتقال حرارت غلظت بالای ذرات نیاز است. بنابراین، این روش برای غلظت بالای ۲۰ درصد مطلوب است. این روش برای تهیه نانوسیال فلزی مناسب نیست، چون ذرات فرصت اکسیداسیون می‌یابند.

**■ روش تک‌مرحله‌ای:** در این روش نانوسیال از طریق رسوب مستقیم نانوذرات، به‌وسیله روش رسوب فیزیکی بخار با استفاده از روش شیمیایی مایع (تراکم مستقیم پودرهای نانو از فاز بخار به داخل سیال جاری با فشار بخار کم)، تهیه می‌شود. در این روش از خشک شدن، انباشت، انتقال، و پراکندگی ذرات جلوگیری می‌شود. بنابراین، تجمع ذرات کاهش و پایداری سوسپانسیون افزایش می‌یابد. نبود امکان تغییر مقیاس برای کاربردهای صنعتی و تنها قابلیت استفاده برای سیال پایه با فشار بخار پایین از معایب این روش است.

### ۳ اهمیت پایداری سوسپانسیون و روش‌های تهیه سوسپانسیون پایدار

تهیه سوسپانسیون پایدار، به‌دلیل وجود نیروهای قوی جاذبه و اندروالس مابین ذرات و تمایل آن‌ها به تشکیل خوشه، هنوز یک چالش تکنیکی محسوب می‌شود. میرهن است که نبود پایداری سوسپانسیونی باعث افزایش احتمال تشکیل خوشه و افزایش سرعت ته‌نشینی شده و در نتیجه موجب کاهش ضریب هدایت حرارتی با گذشت زمان می‌شود.

برخی از بررسی‌ها نشان می‌دهد خوشه‌ای شدن و تجمع ذرات یکی از علل کلیدی افزایش غیرعادی ضریب هدایت حرارتی است، اگرچه این تئوری ممکن است فقط برای نانوذرات با نسبت ابعادی بالا، مانند نانوتیوب‌های تک‌جداره، صادق باشد [۱۲].

براساس بررسی‌هایی که توسط فیلیپ و همکاران [۱۳] و همچنین پاچکو و همکاران [۱۴] انجام گرفت، نسبت ابعادی بالای خوشه‌های فراکتالی

می‌دهد. همچنین، معرفی ابزارها و روش‌های تخمین پایداری نانوسیال در این نوشته گنجانده شده است.

### ۲ روش‌های تهیه نانوسیال

تهیه نانوسیال پایا و بادوام شرط لازم برای بهینه شدن خواص آن است. اجتماع ذرات و کلوخه شدن آن‌ها باعث افزایش احتمال ته‌نشینی می‌شود، پایداری سوسپانسیون را کاهش می‌دهد، و موجب از بین رفتن ویژگی‌های سوسپانسیون ازجمله هدایت حرارتی، ویسکوزیته، و افزایش ظرفیت حرارتی می‌شود. سرعت ته‌نشینی ذرات کروی در سیال ساکن را می‌توان از قانون استوکس به دست آورد:

$$v = \frac{2R^2}{9\eta} (\rho_p - \rho_l) g \quad (۱)$$

این معادله از موازنه نیروهای ثقل، شناوری، و دراک که بر روی ذرات عمل می‌کنند به دست می‌آید.  $R$  شعاع ذرات،  $\eta$  ویسکوزیته سیال،  $\rho_p$  دانسیته ذرات، و  $\rho_l$  دانسیته سیال است. بر اساس این قانون، کاهش اندازه ذرات، افزایش ویسکوزیته سیال پایه، و کاهش اختلاف دانسیته سیال و ذرات سرعت ته‌نشینی ذرات را کاهش می‌دهد. بر اساس یک تئوری در شیمی کلوئیدی، وقتی که اندازه ذرات به شعاع بحرانی  $R_c$  برسد، به‌دلیل حرکت براونی ذرات، ته‌نشینی (رسوب) رخ نخواهد داد. با وجود این، ذرات ریزتر سطح انرژی بالاتری دارند و احتمال مجتمع شدن آن‌ها بیشتر است. بنابراین، برای تهیه یک سوسپانسیون پایدار باید از ذرات ریز همراه با جلوگیری از تجمع آن‌ها استفاده کنیم. روش‌های تهیه نانوسیالات به دو دسته تک‌مرحله‌ای و دومرحله‌ای تقسیم می‌شود:

**■ روش دومرحله‌ای:** در این روش ابتدا نانوذرات به‌صورت پودر خشک تهیه می‌شوند؛ این مرحله اغلب از طریق متراکم کردن نمونه جامد تیخیرشده به‌وسیله گاز بی‌اثر انجام می‌شود. در مرحله بعدی، ذرات را در سیال پایه پراکنده می‌کنند. استفاده از گاز بی‌اثر با هدف جلوگیری از تشکیل اکسیدهای فلزی است. در صورتی که هدف تهیه نانوذرات اکسید فلزی باشد، به‌جای گاز بی‌اثر از اکسیژن هوا استفاده می‌کنند. روش دومرحله‌ای برای تولید انبوه روش مناسبی است، اما این مشکل را دارد که ممکن است ذرات قبل از پراکندگی کامل داخل سیال در اثر نیروهای قوی و اندروالس به هم بچسبند و گروهی از آن‌ها در مایع رسوب کنند و موجب کاهش ضریب هدایت حرارتی شوند. روش‌های فیزیکی و شیمیایی مختلفی برای حل این مشکل ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به ارتعاش مافوق صوت، نانوسیال را در معرض برش بالا قرار دادن، استفاده از مواد فعال‌کننده سطح و تغییرات

## ۲.۳ تغییر اسیدیته

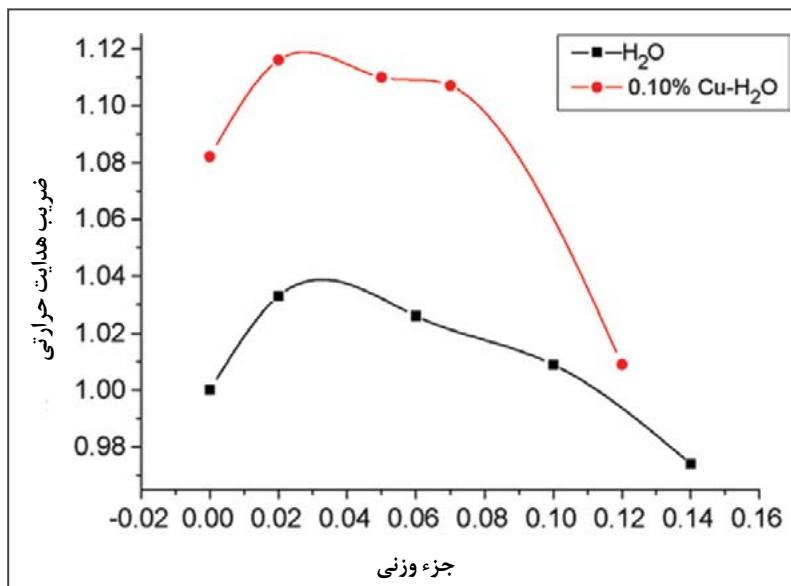
پایداری محلول‌های آیدار مستقیماً به خواص الکتروستاتیکی آن‌ها مرتبط است. از طریق افزایش چگالی بار سطحی ذرات می‌توان نیروهای دافعه قوی ایجاد کرد که موجب پایداری سوسپانسیون شود. خی و همکاران [۸] نشان دادند که از طریق یک روش اسیدی ساده، سوسپانسیون‌های نانوتیوب‌های کربنی پایداری خوبی در آب به دست می‌آورند و این به دلیل تغییر طبیعت سطح از آبگریز به آبدوست به علت تولید گروه هیدروکسیل است. در واقع، در این نقطه ذرات بار الکتریکی سطحی خالصی ندارند. هنگامی که pH محلول از نقطه ایزوالکتریک (نقطه ایزوالکتریک غلظت کنترل‌کننده پتانسیل یون‌ها است که در آن پتانسیل زتا برابر صفر است) فاصله می‌گیرد، چگالی بار سطحی ذرات و در نتیجه مقدار مطلق پتانسیل زتا افزایش می‌یابد، ذرات کلوئیدی پایداری بیشتری به دست می‌آورند و منجر به افزایش ضریب هدایت حرارتی می‌شوند. شکل ۳ و شکل ۴ به ترتیب مقدار پتانسیل زتا و نسبت ضریب هدایت حرارتی را برای نانوذرات مس در آب بر حسب pH نشان می‌دهند [۲].

مقدار مطلق پتانسیل زتای نانوذرات مس در حضور سورفکتانت SDBS به‌ازای pH ۵/۹ - ۵/۸ بیشینه می‌شود، یعنی اینجا چگالی بار سطحی پیرامون ذرات بیشتر است و به تبع آن، همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، ضریب هدایت حرارتی به‌ازای pH از ۳ تا ۵/۹ - ۵/۸ افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است pH بهینه برای نانوذرات مختلف متفاوت است. برای مثال، pH بهینه برای نانوذرات آلومینا ۸ و برای نانوذرات مس و گرافیت ۵/۹ است.

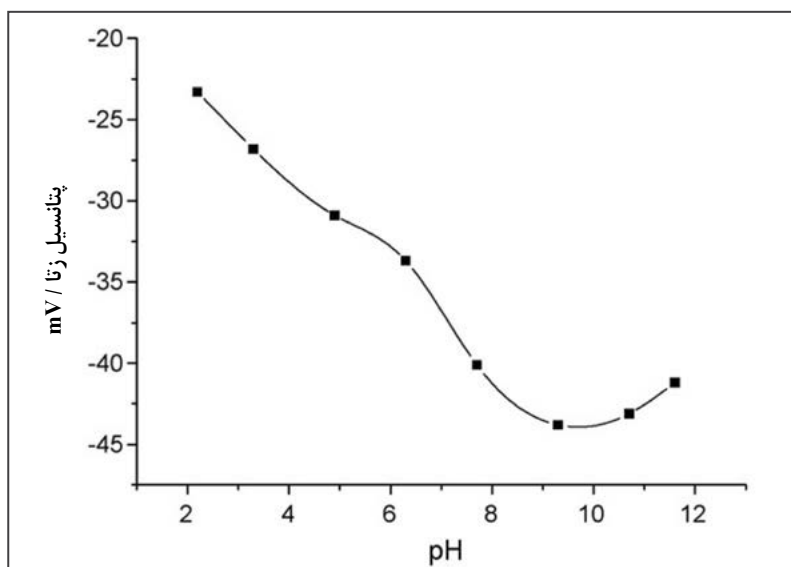
## ۳.۳ ارتعاش مافوق صوت

حمام فراصوت، پردازشگر فراصوت، و همونایزر فراصوت ابزارهایی قوی برای شکستن تجمع ذرات در مقایسه با سایر روش‌های مغناطیسی و همزن هستند که توسط محققان مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شکل ۵، تاثیر ارتعاش اولتراسونیک را بر نانوذرات طلا نشان می‌دهد. شکستن تجمع ذرات بر اثر ارتعاش اولتراسونیک به‌خوبی در شکل مشخص است [۳].

متد جدید دیگری که توسط هوانگ و همکاران ارائه شد شامل شکست خوشه‌ها از طریق انرژی بالای تشکیل حفره‌ها بود. دستگاه همونایزر فشار بالا شامل دو میکروکانال بود که جریان سیال را دو قسمت می‌کرد؛ سپس، دو جریان در ظرف واکنشگر دوباره ترکیب می‌شدند. در این حین، افزایش چشمگیر سرعت جریان سیال تحت فشار در میکروکانال‌ها منجر به ایجاد کاویتاسیون (توید حباب) در سیال می‌شد و انرژی بالای ناشی از این پدیده موجب شکستن خوشه‌ها می‌شد. مکانیسم‌های شکستن خوشه‌ها شامل شوک‌های



شکل ۲. نسبت ضریب هدایت حرارتی نانوسیال به سیال پایه بر حسب جزء وزنی سورفکتانت برای نانوسیال Cu-H<sub>2</sub>O [۲].



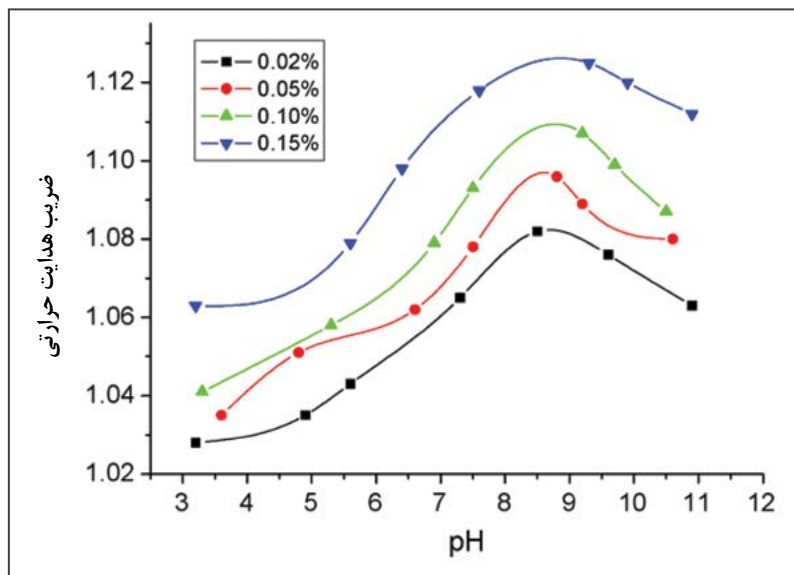
شکل ۳. تاثیر pH بر روی پتانسیل زتا در حضور سورفکتانت دودسیل بنزن سولفونیک اسید برای نانوسیال Cu-H<sub>2</sub>O [۲].

هدایت حرارتی نانوسیال مورد نظر به سیال پایه کاهش می‌یابد. یکی دیگر از معایب استفاده از سورفکتانت‌ها این است که در دماهای بالا (بالا تر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد) ممکن است پیوند میان نانوذرات و سورفکتانت آسیب ببینند و نانوسیال پایداری خود را از دست بدهد.

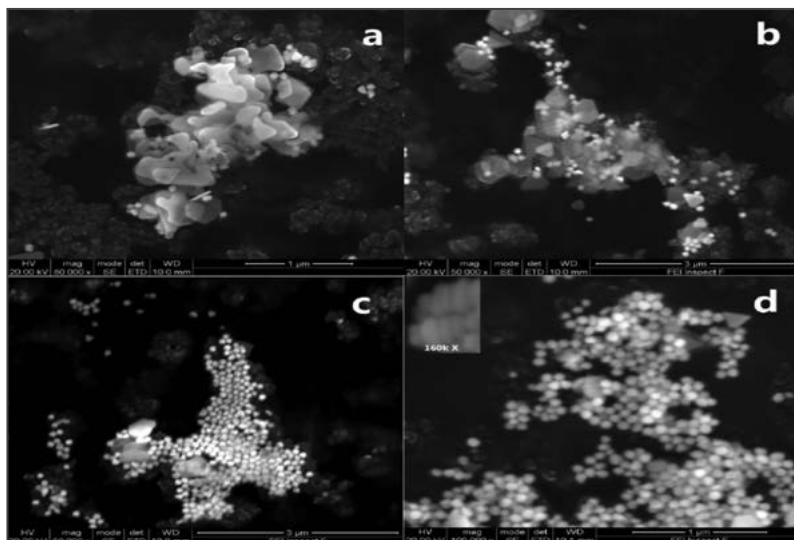
سديم دودسیل سولفات، ۴-دودسیل بنزن سولفونیک اسید (4-Dodecyl Benzene Sulfonic Acid SDBS)، اولیک اسید، ستیل تری متیل آمونیوم برماید، و دودسیل تری متیل آمونیوم برماید از سورفکتانت‌های متداولی هستند که مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

کاربری ذرات را به عهده دارند. اما باید توجه شود که اگر مقدار سورفکتانت کافی نباشد، نمی‌تواند پوشش لازم را برای به وجود آوردن دافعه الکترواستاتیک و جبران جاذبه واندروالس اعمال کند. از طرفی، اگر مقدار آن زیاد باشد، همان‌طور که در آزمایش‌های لی و همکاران [۲] مشاهده می‌شود، بر ضریب هدایت حرارتی اثر می‌گذارد و موجب کاهش آن می‌شود. شکل ۲ موید این مطلب است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، از غلظت مشخصی به بعد با افزودن سورفکتانت (۴-دودسیل بنزن سولفونیک اسید) نسبت ضریب



شکل ۴. تاثیر pH بر ضریب هدایت حرارتی نانوسیال در حضور سورفکتانت دودسیل بنزن سولفونیک اسید برای نانوسیال  $\text{CuO-H}_2\text{O}$  [۲].



شکل ۵. تاثیر ارتعاش اولتراسونیک بر نانوذرات طلا. شکل a لحظه شروع و اشکال b, c و d، به ترتیب، زمان‌های ۱۰، ۲۰، و ۳۰ دقیقه را نشان می‌دهند [۳].

نور تابشی از یک ذره منفرد با حجم ذره در ارتباط است. از آنجا که تعامل تابش الکترومغناطیس برای ذرات کوچک در تابش نور ضعیف است، بیشتر نور تابشی انتقال داده می‌شود و قسمت کمی از آن پخش می‌شود.

#### ۶.۴ روش موازنه رسوب

در این روش سینی تعادل رسوب در نانوسیال تازه فرو می‌رود و وزن رسوب نانوذرات در طی یک پرپود زمانی مشخص اندازه‌گیری می‌شود. سپس جزء ذرات رسوب کرده در زمان مورد نظر از فرمول ۲ محاسبه می‌شود؛  $W_0$  وزن کل نانوذرات در آن بازه زمانی و  $W$  وزن نانوذرات رسوب کرده در بازه زمانی مورد نظر است.

قوی و غیرعادی در دیواره ظرف، انرژی ناشی از میکرو حباب‌هایی که به وسیله کاپیتاسیون شکل می‌گیرند، و نرخ برش بالای جریان است. شماتیک این دستگاه در شکل ۶ دیده می‌شود [۱۹]. امکان دسترسی به اختلالگر اولتراسونیک به نسبت آنچه هوانگ ارائه کرد بیشتر است.

#### ۴ ابزارهای بازرسی پایداری نانوسیالات

با وجود اینکه موضوع پایداری نانوسیالات یکی از فاکتورهای موثر است، تحقیقات کمی راجع به تخمین پایداری نانوسیالات صورت گرفته است. بعضی از ابزارها و روش‌ها وجود دارند که می‌توانند پایداری نسبی نانوسیال را تخمین بزنند؛ برای حصول نتایج منطقی نیاز به استفاده از چند روش است و نباید به یکی از این روش‌ها اکتفا کرد. اینجا چند مورد از این روش‌ها را بررسی می‌کنیم.

#### ۱.۴ اسپکتروفتومتر (Ultra Violet Visible UV-Vis)

نتایج این دستگاه برای توصیف کمی پایداری کلئیدی سوسپانسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از مشخصه‌های این دستگاه توانایی عمل برای تمام سیالات مینا (پایه) است. این روش از این قانون استفاده می‌کند که شدت نور به وسیله جذب یا پخش آن از طریق سیال تغییر می‌کند. پایداری سوسپانسیون اغلب به شکل اندازه‌گیری حجم ته‌نشین شده بر حسب زمان ته‌نشینی بررسی می‌شود. عیب این روش این است که برای نانوسیالات با غلظت بالا، به خصوص محلول نانوتیوب‌های کربنی، مناسب نیست.

#### ۲.۴ تست پتانسیل زتا

یکی از مهم‌ترین روش‌های یافتن کیفیت پایداری نانوسیال از طریق رفتار الکتروفرتیک (حرکت ذرات یک محلول کلئیدی بر اثر جریان الکتریسته) آن است. بر اساس یک تئوری پایداری، اگر پتانسیل زتا دارای مقدار مطلق بالایی باشد، دافعه الکتروستاتیک بین ذرات افزایش می‌یابد که این منجر به پایداری خوب سوسپانسیون می‌شود. ذراتی که بار سطحی بالایی دارند تمایلی به تشکیل خوشه ندارند. معمولاً سوسپانسیون‌های با مقدار مطلق پتانسیل زتای بالای ۳۰ mV از لحاظ پایداری سوسپانسیون خوبی به شمار می‌روند. مشکل این روش این است که آنالیزهای آن برای ویسکوزیته سیال مینا محدودیت‌هایی دارد.

#### ۳.۴ عکس برداری از رسوب

این روش به این شکل است که پس از آماده شدن سوسپانسیون، از آن طی زمان‌های مختلف عکس گرفته می‌شود و میزان رسوب مشخص می‌شود.

#### ۴.۴ روش SEM و TEM

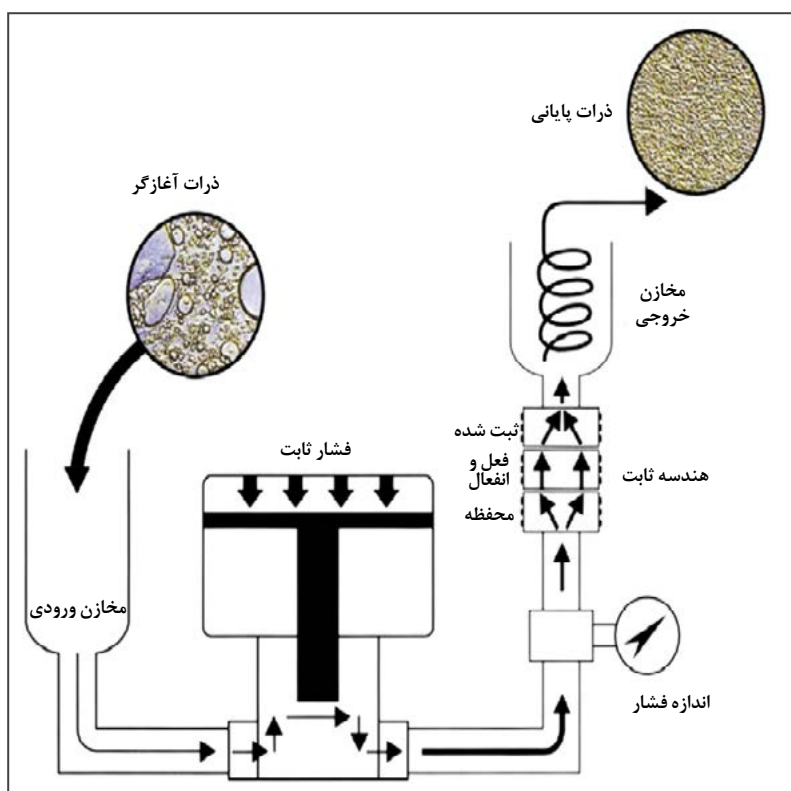
میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و

میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از ابزارهای بسیار مفید برای تشخیص شکل، اندازه، و توزیع ذرات نانوسیال هستند. با وجود این، نمی‌توانند وضعیت واقعی نانوذرات را در نانوسیال وقتی که نمونه‌های خشک شده مورد نیاز است نشان دهند. میکروسکوپ‌های الکترونی کرایوژنیک (مطالعه رفتار مواد در دماهای خیلی پایین) ممکن است بتوانند این مشکل را حل کنند، به شرطی که میکروساختار نانوسیال طی فرایند کرایوژنیک تغییر نکند.

#### ۵.۴ روش پراکنش نور

در این متد از تجزیه و تحلیل ذره منفرد برای تصویر ساختار مولکول پلیمر در محلول یا ذرات موجود در سوسپانسیون استفاده شده است. شدت

نانوسیال پایدار است. همان‌طور که گفته شد، روش تهیه نانوسیال بر میزان پایداری آن اثر می‌گذارد. روش دومرحله‌ای مستعد تجمع ذرات است. همچنین، برای معادل شدن ضریب هدایت حرارتی آن با روش تک‌مرحله‌ای نیاز به غلظت بالاتری از نانوذرات دارد و غلظت بالاتر موجب افزایش احتمال تشکیل خوشه و کاهش پایداری نانوسیال و نهایتاً رسوب می‌شود. با وجود این، متأسفانه روش تک‌مرحله‌ای امکان عمل در مقیاس انبوه را ندارد. روش‌های شیمیایی و فیزیکی متفاوتی برای ایجاد پایداری در سوسپانسیون ارائه شده است که از بین آن‌ها می‌توان به تغییر اسیدیته، استفاده از سورفکتانت‌ها، و ارتعاش مافوق صوت اشاره کرد. ارتعاش اولتراسونیک از ابزارهای قدرتمند شکستن تجمع ذرات است. در استفاده از آن‌ها نمی‌تواند پوشش لازم را برای ایجاد نیروهای دافعه الکترواستاتیک و جبران نیروهای جاذبه واندروالس بین ذرات فراهم کند. از طرفی، مقدار زیاد آن نیز ممکن است بر خواص حرارتی نانوسیال اثر منفی بگذارد. در ضمن، در دماهای بالا (بیشتر از ۶۰ درجه سانتی‌گراد) ممکن است پیوند نانوذرات و سورفکتانت آسیب دیده و موجب از بین رفتن پایداری سوسپانسیون شود. تغییر اسیدیته نیز یکی از روش‌های تاثیرگذار در ایجاد سیال یکنواخت است. هرچه pH محلول از نقطه ایزوالکتریک فاصله بگیرد، چگالی بار سطحی ذرات و مقدار مطلق پتانسیل زتا افزایش می‌یابد و نانوسیال پایداری بیشتری کسب می‌کند. برای حصول نتایج منطقی در مورد پایداری سوسپانسیون نباید به استفاده از یکی از این متدها اکتفا کرد.



شکل ۶. شماتیک دستگاه هموژنایزر فشار بالا برای تولید نانوسیال [۱۹].

در محدوده وسیعی از کسرهای حجمی نانوذرات مشخص می‌شود. دامنه استفاده از این روش در تحقیقاتی که تا کنون انجام گرفته محدود است.

#### نتیجه‌گیری

این مقاله شامل مروری بر روش‌های تهیه

$$F_s = \frac{W_o - W}{W_o} \quad \text{معادله (۲)}$$

#### ۷.۴ روش امگا - ۳

در این روش پایداری کلئیدی نانوسیال از طریق یافتن نمو تغییرات ضریب هدایت حرارتی

#### منابع

1. A. Ghadimi, R. Saidur, H.S.C. Metselaar, International Journal of Heat and Mass Transfer, 54, 4051-4068 (2011).
2. X.F. Li, D.S. Zhu, X.J. Wang, N. Wang, J.W. Gao, H. Li, Thermochimica Acta 469, 98-103(2008).
3. H. Chang, C. Jwo P. Fan, S. Pai, Int. J. Adv. Manuf. Technol., 34, 300-306 (2007).
4. Y. Hwang, J. Lee, J. Lee, Y. Jeong, S. Cheong, Y. ChullAhn, S. Kim, Technology, 186, 145-153.(2008).
5. H. Chang, Y.C. Wu, X.Q. Chen, M.J. Kao, Fabrication of Cu Based Nanofluid with Superior Dispersion, 2006.
6. P.C. Hiemenz, M. Dekker, Principles of colloid and surface chemistry, Seconded., Dekker, New York, 1986.
7. H. Xie, H. Lee, W. Youn, M. Choi, J. Appl. Phys., 94 (8), 4967-4971(2003).
8. D. Wu, H. Zhu, L. Wang, L. Liua, Curr. Nanosci., 5, 103-112(2009).
9. علی‌اصغر حمیدی، آزاده امراللهی، علی‌مراد رشیدی، عبدالرضا مقدسی، سیدمسعود حسینی، مجله مهندسی شیمی ایران، جلد ۸، شماره ۴۰ (۲۰۰۹).
10. Y. Hwang, H.S. Park, J.K. Lee, W.H. Jung, Curr. Appl Phys., 6, 367-371(2006).
11. H. Zhu, C. Zhang, Y. Tang, J. Wang, B. Ren, Y. Yin, Carbon, 45 (1), 226-228(2007).
12. E.V. Timofeeva, A.N. Gavrilov, J.M. McCloskey, Y.V. Tolmachev, S. Sprunt, L.M. Lopatina, J.V. Selinger Phys. Rev. E 76 (6) 061203(2007).
13. J. Philip, P.D. Shima, B. Raj, Appl. Phys. Lett., 91(20), 203103-203108(2007).
14. I. Pacheco, C. Buzea, Nanomaterial and Nanoparticles, Biointerphases, 2, 17-71 (2007).
15. S. Ozerinc, S. Kakac, A. YaziciogLu., Nanofluid, 8 (2), 145-170(2010).
16. W. Evans, R. Prasher, J. Fish, P. Meakin, P. Phelan, P. Keblinski, Int. J. Heat Mass Transfer 51, 1431-1438(2008).
17. K.S. Hong, T.K. Hong, H.S. Yang, Appl. Phys. Lett., 88 (3), 1-3(2006).
18. P. E. Gharagozloo, K.E. Goodson, J. Appl. Phys., 108( 7), 74- 82 (2010).
19. Hui-Jiuan Chen, Dongsheng Wen, Nanoscale Research Letters, 6:198 (2011)