

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشکده مهندسی مکانیک
گروه تبدیل انرژی

مدلسازی عددی انتقال حرارت جریان نانوسیال بین دو صفحه موازی

دانشجو :

رضا عادل‌فر

استاد راهنما:

دکتر محمد محسن شاه مردان

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

اردیبهشت ماه ۱۳۸۹

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده :

گروه :

پایان نامه کارشناسی ارشد (رساله دکتری) آقای / خانم

تحت عنوان:

(رساله دکتری

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

(مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

مراتب سپاس و تقدیر بی پایان خود را به محضر استاد فاضل و ارجمند

جناب آقای دکتر محمد محسن شاه مردان

عرض می نمایم.

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه (رساله) نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات ، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد .

ماه و سال

چکیده:

نانوسیال محلولی است از نانوذرات جامد به قطر ۱ تا ۱۰۰ نانومتر که در یک سیال پایه حل می شوند و انتقال حرارت را بهبود می بخشند. در این پایان نامه، جریان نانوسیال آب-مس به عنوان سیال خنک کننده مورد بررسی قرار گرفته است. بدین ترتیب که انتقال حرارت این سیال در یک کانال افقی با طول بینهایت و در حالت دو بعدی شبیه سازی شده است. دیواره های این کانال تحت شرایط متقارن حرارتی شار ثابت و دمای ثابت دیواره قرار می گیرند. معادلات حاکم پیوستگی، ممنتوم و انرژی برای جریان آرام و در حالت بی بعد با استفاده از روش حجم محدود و استفاده از قاعده توانی گسسته سازی می شوند. الگوریتم شناخته شده SIMPLER پاتانکار، برای حل این معادلات با رویه ضمنی و با استفاده از تکرار، به کار گرفته شده است. رسانایی گرمایی نانوسیال نیز تابعی از دماست. هم چنین این محاسبات در محدوده وسیعی از اعداد رینولدز ($20 < Re < 1500$) و درصد های حجمی مختلف ($0 \leq \varphi \leq 0.05$) انجام شده اند. مشاهده می شود که با افزایش درصد حجمی ذرات جامد، نرخ انتقال حرارت نیز افزایش می یابد. گرمایش توسط مقاومت الکتریکی، تشعشع و انرژی هسته ای در رآکتورهای هسته ای از مصادیق کاربرد عملی شرط مرزی گرمایی شار حرارتی ثابت دیواره و همچنین مواردی از مبدل های حرارتی مانند تبخیر کننده ها و کندانسورها، دمای ثابت سطح را به عنوان شرط مرزی حرارتی دیواره به خود می بینند.

فهرست مطالب

فصل اول

۱	مقدمه
۳	۱-۱ رسانایی گرمایی نانوسیال
۹	۲-۱ افزایش انتقال حرارت جابجایی
۱۰	۳-۱ آنالیز تئوری افزایش انتقال حرارت با استفاده از نانوسیال

فصل دوم

	مقدمه
۲۷	۱-۲ بررسی شرایط کلی مسأله
۲۸	۲-۲ هندسه مساله
۲۹	۳-۲ معادلات حاکم
۳۰	۱-۳-۲ پارامترها و معادلات بی‌بعد
۳۲	۴-۲ شرایط مرزی
۳۲	۱-۴-۲ شرط ورود جریان
۳۳	۲-۴-۲ شرط خروج جریان
۳۵	۳-۴-۲ شرط مرزی عدم لغزش روی دیواره
۳۵	۴-۴-۲ شرایط مرزی گرمایی روی دیواره‌ها
۳۶	۵-۲ ویسکوزیته دینامیکی مؤثر نانوسیال

۳۷	۶-۲	رسانایی گرمایی نانوسیال
۴۰	۷-۲	محاسبه عدد ناسلت بی‌بعد روی صفحه
۴۱	۱-۷-۲	حالت شار ثابت دیواره
۴۱	۲-۷-۲	حالت دمای ثابت دیواره
۴۲	۸-۲	محاسبه تنش برشی بی‌بعد روی سطح
۴۳	۹-۲	سایر خواص ترموفیزیکی نانوسیال

فصل سوم

مقدمه

۴۵	۱-۳	معادلات دیفرانسیل حاکم
۴۶	۱-۱-۳	معادله بقای جرم
۴۶	۲-۱-۳	معادله مقدار حرکت
۴۷	۳-۱-۳	معادله انرژی
۴۸	۲-۳	معادله دیفرانسیل کلی
۴۸	۳-۳	مفهوم انفصال
۴۹	۱-۳-۳	ساختمان معادله انفصال
۵۰	۲-۳-۳	روش های به دست آوردن معادلات انفصال
۵۰	۱-۲-۳-۳	فرمول بندی با استفاده از سری تیلور
۵۰	۲-۲-۳-۳	روش باقیمانده های وزنی
۵۱	۳-۲-۳-۳	فرمول بندی با استفاده از حجم کنترلی
۵۴	۴-۲-۳-۳	رفتار جمله چشمه

۵۵	چهار قاعده اصلی در روش حجم محدود	۵-۲-۳-۳
۵۶	مکان وجوه حجم کنترلی	۶-۲-۳-۳
۵۹	جابجایی و پخش	۴-۳
۶۰	روشهای گسسته سازی مولفه های جابجایی	۱-۴-۳
۶۰	روش بالا دست	۱-۱-۴-۳
۶۱	روش نمایی	۲-۱-۴-۳
۶۳	روش پیوندی	۳-۱-۴-۳
۶۵	روش قاعده توانی	۴-۱-۴-۳
۶۶	جزئیات به دست آوردن معادله انفصال	۵-۳
۶۸	معادله انفصال نهایی	۶-۳
۶۹	محاسبه میدان سرعت و فشار	۷-۳
۷۰	نشان دادن جمله گرادیان	۱-۷-۳
۷۲	نمایش معادله پیوستگی	۲-۷-۳
۷۳	شبکه جابه جا شده	۳-۷-۳
۷۵	معادلات مقدار حرکت	۴-۸-۳
۷۷	تصحیح فشار و سرعت	۵-۷-۳
۷۸	معادله تصحیح فشار	۶-۷-۳
۷۹	الگوریتم سیمپل	۸-۳
۸۰	استفاده از زیر تخفیف و فوق تخفیف در معادلات انفصال	۹-۳
۸۱	الگوریتم اصلاح شده ی سیمپل	۱۰-۳

۸۱	معادله فشار	۱-۱۰-۳
۸۳	الگوریتم سمیپلر	۲-۱۰-۳
۸۴	حل دستگاه معادلات خطی	۱۱-۳
۸۶	اعمال شرایط مرزی در فرم گسسته معادلات	۱۲-۳
۹۰	شرایط مرزی برای معادله تصحیح فشار	۱۳-۳
۹۰	معلوم بودن فشار در رمز	۱-۱۳-۳
۹۰	معلوم بودن سرعت عمود بر رمز	۲-۱۳-۳

فصل چهارم

۹۱	مقدمه	
۹۱	سیال خالص ($\emptyset = 0$)	۱-۴
۹۱	شبکه بندی	۱-۱-۴
۹۳	بررسی نتایج سیال خالص	۲-۱-۴
۱۰۲	نتایج نانوسیال مس-آب	۲-۴
۱۰۲	بررسی رفتارهای هیدرودینامیکی	۱-۲-۴
۱۰۷	شرط مرزی شار حرارتی ثابت دیواره	۲-۲-۴
۱۱۲	شرط مرزی دمای ثابت دیواره	۳-۲-۴
۱۱۸	پیوست الف	
۱۲۱	منابع	

فهرست شکل ها

۴	ساختار نانوسیال	(۱-۱)
۶	تغییرات نسبت رسانایی گرمایی با نسبت حجمی ذره برای نانوسیال آب-اکسید آلومینیوم	(۲-۱)
۲۸	جریان بین دو صفحه تخت موازی	(۱-۲)
۳۴	انرژی های وارد شده به سیستم	(۲-۲)
۴۰	نتایج آزمایشات انجام شده توسط "زوان" برای نانوسیال آب-مس	(۳-۲)
۴۵	موازنه شار روی حجم کنترلی	(۱-۳)
۵۳	دسته گره استفاده شده برای مسأله یک بعدی	(۲-۳)
۵۳	دو فرض ساده برای پروفیل (الف) پروفیل پله ای و (ب) پروفیل خطی قطعه به قطعه	(۳-۳)
۵۷	رویه ی A: وجوه در وسط فاصله بین گره های مختلف	(۴-۳)
۵۸	رویه ی B: گره های شبکه در مراکز حجم های کنترلی	(۵-۳)
۶۳	تغییرات ضریب a_E نسبت به عدد پکله	(۶-۳)
۷۰	دسته گره سه تایی	(۷-۳)
۷۱	میدان فشار موج دو بعدی	(۸-۳)
۷۳	میدان سرعت موج	(۹-۳)
۷۴	مکان های جابه جا شده برای u و v	(۱۰-۳)
۷۵	حجم کنترلی برای u	(۱۱-۳)
۷۶	حجم کنترلی برای v	(۱۲-۳)

۷۸	حجم کنترلی برای معادله پیوستگی	(۱۳-۳)
۸۷	سرعت ها در وجوه حجم کنترل	(۱۴-۳)
۸۸	شرایط مرزی برای حجم کنترل u	(۱۵-۳)
۸۹	شرایط مرزی برای حجم کنترل v	(۱۶-۳)
۸۹	شرایط مرزی برای حجم کنترل T	(۱۷-۳)
۹۰	حجم کنترلی مرزی برای معادله تصحیح فشار- سرعت معلوم در مرز	(۱۸-۳)
۹۱	شبکه بندی بازه مساله، ۲۰۱×۳۱ گره	(۱-۴)
۹۲	تغییرات عدد ناسلت محلی روی صفحه در شبکه بندی های مختلف، $Re=۵۰۰$	(۲-۴)
۹۴	تغییرات RMS در تکرارهای متوالی برای u, v, p, T ، دقت خطا $۱۰^{-۷}$	(۳-۴)
۹۵	مقایسه حل تحلیلی و حل عددی در $Re=۵۰۰$ و $x^*=۸۵$	(۴-۴)
۹۶	کانتورها (الف) سرعت u (ب) سرعت v (پ) فشار p (ت) دما T ، شار حرارتی ثابت دیواره (ث) دما T ، دمای ثابت دیواره	(۵-۴)
۹۷	تغییرات عدد ناسلت محلی روی دیوار در اعداد رینولدز مختلف (الف) شار حرارتی ثابت دیواره (ب) دمای ثابت دیواره	(۶-۴)
۹۹	مقایسه حل عددی و تحلیلی عدد ناسلت محلی روی دیواره (الف) شار حرارتی ثابت دیواره (ب) دمای ثابت دیواره	(۷-۴)
۱۰۰	تغییرات دمای دیوار و دمای متوسط در طول کانال، $Re=۲۰۰$ (الف) شار حرارتی ثابت دیواره (ب) دمای ثابت دیواره	(۸-۴)
۱۰۱	تغییرات تنش برشی محلی روی صفحه	(۹-۴)
۱۰۳	خطوط جریان برای درصد های حجمی مختلف و $Re=۲۰$	(۱۰-۴)

۱۰۳	خطوط جریان برای درصد‌های حجمی مختلف و $Re=100$	(۱۱-۴)
۱۰۴	خطوط جریان برای درصد‌های حجمی مختلف و $Re=500$	(۱۲-۴)
۱۰۴	خطوط جریان برای درصد‌های حجمی مختلف و $Re=1500$	(۱۲-۴)
۱۰۵	تغییرات تنش برشی روی دیوار برای درصد‌های حجمی مختلف (الف) $Re=50$	(۱۳-۴)
	(ب) $Re=200$ (پ) $Re=1000$	
۱۰۶	تغییرات تنش برشی روی دیوار در اعداد رینولدز مختلف (الف) $\phi = 0.02$	(۱۴-۴)
	(ب) $\phi = 0.04$	
۱۰۶	توزیع تنش برشی متوسط روی دیوار در اعداد رینولدز و درصد‌های حجمی مختلف	(۱۵-۴)
۱۰۸	خطوط همدمای برای درصد‌های حجمی مختلف و $Re=20$	(۱۶-۴)
۱۰۸	خطوط همدمای برای درصد‌های حجمی مختلف و $Re=100$	(۱۷-۴)
۱۰۹	خطوط همدمای برای درصد‌های حجمی مختلف و $Re=500$	(۱۸-۴)
۱۰۹	خطوط همدمای برای درصد‌های حجمی مختلف و $Re=1500$	(۱۹-۴)
۱۱۰	تغییرات عدد ناسلت برای درصد‌های حجمی مختلف (الف) $Re=50$ (ب) $Re=1000$	(۲۰-۴)
۱۱۱	تغییرات عدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف (الف) $\phi = 0.02$ (ب) $\phi = 0.04$	(۲۱-۴)
۱۱۲	توزیع عدد ناسلت متوسط در اعداد رینولدز و درصد‌های حجمی مختلف	(۲۲-۴)
۱۱۳	خطوط همدمای برای درصد‌های حجمی مختلف و $Re=20$	(۲۳-۴)
۱۱۳	خطوط همدمای برای درصد‌های حجمی مختلف و $Re=100$	(۲۴-۴)
۱۱۴	خطوط همدمای برای درصد‌های حجمی مختلف و $Re=500$	(۲۵-۴)
۱۱۴	خطوط همدمای برای درصد‌های حجمی مختلف و $Re=1500$	(۲۶-۴)

- ۱۱۵ تغییرات عدد ناسلت برای درصدهای حجمی مختلف الف) $Re=50$ ب) $Re=1000$ (۲۷-۴)
- ۱۱۶ تغییرات عدد ناسلت در اعداد رینولدز مختلف الف) $\phi = 0.02$ ب) $\phi = 0.04$ (۲۸-۴)
- ۱۱۶ توزیع عدد ناسلت متوسط در اعداد رینولدز و درصدهای حجمی مختلف (۲۹-۴)

فهرست جدول ها

شماره	صفحه
(۱-۱)	۸
(۱-۴)	۹۵
(۲-۴)	۹۸
(۳-۴)	۹۸
(۳-۴)	۱۱۱
(۴-۴)	۱۱۵



فصل اول

مروری بر خواص نانوسیال

مقدمه

نانوسیال محلولی است از نانو ذرات جامد (به قطر ۱۰۰-۱ نانومتر) در یک سیال پایه که برای بهبود انتقال حرارت در آن سیال به کار می روند. سیالات مرسوم برای انتقال حرارت روغن، آب و اتیلن گلیکول هستند که از نظر انتقال حرارت بسیار ضعیف محسوب می شوند. زیرا رسانایی حرارتی این سیالات نقش بسیار مهمی در ضریب انتقال حرارت میان محیط و سطح انتقال حرارت بازی می کند. بنابراین روشهای متعددی برای بهبود رسانایی گرمایی این سیالات با انحلال ذرات در مقیاس نانو- میکرو یا ابعاد بزرگتر در آنها، شکل گرفته است.

وقتی که نانو ذرات جامد با مقیاس طولی بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر و رسانایی گرمایی بالا در سیال پایه حل می شوند (رسانایی گرمایی کم)، سیال پایه افزایش رسانش گرمایی و ضریب انتقال حرارت جابجایی را از خود نشان می دهند. رسانایی گرمایی ذرات از جنس فلزی و غیرفلزی مانند Al_2O_3 ، Cu ، SiO_2 ، TiO_2 حتی در غلظت های کم، منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت می شود. بنابراین افزایش رسانایی گرمایی مؤثر نانوسیال، افزایش انتقال حرارت را در قیاس با انتقال حرارت سیال معمولی باعث می شود. "چویی" نخستین کسی بود که واژه نانوسیال را برای سیالی که نانو ذرات در آن حل شده اند، به کاربرد. "چویی" و همکاران وی نشان دادند که افزودن مقدار کمی (کمتر از ۱٪ حجمی) از نانو ذرات به یک مایع معمولی، رسانایی گرمایی سیال را تقریباً تا ۲ برابر افزایش می دهد [۱،۲].

محققین زیادی مانند، "ماسودا"، "ژوان" و "لی"، "ژوان" و "روتزل"، اظهار داشتند که با افزودن نانو ذرات به سیال با غلظت کم (۱ تا ۵ درصد حجمی)، رسانایی گرمایی محلول بیش از ۲۰٪ افزایش خواهد یافت. [۳،۴،۵].

"استمن" و همکاران، در لایراتوار ملی آراگون، با انجام آزمایشات مقدماتی نشان دادند، افزودن حدود ۰.۵٪ حجمی CuO در سیال پایه آب در حدود ۰.۶۰٪ باعث افزایش رسانایی گرمایی می‌شود. ضریب انتقال حرارت به عنوان فاکتور مهم مورد محاسبه در جابجایی‌های اجباری فرآیند سرمایش و گرمایش در مبدل‌های حرارتی و سسیستم‌های مونو کاربرد دارد. [۷]

چنین افزایشی به طور ویژه‌ای به عواملی چون غلظت حجمی ذرات، جنس ذرات، اندازه ذرات، شکل ذرات، دمای سیال پایه و سایر مکمل‌ها بستگی دارد. نانو ذرات که در نانو سیال‌ها استفاده می‌شوند، از بسیاری متریکال‌ها و مواد گوناگون با سنتزهای شیمیایی و فیزیکی تهیه می‌شوند. روش‌های فیزیکی متداول شامل روش‌های "کوبش مکانیکی"^۱ و تکنیک "چگالش راکد گاز"^۲ می‌باشد. [۸]

روش خاصی دیگری که در حال حاضر برای تهیه نانو ذرات فلزی استفاده می‌شوند، "کوبیدن مکانیکی"، تکنیک "چگالش راکد گاز"، "ته نشینی شیمیایی"^۳، "تجزیه شیمیایی بخار"^۴، "میکرو امولسیون"^۵، "آتشکافت پاششی"^۶ و "پاشش حرارتی"^۷ است. نانو ذرات از متریکال‌هایی عموماً در فرم پودر تولید می‌شوند. در فرم پودری، نانو ذرات می‌توانند در مایع‌های آلی یا آبی حل شوند و نانوسیال را برای کاربردهای خاص به وجود آورند. تاکنون، نانوسیالات با کیفیت‌های مختلف به طور گسترده از طریق حجم‌های کم و توسط تکنیک‌های دو مرحله‌ای و یک مرحله‌ای تولید شده‌اند. این تکنیک‌ها به طور لحظه‌ای پودر را تولید و مستقیماً آن را در سیال پایه حل می‌کند. تولید نانوسیالات کاملاً حل شده، در مقیاس بالا و قیمت پایین، برای مصارف تجاری مورد نیاز است. [۹]

1- Mechanical Grinding
 2- Inert-Gas-Condensation Technique
 3- Chemical Precipitation
 4- Chemical Vapor Deposition
 5- Micro-Emulsions
 6- Spray Pyrolysis
 7- Thermal Spraying

۱-۱ رسانایی گرمایی^۱ نانوسیال

از آنجایی که نانوذراتی با رسانایی گرمایی بالا، درسیال پایه ای با رسانایی گرمایی پایین حل می‌شوند، به طور قابل توجهی رسانایی گرمایی آن سیال را افزایش می‌دهند. محققین مدل‌های زیادی برای محاسبه میزان افزایش رسانایی گرمایی ارائه داده اند و آزمایش‌های زیادی را برای مقایسه نتایج عملی و تئوری انجام گرفته است. اما هنوز تحقیقات زیادی برای پیشگویی رفتار نانوسیال مورد نیاز است. البته اکنون تعدادی رابطه تجربی برای محاسبه رسانایی گرمایی موثر مخلوط‌های دوفازی وجود دارد.

در کتب و نوشته‌های مختلف، نسبت افزایش رسانایی گرمایی، با نسبت رسانایی گرمایی نانو سیال به رسانایی گرمایی سیال پایه معرفی می‌گردد ($\frac{K_{eff}}{k_L}$). محققین، مدل‌های رسانایی گرمایی خود را بر مبنای تحقیقات کلاسیک ماکسول توسعه داده اند. کسی که انتقال حرارت به روش هدایت را در یک جسم ناهمگن مورد بررسی قرار داد. رسانایی گرمایی مؤثر برای یک مخلوط دوفازی متشکل از فاز پیوسته و گسسته توسط ماکسول مورد بررسی قرار گرفت و رسانایی گرمایی موثر آن، k_{eff} ، توسط رابطه زیر ارائه شد [۸]:

$$K_{eff,Maxwell} = \frac{2k_2 + k_1 + \varphi(k_2 - k_1)}{2k_2 + k_1 - 2\varphi(k_2 - k_1)} k_1 \quad (1-1)$$

که k_1 و k_2 به ترتیب رسانایی گرمایی مایع و ذرات و φ نسبت حجمی ذرات هستند. ماکسول فرضیه خود را بر مبنای فاز گسسته، شکل کروی ذرات و این که رسانایی حرارتی نانو سیال به ذرات کروی، سیال پایه و نسبت حجمی ذره وابسته باشد، ارائه داد. "همیلتن" و "کروسر"، یافته‌های ماکسول را برای ذرات غیرکروی توسعه دادند و ضریب شکل (n) را معرفی کردند که می‌تواند به صورت تجربی برای مواد گوناگون محاسبه شود. هدف تحقیقات آن‌ها رسیدن به مدلی بود که تابعی از شکل ذره، ترکیب و رسانش

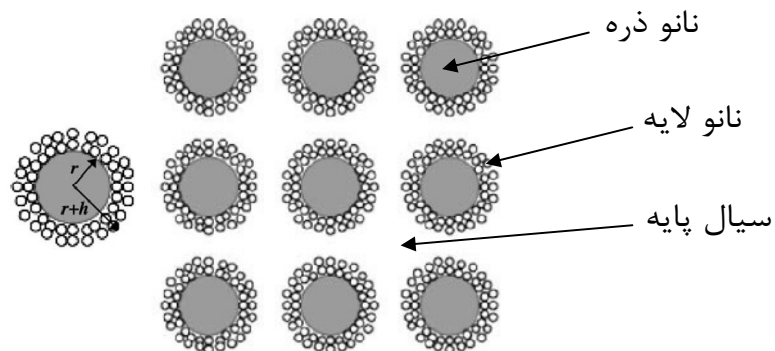
¹- Thermal Conductivity

هر دو فاز پیوسته و گسسته باشد. مدل همیلتن و کروسر برای فاز گسسته (ذره) که در یک فاز پیوسته حل شود چنین این است [۸]:

$$k_{eff,Hamilton-crosser} = k_1 \left[\frac{k_2 + (n-1)k_1 - (n-1)\varphi(k_1 - k_2)}{k_2 + (n-1)k_1 + \varphi(k_1 - k_2)} \right] \quad (2-1)$$

که ضریب شکل تجربی n با $n = \frac{3}{\Psi}$ تعریف می شود و Ψ ، کرویت، به عنوان نسبت مساحت کره ای با حجم برابر آن ذره، به سطح آن ذره تعریف می شود. مدل همیلتون-کروسر وقتی که $\Psi = 1$ باشد به مدل ماکسول کاهش می یابد و با نتایج آزمایشی به دست آمده $\varphi < 30\%$ مطابقت دارد. این مدل تا زمانی معتبر است که رسانایی ذره حداقل تا ۱۰۰ بار بیشتر از رسانایی فاز پیوسته باشد. هر چند که آزمایشات نشان می دهند که این مدل در پیش بینی رسانایی گرمایی مناسب است، اما تأثیرات اندازه نانو ذرات در آن نادیده گرفته شده است.

”یو“ و ”چویی“ مدل ماکسول را با این فرض تعمیم دادند که مولکول های سیال که نزدیک به سطح جامد نانوذرات هستند، یک ساختمان لایه ای جامد شکل داشته باشند. بنابراین این نانولایه به عنوان یک پل حرارتی میان سیال مایع پایه و نانوذرات است که باعث افزایش رسانایی گرمایی موثر می شود. همان طور که از شکل (۱-۱) بر می آید، نانو سیال متشکل از سیال مایع پایه، نانوذرات جامد و نانولایه ها می باشد [۱۰].



شکل (۱-۱) ساختار نانوسیال