



مؤسسه آموزش عالی غیر دولتی غیر انتفاعی انرژی

ارائه مدلی جهت پیش بینی هدایت الکتریکی و حرارتی نانوسیالات $\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3$ با استفاده از نرم افزار متلب

پایان نامه یا رساله برای دریافت درجه کارشناسی ارشد « M.Sc »

در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

نام دانشجو

حامد شریعتی

اساتید راهنما:

دکتر سید ایمان واصفی

دکتر حیدر مداح

اسفند ۱۳۹۸

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب **حامد شریعتی** به شماره دانشجویی **۳۰۴۶** دانشجوی رشته مکانیک - تبدیل انرژی مقطع تحصیلی **کارشناسی ارشد** تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری‌شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم (قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی...) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض درخصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسئولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسئولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی: حامد شریعتی

امضا و تاریخ:

مجوز بهره‌برداری از پایان‌نامه

بهره‌برداری از این پایان‌نامه در چهارچوب مقررات کتابخانه و با توجه به محدودیتی که توسط

استاد راهنما به شرح زیر تعیین می‌شود، بلامانع است:

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله برای همگان بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله با اخذ مجوز از استاد راهنما، بلامانع است.

☐ بهره‌برداری از این پایان‌نامه/ رساله تا تاریخ ۹۸/۱۲/۰۱ ممنوع است.

نام استاد یا اساتید راهنما:

تاریخ:

امضا:

تقدیم و قدردانی به

به مصداق ((لم یسکر المخلوق لم یسکر الخالق)) بسی شایسته است از استاد فریخته و فرزند جناب آقای
سید ایمان واصفی و جناب آقای حیدر مداح که با کرامتی چون خورشید سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن
سرای علم و دانش را بارانهای مایه کار ساز و سازنده بارور ساختند تقدیر و تشکر نمایم.

چکیده

تحقیقات در مورد هدایت الکتریکی سیالات تقویت شده توسط نانوذرات در حال حاضر در ابتدای راه است و سازوکارهای تقویت کاملاً درک نشده‌اند. نتایج بررسی اندازه نانو کامپوزیت ZnO-Al₂O₃ نشان داد که تمامی نمونه‌ها در محدوده نانو قرار دارند. درباره اندازه گیری رسانایی الکتریکی و حرارتی موثر سوسپانسیونهای آبی نانوذرات اکسید آلومینیوم و تیتانیوم (نانوسیالات) نیز چینی می‌باشد. آزمایشات هم بعنوان تابعی از جزء حجمی و هم هم دما انجام گرفتند تا آثار تغییرات این متغیرها بر روی رسانایی الکتریکی و حرارتی نانوسیالات مورد امتحان قرار گیرد. نتایج نشان دهنده افزایشی قابل ملاحظه در رسانایی الکتریکی چه در صورت افزایش جزء حجمی و چه دما هستند. با این وجود، وابستگی رسانایی موثر الکتریکی به دما بسیار کمتر از جزء حجمی است. در نهایت برای پیش بینی خواص الکتریکی از شبکه‌های عصبی استفاده شد. بدین منظور شبکه عصبی با ساختار پرسپترون چند لایه برای تدوین مدل برآورد خواص الکتریکی به کارگرفته شد. برای طراحی ساختار مدل، با تغییر پارامترهای قابل تنظیم، (شامل تابع انتقال، قانون آموزش، مقدار مومنتم، تعداد لایه پنهان، تعداد نرون لایه پنهان) شبکه‌های عصبی مختلف ساخته و اجرا شد. در هر مورد، ساختاری که بیشترین مقدار ضریب همبستگی را داشت به عنوان مدل نهایی انتخاب گردید.

کلمات کلیدی: هدایت الکتریکی، نانوسیالات ZnO-Al₂O₃، اکسید آلومینیوم، تیتانیوم

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول کلیات تحقیق.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- اهداف اصلی و کاربردی تحقیق.....	۲
۳-۱- جنبه نوآوری تحقیق.....	۳
۴-۱- روش تحقیق و گردآوری اطلاعات.....	۳
فصل دوم پیشینه تحقیق.....	۴
۱-۲- مقدمه.....	۵
۲-۲- مروری بر پیشینه مطالعاتی تحقیق.....	۵
۳-۲- مدل‌های نظری برای هدایت الکتریکی.....	۷
۴-۲- بررسی ادبیات تحقیق.....	۸
۵-۲- نانوسیالات با سیال پایه اتیلن گلیکول (EG).....	۱۲
۱-۵-۲- نانوسیالات با آب به عنوان سیال پایه.....	۱۴
۲-۵-۲- نانوسیالات با مخلوط آب اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه.....	۱۸
۳-۵-۲- نانوسیالات بر اساس سایر سیالات.....	۲۰
۴-۵-۲- نانوسیال‌های مبتنی بر بیوگلیکول.....	۲۰
۵-۵-۲- نانوسیالات بر پایه روغن.....	۲۱
۶-۲- بحث در مورد نتایج تجربی.....	۲۱
۱-۶-۲- تأثیر غلظت نانوذرات بر رسانایی الکتریکی.....	۲۱
۲-۶-۲- تأثیر سیال پایه در رسانایی الکتریکی.....	۲۶
۳-۶-۲- تأثیر دما بر رسانش الکتریکی.....	۲۷
۴-۶-۲- عوامل دیگری که بر هدایت الکتریکی تأثیر می‌گذارد.....	۲۹
۵-۶-۲- هدایت الکتریکی - روشی برای برآورد پایداری؟.....	۳۰
فصل سوم مواد و روش کار.....	۳۱
۱-۳- اندازه گیری رسانایی موثر الکتریکی نانوسیالات:.....	۳۲
۲-۳- تهیه نانوسیالات.....	۳۲
۳-۳- نتایج و بحث.....	۳۴

فصل چهارم مدل سازی و بررسی نتایج.....	۴۳
۴-۱- شبکه عصبی بازخورد رو به جلو.....	۴۴
فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادها.....	۵۰
۵-۱- نتیجه گیری.....	۵۱
۵-۲- پیشنهادات و مسیرهای آینده برای تحقیق.....	۵۲
فهرست منابع.....	۵۴

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲- خلاصه تحقیق تجربی روی هدایت الکتریکی مواد نانوسیال.....	۹
جدول ۲-۲- خلاصه چند کار تجربی در زمینه هدایت الکتریکی سیالات مبنای.....	۱۲
جدول ۳-۲- خلاصه‌ای از پژوهش‌های تجربی درباره تغییر هدایت الکتریکی با دما.....	۲۸
جدول ۱-۳- داده‌های آزمایشگاهی هدایت حرارتی نانوسیالات در دماهای مختلف و کسر حجمی گوناگون.....	۳۵

فهرست نمودارها

عنوان	صفحه
نمودار ۳-۱- مقایسه داده‌های تئوری هدایت حرارتی با داده‌های آزمایشگاهی.....	۳۶
نمودار ۳-۲- مقایسه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آزمایشگاهی با ضریب هدایت حرارتی حاصل شده از مدل تئوری.....	۳۷
نمودار ۳-۳- رسانایی الکتریکی اندازه گیری شده آب بعنوان تابعی از دما.....	۳۸
نمودار ۳-۴- رسانایی موثر الکتریکی نانوسیال آلومینا.....	۳۸
نمودار ۳-۵- افزایش رسانایی الکتریکی نانوسیال آبی تغییر با دما در جزء حجمی‌های مختلف.....	۳۹
نمودار ۴-۱- بررسی مقایسه ای مقادیر پیش بینی شده ضریب هدایت الکتریکی توسط شبکه‌های عصبی و نتایج آزمایشگاهی (محور x (Target)): مقادیر آزمایشگاهی، محور (YOutput): مقادیر پیش بینی شده).....	۴۶
نمودار ۴-۲- نمودار توزیع خطا برای داده‌های ضریب هدایت الکتریکی نانوسیال (محور x تفاوت مقدار خطا بین نتایج آزمایشگاهی و پیش بینی شده، محور y تعداد داده).....	۴۷
نمودار ۴-۳- نمودار کارایی شبکه برای هدایت الکتریکی (تعداد تکرارها بر حسب مجموع مربعات خطا).....	۴۸
نمودار ۴-۴- بررسی میزان خطا و نوسانات شبکه.....	۴۸
نمودار ۴-۵ - مقایسه بین داده‌های واقعی و داده‌های پیش بینی شده به کمک شبکه.....	۴۹

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۲- هدایت الکتریکی نانوسیال آلومینا-آب.....	۲۲
شکل ۲-۲- هدایت الکتریکی اکسید نانوسیال آهن-آب.....	۲۳
شکل ۳-۲- مقایسه هدایت الکتریکی نانوسیالات مختلف یا ۰,۰۱٪ با انواع مختلف نانوذرات محلول در آب.....	۲۳
شکل ۴-۲- مقایسه هدایت الکتریکی با انواع مختلف نانوذرات.....	۲۴
شکل ۵-۲- مقایسه نتایج نانوسیالات آلومینا با سیالات پایه مختلف.....	۲۵
شکل ۱-۳- تصویر اندازه گیری رسانایی موثر الکتریکی.....	۳۲
شکل ۲-۳- تصاویر SEM نانوذرات (۲۰٪ وزنی برای آلومینا و ۸۰٪ برای روی) بعد از پراکندگی.....	۳۳
شکل ۳-۳- دستگاه ضریب هدایت حرارتی سنج.....	۳۴
شکل ۱-۴- معماری شبکه عصبی مصنوعی بازخورد روبه جلو.....	۴۴
شکل ۲-۴- توپولوژی و ساختار شبکه.....	۴۵

فصل اول

کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

نانوسیالات یک راه سریع برای بهبود قابلیت انتقال حرارت سیالات می باشد. آب معمولترین ترین سیال مورد استفاده برای تبادل حرارت می باشد. البته، درسیستم های تبرید، ممکن است لازم باشد آب با سیالات مختلفی ترکیب شود. با استفاده از همین روش در بویلرها یا مبدل های حرارتی صنعتی، می توان نقطه جوش آب را با مخلوط کردن آن با سیالات برپایه گلیکول، بالا برد. افزایش آگاهی در مورد صرفه جویی در مصرف انرژی و بهبود راندمان انرژی صنعتی منجر به علاقه فزاینده به سیالات برپایه اتیلن یا پروپیلن گلیکول برای کاربردهای مختلف در سیستم های حرارتی می شود. تحقیق حاضر یک بررسی گسترده از جدیدترین و مرتبط ترین مطالعات تجربی و عددی انجام شده روی خواص ترموفیزیکی و عملکرد نانوسیالات برپایه سیالات گوناگون را ارائه می دهد. چشم اندازهای تحقیق نیز با این هدف دراز مدت ارائه شده است که این نانوسیالات بیشتر در کاربردهای صنعتی واقعی مورد توجه قرار گیرند. به منظور درک بهتر در مورد تأثیر استفاده از نانوسیالات به عنوان مبرد یا تبادلگر گرما، اندازه گیری دقیق خواص سیالاتی و حرارتی نانوسیالات بسیار مهم است. اصلی ترین خواص ترموفیزیکی نانوسیالات، هدایت حرارتی، ویسکوزیته، چگالی و گرمای ویژه و هدایت الکتریکی آنهاست. در این تحقیق ما در پی بررسی اثرات کسرحجمی نانوذرات بر خواص حرارتی و الکتریکی سیالات می باشیم که این موضوع در دماهی مختلفی مورد بررسی قرار میگیرد. هدف مطالعه حاضر بررسی رسانایی موثر الکتریکی نانوذرات پایه آبی ZnO Al_2O_3 است. این امر با انجام آزمایشاتی در جزیهای حجمی مختلف از نانوسیالات محقق می شود. توجه خاصی به مطالعه اثر دما بر روی ویژگی های الکتریکی نانوسیالات مبدول گشته است. در اینجا قابل ذکر است که اثر تغییرات دمایی بر روی رسانایی موثر الکتریکی نانوذرات پایه آلومینا تابحال در متون گزارش نشده است. علاوه بر این، کار حاضر همچنین اهمیت نسبی تاثیر دما و جز حجمی نانوذرات بر رسانایی موثر الکتریکی نانوذرات آلومینا را آشکار میسازد. نتایج آزمایشی کار حاضر به محققان و مهندسان کمک میکند درک بهتری از ویژگیهای جابجایی نانوسیالات بدست آورند و در آینده به به مدلهای تئوریک برتری برسند.

۱-۲- اهداف اصلی و کاربردی تحقیق

۱. بررسی خواص ترموفیزیکی نانوسیالات

۲. بررسی رسانایی موثر الکتریکی نانوذرات

۳. بررسی اثرات کسرحجمی نانوذرات بر خواص حرارتی و الکتریکی سیالات

۴. پیش بینی خواص الکتریکی نانوسیالات با استفاده از شبکه‌های عصبی

۱-۳- جنبه نوآوری تحقیق

مقالات بی شماری در مورد هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیک نانوسیالات مختلف برپایه سیالات مختلف منتشر شده است. با این حال، مقالات با موضوع هدایت الکتریکی نانوسیالات بسیار محدود است. پژوهش حاضر فقط به مطالعات تجربی انجام شده در مورد خصوصیات ترموالکتریکی نانوسیالات می‌پردازد. زیرا با وجود تلاش‌های اساسی محققان تاکنون هیچ مدل تجربی یا تئوری در مقالات برای پیش بینی دقیق خواص الکتریکی نانوسیالات وجود ندارد. این امر می‌تواند به دلیل مکانیزم‌های مختلفی که در عملکرد نانوسیالات نقش دارند اما در مدل‌ها در نظر گرفته نشده است باشد.

۱-۴- روش تحقیق و گردآوری اطلاعات

از مقالات مروری داخل و خارج کشور و همچنین از کتب کتابخانه دانشگاه و پایان نامه‌های موجود جهت تکمیل فاز مطالعاتی تحقیق استفاده مینماییم.

به منظور ارزیابی خواص سیال و عملکرد انتقال حرارت و الکتریکی نانوسیالات، چگالی و ویسکوزیته باید معلوم باشد. با این حال، داده‌های محدودی برای نانوسیالات خصوصا برای نانوذرات هیبریدی موجود است. بیشتر محققان ترجیح می‌دهند از قانون مخلوط سیالات استفاده کنند.

چگالی را برای نانو ذرات ZnO ، Al_2O_3 پخش شده در سیال پایه آب با نسبت ۸۰:۲۰ و با غلظت‌های حجمی مختلف نانوذرات تا $\phi = 1\%$ و دماهای بین ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتیگراد اندازه گیری میکنیم. یک بررسی تجربی از خواص رئولوژیکی نانوذرات معلق در آب در دمای ۲۵ تا ۴۰ درجه سانتیگراد و غلظت حجمی ذرات تا ۱ درصد توسط Namburu و همکاران انجام شده است داده‌های خود را با داده‌های تئوری مقایسه و نتایج را بحث و بررسی مینماییم. و در نایت به کمک نرم افزار متلب به ارائه مدلی جهت پیش بینی خواص الکتریکی نانوسیالات میپردازیم که در شرایط آزمایشگاهی قادر به اندازه گیری آنها نبوده ایم.

فصل دوم

پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه

این بررسی به طور خاص تحقیقات اخیر را در مورد هدایت الکتریکی نانوسیال‌ها، روابط و سازوکارها بررسی می‌کند و قصد دارد که گام مهمی برای درک کامل رفتارهای نانوسیال بردارد. تحقیقات در مورد هدایت الکتریکی سیالات تقویت شده توسط نانوذرات در حال حاضر در ابتدای راه است و سازوکارهای تقویت کاملاً درک نشده اند. در اصل، سازوکارهای افزایش هدایت الکتریکی به عنوان تاثیر الکتریکی دولایه از نظر نفوذ و افزایش هدایت ذرات توصیف می‌شود. ایده دیگری که از این بررسی به وجود آمده این است که می‌توان پایداری نانوسیالات را با کمک تست‌های هدایت الکتریکی توصیف کرد، اما تحقیقات هماهنگ تری لازم است. هدف این مقاله تنها توصیف مطالعات فوق نیست، بلکه درک کامل رفتارهای نانوذرات و ارزیابی و ارتباط نتیجه چندین آزمایش درباره هدایت الکتریکی است. در نتیجه، این تحلیل نشان داده است که تحقیقات بسیاری در مورد مشخصه‌های الکتریکی نانوسیالات و کاربردهای خاص آنها مورد نیاز است.

۲-۲- مروری بر پیشینه مطالعاتی تحقیق

فرآیندهای تبادل گرما تقریباً برای همه فرآیندهای صنعتی از اهمیت عمده ای برخوردار هستند، و بنابراین بهینه بودن آنها از اهمیت بالایی برخوردار است. در چند دهه اخیر، دسته جدیدی از سیالات انتقال حرارتی، یعنی سیالات بهبودیافته با نانوذرات، توسعه داده شده است و به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفت. این دسته جدید از سیالات در واقع از سیالات انتقال حرارت معمولی بهبود داده شده با نانوذرات جامد تشکیل شده است، که معمولاً به عنوان نانوسیالات شناخته می‌شوند.

بعنوان سیال پایه، هر دو نوع سیال معمول و غیرمعمول در نظر گرفته شدند، و چند نمونه عبارتند از: آب، اتیلن گلیکول، روغن‌ها، مایعات یونی، روان کننده‌های اصلی و همچنین نمک‌های مذاب. از طرف دیگر، نانوذرات شامل فلزات، اکسیدها، نانولوله‌های کربنی، گرافن و چندین کامپوزیت هستند. ترکیب این دو فاز (یعنی نانوذرات مایع و جامد) علاقه زیادی در تحقیقات منتشر شده به دلیل کاربردهای ذاتی آنها در مبدل‌های حرارتی که در صنایع مختلف مانند اتومبیل (یعنی رادیاتور اتومبیل)، کولرها، رادیاتورها، یخچالها، در صنایع نفت و گاز (به

عنوان مثال، سرمایش و پیش گرم کردن مایعات)، جمع کننده‌های خورشیدی، صنایع الکترونیکی، هوانوردی و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرد، ایجاد کرده است [۱،۲].

با این وجود، همانطور که در تحقیقات به طور گسترده مشخص شده است، برخلاف خواص مخلوط‌های معمول که به سادگی با میانگین گیری از فازهای خالص آنها می‌توان خواص آنها را پیش بینی کرد، خواص ترموفیزیکی نانوسیالات این قاعده را رعایت نمی‌کنند.

اگر هدایت الکتریکی در نظر گرفته شود، این نویسنده معتقد است که این خاصیت کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است، حتی اگر برای چندین کاربرد صنعتی دارای اهمیت فوق العاده ای باشد. به عنوان مثال، معمولاً سیالات رساناهای ضعیف الکتریسیته هستند در حالی که چند مایع (به عنوان مثال: جیوه، آب دریا، فلزات مذاب، الکتrolیتها) هادی خوبی هستند. در چند سال اخیر، به خصوص به دلیل کاربردهای بی شمار این سیالات در مهندسی نظیر جت پلاسما، راکتور حرارتی هسته ای کنترل شده، شوک تیوبها، پمپ‌ها و ژنراتورهای مغناطیسی هیدرودینامیکی توجه زیادی به مطالعه سیالات هادی شده است [۳-۶].

هنوز هم کمبودهای بسیاری در توصیف علم جریان سیالات هادی الکتریکی وجود دارد و چنین کمبودهایی در زمینه موضوعات مگنتو هیدرودینامیک (MHD) مانند جریان‌های سیالات ناهمگن و چند فاز (یعنی نانوسیالات) و جریان‌های آشفته بیشتر است است [۳].

از از طرف دیگر، از آنجا که خنک کاری (قطعات) الکترونیکی به عنوان یکی از کاربردهای مهم نانوسیالات است، افزایش هدایت الکتریکی بر روی سیال پایه، به ویژه هنگامی که با هدایت حرارتی بالاتر همراه شده است، یک مزیت عمده محسوب می‌شود [۵]. در نتیجه، پوردنجان و همکاران [۱] در بررسی جامع خود استفاده از نانوذرات در مبدل‌های حرارتی تحت تأثیر میدان‌های الکتریکی را توصیه کردند و بنابراین بررسی رفتار الکتریکی نانوسیالات از اهمیت بالایی برخوردار است.

در نتیجه، هدف این بررسی خلاصه کردن تحقیقات در مورد هدایت الکتریکی است که از اهمیت ویژه ای، به ویژه برای کاربردهای سیستم‌های پردازش معدنی، سلول‌های سوختی، کاربردهای انتقال حرارت میدان الکتریکی و غیره (به عنوان مثال به پوردنجان و همکاران [۱] مراجعه کنید)، برخوردار است.

با توجه به اینکه، یک بررسی پیچیده در مورد هدایت الکتریکی در حال حاضر در دسترس نیست و علاقه به اندازه گیری این خاصیت تاکنون نسبتاً محدود بوده است. هدف از این تحقیق نه تنها توصیف مطالعات تجربی و نظری موجود است، بلکه به دنبال به دست

آوردن آگاهی بهتری از رفتار نانوسیالات و همچنین ارزیابی و ارتباط نتایج اخیر در مورد اندازه گیری هدایت الکتریکی است. بنابراین، نقطه شروع این بررسی خلاصه کردن مدل‌های نظری در دسترس برای هدایت الکتریکی است، که با تحقیقات تجربی کنونی انجام شده با توجه به تأثیر نوع سیال پایه، انتخاب نانوذرات و دمای بر تغییرپذیری هدایت الکتریکی همراه شده است.

۲-۳- مدل‌های نظری برای هدایت الکتریکی

بنیسی و همکاران [۷] بررسی بسیار خوبی در مورد هدایت الکتریکی پراکندگی‌ها انجام دادند که بعضی از مدل‌ها که برای تخمین خواص الکتریکی استفاده می‌شوند را خلاصه کردند. آنها معادلات موجود را توضیح دادند و توجه ویژه‌ای به مدل‌هایی که غلظت حجمی، توزیع شکل و اندازه فاز پراکنده جامد را در نظر می‌گیرند، به ویژه مدل‌های ماکسول [۸]، برگمن [۹] و فریک [۱۰] در مورد محدودیت هر روش را بحث کردند. به این معنا، یک شکل کوچک از مدل‌های نظری نقطه آغاز این بررسی خواهد بود و چند جنبه در رابطه با نتایج تجربی بیشتر مورد بحث قرار خواهد گرفت.

مدل ماکسول [۸] بیشتر برای نانوذرات کروی با غلظت کم کاربرد دارد و هدایت الکتریکی نانوسیال را به عنوان تابعی از هدایت الکتریکی نانوذرات و سیال پایه تخمین می‌زند [۷، ۸]:

$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{bf}} = 1 + \frac{3 \left(\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{bf}} \right) - 1 \right) \varphi}{\frac{\sigma_p}{\sigma_{bf}} + 2 - \left(\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_{bf}} \right) - 1 \right) \varphi} \quad (1-2)$$

کروز و همکاران بر اساس مدل کلاسیک ماکسول معادلات دیگری پیشنهاد کردند که به شرح زیر است:

$$\begin{aligned} \text{(i)} \quad \frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{bf}} &= 1 - \frac{3}{2} \varphi & \text{(برای } \sigma_p \ll \sigma_{bf} \text{ - ذرات عایق)} \\ \text{(ii)} \quad \frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{bf}} &= 1 & \text{(برای } \sigma_p = \sigma_{bf} \text{ - هدایت الکتریکی برابر)} \\ \text{(iii)} \quad \frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{bf}} &= 1 + 3\varphi & \text{(برای } \sigma_p \gg \sigma_{bf} \text{ - ذرات به شدت هادی)} \end{aligned} \quad (2-2)$$

موارد i تا iii اثر نظری کسر حجمی بر هدایت الکتریکی نسبی را، همانگونه که توسط مدل ماکسول پیش بینی شده است، نشان می‌دهد.

از سوی دیگر مدل برگمن به شکل زیر است [۹]:

$$1 - \varphi = \frac{\sigma_p - \sigma_{nf}}{\sigma_p - \sigma_{bf}} \left(\frac{\sigma_{bf}}{\sigma_{nf}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3-2)$$

به طور متقابل، می‌توان از معادلات ماکسول و برگمن برای تخمین هدایت الکتریکی استفاده کرد، اما کاربرد آنها در تحقیقات آزاد، همانطور که در بخش‌های بعدی مورد بحث قرار خواهد گرفت، بطور جدی مورد بررسی قرار گرفته است. از طرف دیگر، فریک [۱۰] حالت کلی محلول بیضوی‌های همگن را در نظر گرفت و مدل وی در واقع برای مدل ذرات کروی به مدل ماکسول کاهش می‌یابد. به همین دلیل است که این مدل به عنوان مدل پایه ای برای مقایسه در تحقیقات آزاد، که تقریباً تمام نانوذرات در نظر گرفته شده کروی هستند، در نظر گرفته نشده است (یعنی با برخی استثنائات، به عنوان انواع مختلف نانولوله‌های کربن).

۲-۴- بررسی ادبیات تحقیق

اهمیت تخمین هدایت الکتریکی در حدود ۳-۴ سال پیش که تحقیقات در مورد این موضوع به وضوح افزایش یافته بود، به طور جدی تر تشریح شده بود، بنابراین کارهای تجربی قابل توجهی در تحقیقات بایگانی نشده شناسایی نشده بود. این بررسی که کاملاً به هدایت الکتریکی نانوسیالات اختصاص داده شده است، در ابتدا سعی در جمع بندی و بحث در مورد خروجی‌های کارهای تجربی در این موضوع دارد. بر این اساس، جدول ۱-۲ جدیدترین و مرتبط ترین تحقیقات مربوط به هدایت الکتریکی، شامل جزئیات مربوط به سیال پایه، نوع نانوذرات و همچنین تجهیزات مورد استفاده برای آزمایش را تشریح می‌کند. جدول ۱-۲ که تا آنجا که این نویسنده می‌داند، شامل خلاصه برخی کارهای مقدماتی و تمام داده‌های در دسترس است، می‌تواند نقطه شروع بسیار خوبی برای تحقیقات آینده ارائه دهد.

جدول ۱-۲- خلاصه تحقیق تجربی روی هدایت الکتریکی مواد نانوسیال.

سیال مبنا	نوع نانوذره	مشاهده	اهمیت به عنوان نانوسیال رسانا، در صورت مقایسه با سیال مبنا	مرجع
Ethylene glycol (EG)	Nitrogen doped activated carbon/graphene (NACG)	با افزایش غلظت نمونه‌ها به طور چشم‌گیر زیاد می‌شود.	Yes	Shirazi et al. [12]
	MgO and Si-TiO	مطالعه نظری با استفاده از مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)	no information provided	Mohamed [13]
	β -SiC	مشخص شد که غلظت حجمی به صورت خطی تغییر می‌کند.	Yes	Akilu et al. [14]
	In ₂ O ₃	حداکثر رسانایی الکتریکی In ₂ O ₃ -EG در غلظت 0.0081 درصد و در دمای ۳۳۳،۱۵ کلوین، ۲۷،۳۰۰ درصد، مشاهده شد.	Yes	Fal et al. [15]
	Graphene	بهبود تا ۲۰ درصد	Yes	Baby and Ramaprabhu [16]
	nanodiamond	بیشترین بهبود رسانایی الکتریکی برای درصد حجمی ۰،۰۳۳۸ نانوذرات به دست آمد (۹۸ برابر بیشتر از EG).	Yes	Zyla et al. [17]
	Aluminium nitride	با افزایش ناگهانی غلظت نانوذرات هدایت الکتریکی تا ۶۰۰ برابر زیاد می‌شود	Yes	Zyla et al. [18]
	SiO ₂	تحلیل هدایت ترموالکتریکی (TEC) نشان داد که استفاده از این نانوسیال در فرآیندهای انتقال حرارتی منفعتی ندارد.	yes	Zyla et al. [19]
	Silicon oxide lignin (SiO ₂ -L)	با افزایش نسبت جرمی هدایت زیاد می‌شود.	yes	Fal et al. [20]
	Si ₃ N ₄	صعود زیاد هدایت الکتریکی به دلیل عوامل مختلف و از جمله به دلیل افزایش غلظت	yes	Zyla et al. [21]
	Al ₂ O ₃	بیشترین مقدار هدایت الکتریکی، ۲۳۷۰ μ S/cm، برای غلظت ۰،۲ درصد و در دمای ۲۵،۹ درجه سانتی‌گراد ثبت شد.	yes	Zawrah et al. [22]
	Fe ₃ O ₄	بهبود قابل توجه هدایت الکتریکی با افزایش ناگهانی غلظت و دما.	yes	Bagheli et al. [23]
	CuO	ارتقای هدایت الکتریکی با افزایش دما و غلظت حجمی.	yes	Coelho et al. [24]
	un-doped and zinc doped cobalt ferrite	مدل ماکسول مناسب نیست.	no promotion provided	Anu and Hemalatha [25]
water				

Shoghl et al. [26]	yes	روابط خطی توسط مولفان پیشنهاد شد.	Alumina CuO MgO CNT titania ZnO
Heyhat and Irannezhad [27]	yes	هدایت الکتریکی نانوسیال‌ها به صورت خطی با دما و غلظت زیاد می‌شود.	Ag SiC Graphene oxide (GO)
Nurdin and Satriananda [28]	yes	افزایش هدایت الکتریکی با افزایش دما و غلظت حجمی.	Fe ₂ O ₃
Mashali et al. [29]	no	هدایت الکتریکی نسبت به غلظت مشابه نانوسیال‌های دیگر کمتر بود.	diamond
Modesto-Lopez and Biswas [30]	yes	افزایش هدایت الکتریکی به افزودن نانوذره وابسته است.	TiO ₂
Baby and Ramaprabhu [16]	Yes	افزایش تا ۱۴۰۰ درصد	graphene
Zakaria et al. [31]	yes	۵٫۵ برابر افزایش هدایت الکتریکی نسبت به آب	Al ₂ O ₃
Hadadian et al. [32]	Yes	ارتقای هدایت الکتریکی	graphene oxide (GO)
Selimefendigil and Öztö [33]	no information provided	بین مدل‌های مختلف هدایت الکتریکی در زمینه مقادیر بالاتر عدد ریچاردسون عدم توافق مشاهده شد.	Al ₂ O ₃
Ganguly et al. [34]	yes	تقویت قابل ملاحظه هدایت الکتریکی متناسب با نسبت حجمی	Al ₂ O ₃
Minea and Luciu [35] Minea [36]	yes	برای نسبت آلومینیوم ۴ درصد در دمای اتاق ۳۷۹٫۶ درصد افزایش در هدایت الکتریکی موثر نانوسیال مشاهده شد.	Al ₂ O ₃
Sunder et al. [37]	no information provided	بین نتایج تجربی و مدل‌های سستی عدم سازگاری مشاهده شد.	ND-Ni nano-composite
Chereches and Minea [38]	yes	افزایش قابل توجه هدایت الکتریکی مشاهده شد، به علاوه به سینرژی نانوذرات نیز وابسته است.	TiO ₂ SiO ₂ Alumina + titania hybrid alumina + silica hybrid
Islam et al. [39] Islam and Shabani [4]	yes	نتایج تجربی نشان می‌دهد که مدل ماکسول نمی‌تواند هدایت الکتریکی را پیش‌بینی کند.	TiO ₂
Sarojini et al. [41]	Yes	مدل ماکسول از آزمایش کمتر برآورد می‌کند.	Cu Al ₂ O ₃ CuO
Guo et al. [42]	yes	هدایت الکتریکی حدوداً ده برابر زیاد می‌شود.	SiO ₂
Ijam et al. [43]	depending on	با اضافه کردن GON تا ۰٫۰۷	graphene

EG-water mixture

		concentration	درصد وزنی، هدایت الکتریکی به سرعت زیاد می شود.	
Kole and Dey [44]	yes		هدایت الکتریکی تا ۸۶۲۰ درصد زیاد می شود.	functionalized graphene nanosheets
Zakaria et al. [31]	No		تغییر هدایت الکتریکی نسبتاً کم است.	Al ₂ O ₃
Khdher et al. [45]	yes, even if the alumina addition decreases slightly the electrical conductivity of BG		هدایت الکتریکی با دما زیاد می شود.	Al ₂ O ₃ bio glycol (BG)
Abdolbaqi et al [46]	No		هدایت الکتریکی BG:W در نسبت ۶۰:۴۰ درصد حین افزودن نانوذرات کم می شود.	Al ₂ O ₃ bio glycol-water mixture
Naddaf and Heris [47]	no, because Diesel has extremely low electrical conductivity		نانوسیالات دارای نانومواد عامل نسبت به نانو مواد غیرعامل هدایت الکتریکی کمتری دارند.	Graphene multi-wall carbon nanotubes (MWCNT) Diesel oil

نکته دیگر که باید مطرح شود، هدایت الکتریکی سیال پایه است که توسط چند نویسنده اندازه گیری شده است و در جدول ۲-۲ نشان داده شده است. از آنجاییکه همه گروههای تحقیقاتی به عنوان مقایسه ای بین نتایج خودشان و خروجی های سیال پایه در مورد افزایش هدایت الکتریکی بحث می کنند، این موضوع از اهمیت بالایی برخوردار است. به راحتی می توان نتایج پراکنده را مشاهده کرد، که ممکن است به خلوص هر سیال پایه و همچنین تجهیزات (نوع و کالیبراسیون آن) بستگی داشته باشد. با این وجود، در حالی که یک سیال رسانا عموماً دارای هدایت الکتریکی بزرگتر از $10 \mu S/cm$ است [۶]، هر محقق تحقیق خود را با افزودن نانوذرات به سیال پایه خودشان و داده های اندازه گیری شده از سیالات پایه خودشان مقایسه کرده اند. اگر نتایج حاصل از جداول ۱-۲ و ۲-۲ با هم مقایسه شوند، به راحتی می توان متوجه شد که اضافه کردن نانوذرات باعث تغییر در عملکرد سیال می شود و در اکثر موارد سیال غیررسانا را به رسانا تبدیل می کنند.

در ادامه، بحث با جزئیات در مورد آزمایش های انجام شد و به صورت طبقه بندی شده بر اساس سیال پایه ادامه خواهد یافت. نانوسیالات با اتیلن گلیکول (EG)، آب و مخلوط های مختلف EG-W به عنوان سیال پایه مورد توجه بیشتری در تحقیقات گذشته بوده اند، در حالی که سایر سیالات پایه به طور قطع نیاز به تحقیقات بیشتری دارند

۲-۵- نانوسیالات با سیال پایه اتیلن گلیکول (EG)

شیرازی و همکاران [۱۲] رفتار حرارتی-الکتریکی ترکیب نیتروژنی فعال شده کربن/گرافن (NACG) با مقدار بالای نیتروژن از کربن حاصل از خمیر EFB و GO را ساختند و بررسی کردند. هدایت الکتریکی سه نمونه از نانوسیالات بر پایه EG با غلظت‌های مختلف (مثلاً ۰,۰۲ تا ۰,۰۶ درصد) در محدوده ۲۰-۴۵ درجه سانتیگراد اندازه گیری شد و مشاهده شد با افزایش غلظت نمونه‌ها، هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد و به ۱۲۰۰۰٪ بهبود در هدایت الکتریکی در دمای ۳۰ درجه سانتیگراد می‌رسد. تجهیز مورد استفاده برای این آزمایش یک رساناسنج (AB200، فیشر سایننتیفیک) بود.

جدول ۲-۲- خلاصه چند کار تجربی در زمینه هدایت الکتریکی سیالات مینا

Base Fluid	Electrical Conductivity ($\mu\text{S/cm}$)	Reference
EG	0.12	Akilu et al. [24]
PG	0.10	
Distilled water	6	Zakaria et al. [41]
EG	1.07	
EG	3.14	Islam et al. [49]
EG-Water 50:50	5.03	
Water	5.44	Guo et al. [52]
EG-Water 20:80	4.22	
EG-Water 40:60	1.9	
EG-Water 60:40	1.47	
EG-Water 80:20	1.36	
EG	0.33	Ijam et al. [53]
Distilled water-EG 60:40	12.7	
Distilled water	6	Abdolbaqi et al. [56]
BG	45	
BG	53	Khdher et al. [55]
BG-Water 60:40	389	Abdolbaqi et al. [56]
BG-Water 40:60	620	
Diesel oil	authors cannot measure it	Naddaf and Heris [57]

محمد [۱۳] با استفاده از یک مدل شبکه عصبی مصنوعی (ANN) یک مطالعه نظری بر روی خصوصیات الکتریکی دو نانوسیال بر اساس EG با نانوذرات منیزیم اکسید و سیلیکون-تیتانیوم اکسید انجام داد. هدایت الکتریکی با استفاده از مدل ANN از نظر غلظت نانوذرات و نفوذ دما شبیه سازی شد. شبیه سازی شامل چندین نتیجه آزمایشی از تحقیقات بود و نتیجه آن یک معادله غیرخطی بود که رفتار الکتریکی نانوسیالات را توصیف می‌کرد.

آکیلو و همکاران [۱۴] داده‌های مربوط به هدایت الکتریکی چندین اتیلن گلیکول و β -SiCnanofluids بر پایه پروپیلن گلیکول را گزارش می‌کنند. هدایت الکتریکی با استفاده از یک هدایت سنج قابل حمل با مقاومت گرمایی داخلی برای جبران خودکار دما، اندازه‌گیری شد. وابستگی رسانایی الکتریکی نانوسیالات β -SiC به دما، در حالی که تغییر دما با غلظت حجم به طور خطی بود، توسط نویسندگان با کمک یک معادله نوع Arrhenius تقریب زده شد. علاوه بر این، همانطور که سایر نویسندگان نیز متوجه شدند، نتایج به دست آمده مطابق با مدل ماکسول نبود (به عنوان مثال به ۴۵-۴۸ مراجعه کنید). نتیجه‌گیری کلی این بود که گرانشی سیال پایه، استحکامات یونی، و تعامل لایه مضاعف الکتریکی (EDL) تا حد زیادی بر هدایت الکتریکی نانوسیال تأثیر می‌گذارد.

بابی و رامپرابو [۱۶] هدایت الکتریکی یک نانوسیال EG با گرافن را مورد مطالعه قرار دادند و پیشرفتی در حدود ۲۲۰٪ مشاهده شد.

مطالعات قوی در مورد هدایت الکتریکی نانوسیالات بر پایه EG توسط گروه زیلا و فال [۱۵، ۱۷-۲۱] انجام شد. به عنوان مثال، فال و همکاران [۱۵] نانوسیالات ایندیم اکسید-EG را با تجهیزات MultiLine 363 مورد بررسی قرار دادند و افزایشی در هدایت الکتریکی نانوسیالات را با غلظت و دما بدست آوردند. حداکثر رشد در هدایت الکتریکی نانوسیالات In2O3-EG برای غلظت ۰.۰۸۱٪، یعنی ۲۷۳۰٪ درصد افزایش، در دمای ۳۳۳،۱۵ کلوین مشاهده شد.

زیلا و همکاران [۱۷] دو نوع از نانوذرات نانوالماسی بر پایه EG تهیه کردند و نتایج آنها پیشرفتی غیرخطی در هدایت الکتریکی با افزایش نسبت حجمی نشان داد و این رابطه به شکل زیر توسعه داده شد:

$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{bf}} = 1 + 3734\phi - 25.65\phi^2 \quad (۲-۴)$$

افزایش در هدایت الکتریکی به EDL و مسیرهای ایجاد شده توسط نانوذرات درون سیال EG نسبت داده شد.

زیلا و فال [۱۸] آزمایش‌هایی را روی نیتريد آلومینیوم پخش شده در EG انجام دادند و متوجه افزایش رسانایی الکتریکی با بالارفتن غلظت نانوذرات شدند و رابطه جدیدی پیشنهاد شد:

$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{bf}} = 1 + 6950.56\phi \quad (۲-۵)$$

علاوه بر این، نویسندگان توافق کردند که مدل ماکسول با داده‌های تجربی سازگار نیست و رشد واقعی (هدایت الکتریکی) بسیار بیشتر (در صورت مقایسه با سیال پایه تا ۶۰۰ برابر) از آنچه که توسط مدل ماکسول پیش بینی شده، است.

افزایش خطی هدایت الکتریکی با غلظت نانوذرات نیز برای نانوذرات شفاف دی اکسید سیلیکون (SiO₂) در EG در دمای ۲۹۸,۱۵ کلوین مشاهده شد و رابطه آن به شکل زیر است [۱۹]:

$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{bf}} = 1 + 21.03\varphi \quad (6-2)$$

این رابطه با تناسب داده‌های تجربی با خطای استاندارد ۰/۷۲ بدست آمد. علاوه بر این، زیلا و فال [۱۹] تحلیل هدایت حرارتی-الکتریکی (TEC) را از نظر هدایت الکتریکی و حرارتی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از این نوع نانوسیال در فرآیندهای انتقال حرارتی هیچ فایده‌ای ندارد، زیرا TEC از ۴ تا ۶ و وابسته به کسر حجمی، تغییر میکند. به علاوه، همان گروه [۲۰,۲۱] نیتريد سیلیکون (Si₃N₄) را در اتیلن گلیکول با استفاده از یک روش دو مرحله‌ای حل کرد و میزان هدایت الکتریکی را اندازه گرفت و یک معادله رگرسیون چند جمله‌ای را به دلیل عدم مغایرت با قانون ماکسول پیشنهاد می‌دهند:

$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{bf}} = 1 + 78609\varphi - 294573\varphi^2 \quad (7-2)$$

زیلا و همکاران [۲۱] این رشد زیاد در هدایت الکتریکی را با اثر ترکیبی برخی از دلایل توضیح دادند، به عنوان مثال: غلظت نانوذرات، خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نانوذرات همراه با نفوذ سیال پایه. همه این عوامل یک EDL برجسته در اطراف نانوذرات و مسیرهای هدایت ایجاد می‌کردند..

۲-۵-۱- نانوسیالات با آب به عنوان سیال پایه

آب به عنوان پایه‌ای برای تهیه نانوسیالات، بیشتر به دلیل موارد کاربرد زیاد آن، مورد توجه گروه‌های مختلف پژوهشی قرار گرفته است. علاوه بر این، چندین نتیجه در مورد هدایت الکتریکی نانوسیالات مبتنی بر آب در این بخش مورد بحث قرار گرفته است.

زاورا و همکاران [۲۲] نانوسیالات آلومینا-آب را با SDBS (سدیم ددسیلیل بنزن سولفونات) به عنوان عامل فعال سطحی آماده کرده و هدایت الکتریکی آنها را برای غلظت‌های مختلف اندازه‌گیری کرد. بالاترین مقدار هدایت الکتریکی، ۲۳۷۰ μS/cm، برای غلظت ۰,۲٪ در دمای ۲۵,۹ درجه سانتی گراد ثبت شد. مشاهدات تجربی آنها نشان داد که با افزودن نانوذرات

تا ۰,۲٪ هدایت الکتریکی افزایش می‌یابد و با افزایش بیشتر غلظت نانوذرات (یعنی برای ۰,۵٪ و ۰,۷۵٪) کاهش می‌یابد. توضیحات مربوط به این تغییر در هدایت الکتریکی مربوط به پدیده تشکیل EDL و توسعه بارهای الکتریکی به دلیل این واقعیت است که آب یک سیال قطبی است. به طور دقیق تر، یونهای با بار مخالف با سطح ذرات جذب می‌شوند و باعث ایجاد لایه پراکنده شده متشکل در اطراف ذره می‌شوند. این لایه، که به لایه دوتایی الکتریکی معروف است، معمولاً با پارامتر طول Debye مشخص می‌شود. نویسندگان اظهار داشتند که سازوکار افزایش واقعی مبتنی بر بهبود هدایت در محلول به دلیل بار سطحی و تشکیل EDL است. به علاوه، افزایش در هدایت الکتریکی به ثبات بهتر محلول نسبت داده شد. از سوی دیگر، کاهش هدایت الکتریکی برای درصد حجمی ۰,۵ و ۰,۷۵ درصد با این دلیل توضیح داده شده است که بارهای موجود برای تشکیل EDL برای ذرات کافی نیستند و نیروی جاذبه الکترواستاتیک به یک نیروی دافع بین نانوذرات در نانوسیال تبدیل می‌شود. این نتایج مطابق با سایر موارد اعلام شده نیست و توضیحات در مورد این پدیده نیاز به بینش بیشتری دارد.

باغلی و همکاران [۲۳] یک نانوسیال بر پایه آب و اکسید آهن (با واکنش دهنده سطحی) را مورد آزمایش قرار دادند و پیشرفت قابل توجهی در هدایت الکتریکی را با افزایش غلظت و دما بدست آوردند. همچنین نویسندگان مدلی را ارائه دادند که قادر به توضیح سازوکار هدایت الکتریکی نانوسیالی Fe_3O_4 ، به خصوص در غلظت‌های پایین باشد. مدل ارائه شده در واقع تاییدی بر مدل شن و همکاران [۴۸] است، معادله ای که هدایت الکتریکی نانوسیالات بر اساس مدل ماکسول را توصیف می‌کند (به معادله ۲-۱) مراجعه کنید) و همچنین حرکت براونی ذرات و الکترون بری را نیز در نظر می‌گیرد.

شن و همکاران [۴۸] مدل ماکسول را با در نظر گرفتن رسانایی ناشی از تحرک الکترون بری و حرکت براونی بهبود بخشیدند و به شرح زیر نوشته شده است:

$$\sigma = \sigma_M + \sigma_E + \sigma_B \quad (۲-۸)$$

که در آن σ_M و σ_B به ترتیب به هدایت الکتریکی محاسبه شده و به دلیل حرکت براونی با مدل ماکسول مربوط هستند. حرکت الکترون بری (σ_E) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\sigma_E = \frac{2\phi\epsilon_r^2\epsilon_0^2U_0^2}{\eta r^2} \quad (۲-۹)$$

که در آن ϵ_r ، ϵ_0 ، U_0 ، η و r ثابت‌های دیریکله برای سیال پایه، ثابت‌های تخلیه دی الکتریک، پتانسیل زتا برای نانوذرات، گرانشی نانوسیال و شعاع نانوذرات است. عبارت مربوط به حرکت براونی به شکل زیر است:

$$\sigma_B = \frac{3\phi\epsilon_r\epsilon_0U_0\left(\frac{RT}{L}\cdot\frac{1}{3\pi\eta}\right)}{r^{\frac{3}{2}}} \quad (10-2)$$

که در آن R ، T و L به ترتیب ثابتهای ترمودینامیکی، دما و عدد آووگادرو هستند. هدایت الکتریکی نانوسیالات مبتنی بر آب با اکسید مس (۱۲ نانومتر) توسط کولیو و همکاران مورد بررسی قرار گرفت [۲۴]. نویسندگان نانوسیالهای مختلفی را (در غلظت‌های حداکثر ۲٪) تهیه کردند و در دماهای مختلف، در محدوده ۲۹۸،۱۵ تا ۳۴۸،۱۵ درجه کلوین با استفاده از یک هدایتسنج نوع EC-Meter GLP 31 تولید CRISON، آزمایش‌هایی را انجام دادند. نتایج آنها مطابق با تحقیقات قبلی است و با افزایش دما و غلظت حجمی، افزایش هدایت الکتریکی را نشان می‌دهد. توضیحات آنها برای این بهبود هدایت الکتریکی به تعداد بالای نانوذرات وابسته است.

علاوه بر این، داده‌های تجربی مطابق با معادله هیل بود [۴۹]:

$$\sigma = \frac{\phi_{CuO}^n K_0}{1 + \phi_{CuO}^n K_0} \quad (11-2)$$

برای توضیح، معادله هیل دارای دو عامل تنظیم کننده K_0 و n است و در شاخه‌های مختلف علمی برای توصیف کمی میزان همکاری در فرآیندهای مختلف جنبشی مورد استفاده قرار می‌گرفت [۵۰].

آنو و همالاتا [۲۴] هدایت الکتریکی نانوذرات دوپ نشده و فريت کبالت دوپ شده با روی را که محلول در آب هستند مطالعه کردند و نتایج را با مدل‌های ماکسول [۸] و شن [۴۸] مقایسه کردند. مقایسه نشان داد که مدل ماکسول مناسب نیست (یعنی مقادیر تجربی را کمتر از حد واقعی پیش بینی می‌کند) در حالیکه معادله شن می‌تواند نتایج تجربی را توصیف کند. نتایج این نویسندگان مطابق با مشاهدات باقلى و همکاران است [۲۳].

شوگل و همکاران [۲۶] یک مطالعه تجربی با استفاده از یک هدایت سنج JENWAY 4520 بر روی چندین نانوسیال بر پایه آب با آلومینا، MgO ، CuO ، CNT ، تایتانیا، ZnO انجام دادند و چندین همبستگی خطی پیدا کردند، در حالی که افزایش از طریق EDL و انتقال یونی توضیح داده شده است. حداکثر رشد برای نانوسیالات ZnO -آب مشاهده شد، اما هیچ توضیحی درباره این پدیده ارائه نشده است.

هیئات و ایران نژاد [۲۷] نانوسیالات Ag، SiC و اکسید گرافن (GO) بر پایه آب را با استفاده از یک مولتی متر رومیزی AZ86505 مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطابق با تحقیقات قبلی است و تقریباً در کلیه موارد، رسانایی الکتریکی نانوسیالات به طور خطی با دما و غلظت افزایش می‌یابد.

نوردین و ساتریاناندا [۲۸] در مورد نانوذرات آب و Fe2O3 با استفاده از ابزار اندازه گیری Eutech PC 2700 در محدوده غلظت حجمی ۰,۵ تا ۵/۵ درصدی نانوذرات تحقیق کردند. بالاترین مقدار هدایت الکتریکی (۱۴,۶۵ mS/cm) در غلظت ۲,۵ درصد و دمای ۶۰ درجه سانتیگراد بدست آمد و افزایش هدایت الکتریکی را به وابستگی پیچیده به لایه مضاعف الکتریکی نسبت دادند.

ماشالی و همکاران [۲۹] نانوسیالات بر پایه آب نانوالماس را در سه غلظت تا ۰/۲۵ درصد وزنی مورد مطالعه قرار دادند و مقایسه ای با تحقیقات موجود انجام دادند. نتایج نشان داد که افزودن نانوالماس در مقایسه با سایر انواع نانوذرات، حداقل هدایت الکتریکی را به دست می‌دهد.

بابی و رامپرابو [۱۶] هدایت الکتریکی نانوسیالات را با گرافن/آب را بررسی کردند و پیشرفتی در حدود ۱۴۰۰٪ مشاهده شد.

زکریا و همکاران [۳۱] خواص نانوذرات Al2O3 با ۰,۱٪، ۰,۳٪ و ۰,۵٪ پراکندگی در آب را بررسی کرده و رشدی در حدود ۵,۵ برابر در مقایسه با آب خالص را مشاهده کردند. این توضیحات بر این مبنا بود که نانوسیالات AL2O3 ۰,۵٪ در آب بیشتر یونها را از توده برمی‌دارد، زیرا رشدی بالغ بر ۲۹,۰ μS/cm وجود دارد.

نانوسیالات آلومینا-آب همچنین توسط سلیمفندیگیل و ازتوپ [۳۳] که تحلیل عددی در همرفت مخلوط در یک مخزن دوزنقه ای با درب متحرک را با استفاده از معادلات مختلف برای هدایت الکتریکی انجام داده اند، مورد بررسی قرار گرفت. آنها نتیجه گرفتند که اختلاف بین مدل‌های هدایت الکتریکی متنوع برای مقادیر لبستر عدد ریچاردسون، بیشتر می‌شود. گانگولی و همکاران [۳۴] افزایش قابل توجهی از هدایت الکتریکی نانوسیالات آلومینا-آب با کسری دما و حجم را مشاهده کردند. تغییرات از نقطه نظر دما و حجم خطی بود و رابطه جدیدی به شکل زیر پیشنهاد شد:

$$\frac{\sigma_{nf} - \sigma_{bf}}{\sigma_{bf}} = 3679.049\varphi + 1.085799T - 43.648 \quad (12-2)$$

همچنین مینا و لوسیا [۳۵] و مینا [۳۶] نانوسیال آلومینا-آب را مورد بررسی قرار دادند و متوجه رشد هدایت الکتریکی با دما و غلظت حجمی شدند. رابطه جدیدی به این شکل پیشنهاد شد:

$$\sigma_{nf} = 176.69 + 588.41\varphi - 13.64t - 86.31\varphi^2 + 0.36t^2 + 1.07t\varphi + 11.06\varphi^3 - 0.003t^3 + 0.18t^2\varphi - 1.01t\varphi^2 \quad (۱۳-۲)$$

که در آن t نشانگر درجه حرارت به سانتیگراد و φ نشانگر غلظت حجمی است.

یافته‌های بعدی را می‌توان به این شکل خلاصه کرد که در دمای اتاق برای نانوسیالی با ۴٪ آلومینا افزایش ۳۷۹٫۶٪ و خطی هدایت الکتریکی با دما مشاهده شد.

سوندار و همکاران [۳۷] آزمایشاتی را روی نانو سیال ND (نانوالماس) - نانوکامپوزیت نیکل و آب انجام دادند و رشد ۱۳۳۹٫۸۱٪ هدایت الکتریکی را در ۲۴ درجه سانتیگراد یافتند. به علاوه، همانطور که بسیاری از محققین متوجه شدند، اختلاف نظر بین نتایج تجربی و مدل‌های معمولی (یعنی ماکسول و بروژمن) وجود داشت.

چرچز و مینا [۳۸] اندازه‌گیری هدایت الکتریکی برخی از نانوسیالات ساده و ترکیبی را بر اساس آب و اکسیدهای مختلف (به عنوان مثال آلومینیوم، تیتانیم، سیلیس) انجام دادند و روابط اندکی بر اساس کسر حجمی و تغییر دما پیشنهاد شد. مثلاً:

$$\sigma_{nf} = -103.47 + 315.14\varphi + 17.23\varphi^2 + 4.45T \quad (۱۴-۲)$$

برای نانوسیالات آب تیتانیم:

$$\sigma_{nf} = 491.56 + 104.67\varphi + 71.37\varphi^2 + 4.19T \quad (۱۵-۲)$$

نتایج کلی آزمایشی برای همه نانوسیالات ساده و ترکیبی بیشتر مطابق با تحقیقات مشابه در مورد نانوسیالات مختلف اکسیدهای آب بود (برای مثال به [۱۶، ۳۱، ۳۳، ۳۴] مراجعه کنید).

۲-۵-۲- نانوسیالات با مخلوط آب اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه

اسلام و همکاران [۳۹]، هدایت الکتریکی نانوسیالات پایه TiO_2 ۵۰-۵۰ آب-EG را با غلظت کم نانوذرات (به عنوان مثال از ۰٫۰۵ تا ۰٫۵ درصد حجمی) را از نظر نظری و تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج تجربی بار دیگر خاطر نشان می‌کند که مدل ماکسول قادر به پیش بینی درست هدایت الکتریکی نانوسیالات نیست. مقادیر تجربی با دما و غلظت در حال افزایش بودند و این تغییر به خصوصیات EDL نسبت داده شد.

اسلام و شبانی[۴۰] از ابزار IntelliCAL™ CDC401 برای اندازه گیری هدایت الکتریکی نانوسیال تیتانیم-آب و EG استفاده کردند و نتایج با افزایش دما و غلظت افزایش نشان دادند. سیال پایه مخلوط آب و EG به نسبت مساوی بود در حالی که کسر حجمی نانوذرات در محدوده ۰,۵٪-۰,۰۵٪ متغیر بود. نویسندگان رابطه ای را به شرح زیر ارائه دادند:

$$\frac{\sigma_{nf}}{\sigma_{bf}} = 11.214 + 2.626 \ln \phi + 0.2371 \ln T \quad (۱۶-۲)$$

سایر نانوذرات اکسید، Al_2O_3 ، در غلظت ۰,۱، ۰,۳، ۰,۵ و درصد محلول در آب و EG با نسبت ۶۰ به ۴۰ توسط زکریا و همکاران [۳۱] مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به وضوح نشان می دهد که تغییر در هدایت الکتریکی به دلیل برخی از عوامل مانند اکسیداسیون گلیکول و آلودگی نسبت به صفحه دو قطبی نسبتاً کم است.

ساروجینی و همکاران [۴۱] آزمایش بزرگی در مورد هدایت الکتریکی نانوسیالات حاوی نانوذرات فلزی یا اکسیدی (مس، Al_2O_3 و CuO) با نسبت های کم حجمی و اندازه ذرات انجام دادند. نویسندگان متوجه شدند که با افزایش غلظت و کاهش اندازه ذرات، هدایت الکتریکی افزایش می یابد. نتایج این مطالعه پیچیده نشان داد که مدل ماکسول مقادیر را کمتر از واقعیت پیش بینی می کند و توضیحات آنها برای این کار بر مبنای EDL و هدایت سطحی ذرات قرار دارد.

گیو و همکاران [۴۲] نانوسیالها را با اکسید سیلیکون در مخلوط EG و آب تولید کرده و هدایت الکتریکی را با یک رساناسنج اندازه گیری می کند (Jenco Instruments Inc، آمریکا). نویسندگان رشدی در خواص الکتریکی (به عنوان مثال، هدایت الکتریکی حدود ۱۰ برابر افزایش می یابد) را به دلیل رشد EDL در حالی که نانوذرات به مخلوط EG-آب پایه اضافه می شوند، مشاهده کردند.

در مقایسه با نانوسیالات بر پایه اکسید، نانوسیالات گرافنی توجه کمی را به خود جلب کردند [۴۳، ۴۴]. با این وجود، تمام مطالعات حاکی از افزایش زیاد هدایت الکتریکی (بیش از ۱۰۰۰٪)، حتی با ذرات بسیار کم نانوذرات است. متعاقباً ایجام و همکاران [۴۳] به طور تجربی میزان هدایت الکتریکی نانوذرات گرافن محلول در مخلوطی از آب-EG (نسبت اختلاط ۶۰:۴۰) را با استفاده از یک هدایت سنج چند متغیره رومیزی مدل Orion™ VERSA STAR بررسی کردند.

نتایج نشان داد که با اعمال GON ها (نانوصفحات اکسیدی گرافن) تا ۰,۰۷ درصد وزنی، هدایت الکتریکی به سرعت افزایش می‌یابد. نتایج تجربی با یک معادله خطی مناسب و روابط مختلفی برای تغییرات هدایت الکتریکی هر نانوسیال با دما پیشنهاد شد. به طور دقیق تر، در دمای اتاق حداکثر رشد هدایت الکتریکی ۱۶۶۴٪ در کسر وزنی ۰,۱٪ بود. توضیحات نویسندگان برای افزایش هدایت الکتریکی متکی به بار سطحی GON هایی است که EDL را همراه با ابر یونی تقویت می‌کنند، بنابراین به طور فعال در افزایش سازوکارهای هدایت الکتریکی از طریق پراکندگی نقش دارند.

کول و دای [۴۴] هدایت الکتریکی آب-EG را با داشتن نانوصفحه‌های گرافن کاربردی (f-HEG) مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان دادند که هدایت الکتریکی در صورت وابستگی به سیال پایه تا درصد ۸۶۲۰٪ درصد افزایش یافته است.

۲-۵-۳- نانوسیالات بر اساس سایر سیالات

تحقیقات در مورد هدایت الکتریکی نانوسیالات بر اساس سیالات دیگر بسیار محدود است و نتایج متناقض است. این موضوع را می‌توان به راحتی با خصوصیات الکتریکی سیال پایه و هم افزایی آن با انواع مختلف نانوذرات توضیح داد. علاوه بر این، مطالعات متعددی در تحقیقات قبلی، یافت شد که در ادامه در این بخش مورد بحث قرار گرفته و در جدول شماره ۱ بیان شده است.

۲-۵-۴- نانوسیالهای مبتنی بر بیوگلیکول

خدر و همکاران [۴۵] نانوسیالهای آلومینا-BG را با درصد حجمی‌های غلظت در نانوذرات ۰/۱، ۰,۳، ۰,۵، ۰,۷ و ۱ در نظر گرفتند. نتایج تجربی نشان داد که هدایت الکتریکی با دما و کسر حجمی افزایش می‌یابد. بعلاوه، در مقایسه با سیال پایه، افزودن Al_2O_3 منجر به افزایش اندک در هدایت الکتریکی می‌شود. به عنوان مثال، در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد و غلظت ۰,۵ درصد، مقدار هدایت الکتریکی ۱۵۴ $\mu S/cm$ بود. توضیح این پدیده به پیکربندی بارهای سطحی با اثر قطبیت نانوذرات پس از پراکنده شدن در یک سیال قطبی متناسب شد.

همچنین نانوذرات آلومینا (در غلظت‌های کم تا ۲٪) توسط عبدالباقی و همکاران [۴۶] در نظر گرفته شد، اما این بار سیال پایه مخلوطی از آب و بیو گلیکول بود. نویسندگان هدایت الکتریکی را با یک Cyberscan PC-10 اندازه گیری کردند و نتایج نشان داد که در حالی که غلظت افزایش می‌یابد هدایت الکتریکی کاهش می‌یابد، بنابراین از رفتار سیالات پایه پیروی

نمی‌کند. به طور دقیقتر، هدایت الکتریکی مؤثر BG-W در نسبت ۶۰:۴۰ به تدریج از ۶۲۰ به ۴۷۲ $\mu\text{S}/\text{cm}$ برای غلظتهای حجمی ۰ و ۲۰ درصد کاهش یافته است.

۲-۵-۵- نانوسیالات بر پایه روغن

نداف و هریس [۵۷] از روغن دیزل به عنوان سیال پایه برای تهیه نانوسیالات با گرافن و نانو لوله‌های کربنی چند دیواره (MWCNT) استفاده کردند (با استفاده از دو نوع واکنش دهنده سطحی: اولئیک اسید و هگزیل‌آمین) و ضمن افزایش غلظت، شاهد افزایش در هدایت الکتریکی بودند. همچنین، نانوسیالها با نانوموادهای کاربردی نسبت به نانومواد غیر کاربردی دارای هدایت الکتریکی پایبتری هستند و توضیحات آن به EDL و بار سطحی مربوط است. با این وجود، تأثیر واکنش دهنده سطحی به اندازه کافی توضیح داده نشده است.

هوانگ و همکاران [۵۱] از سیال گیاهی سازگار با محیط زیست (به عنوان مثال، روغن تصفیه شده، سفید شده و دفع شونده (RDB)) به عنوان سیال پایه برای تهیه نانوسیالات با نانوذرات فولرن استفاده کرده و متوجه خاصیت الکتریکی شده است. به عنوان مثال، مقاومت الکتریکی با غلظت ۱۰۰ میلی گرم در لیتر نانوذرات فولرن ۲۳,۳ درصد افزایش یافته است.

کوناکانچی و همکاران [۵۲] اکسیدهای مختلف (آلومینیوم، اکسید سیلیکون و اکسید روی) را در مخلوطی از پروپیلن گلیکول و آب حل کردند. نتایج تجربی آنها نشان داد که روند صعودی هدایت الکتریکی نانوسیال با افزایش دما و غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد. نتایج به دست آمده مطابق با تحقیقات پیشین بود و تعداد کمی از مدل‌های تجربی توسط نویسندگان ارائه شده است.

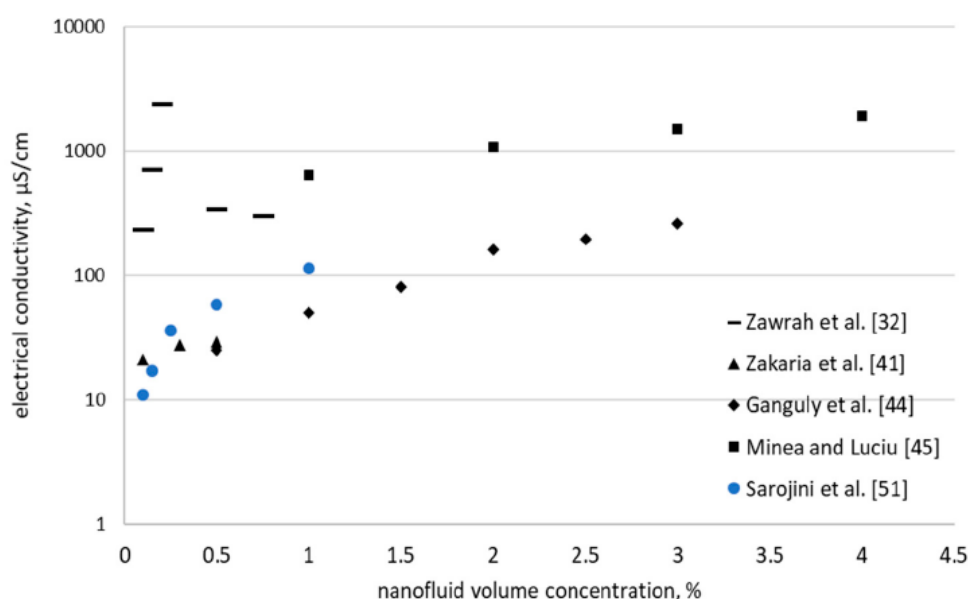
۲-۶- بحث در مورد نتایج تجربی

نتایج تجربی بیشتر برای هر یک از سیالات پایه مقایسه خواهد شد، تا بتواند ارزیابی مناسبی را انجام دهد و نتیجه گیری مدرنی را ارائه کند. به طور کلی، نتایج بسیار وابسته به نوع نانوذرات و همچنین به روش ساخت و استفاده از واکنش دهنده‌های سطحی است.

۲-۶-۱- تأثیر غلظت نانوذرات بر رسانایی الکتریکی

شکل ۱-۲ نتایج حاصل از نانوذرات آلومینا-آب را مشخص می‌کند و به وضوح می‌توان اطلاعات پراکنده منتشر شده در تحقیقات آزاد را مشاهده کرد. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، اکثر نتایج تجربی نشان دهنده افزایش هدایت الکتریکی با افزایش غلظت است. با این

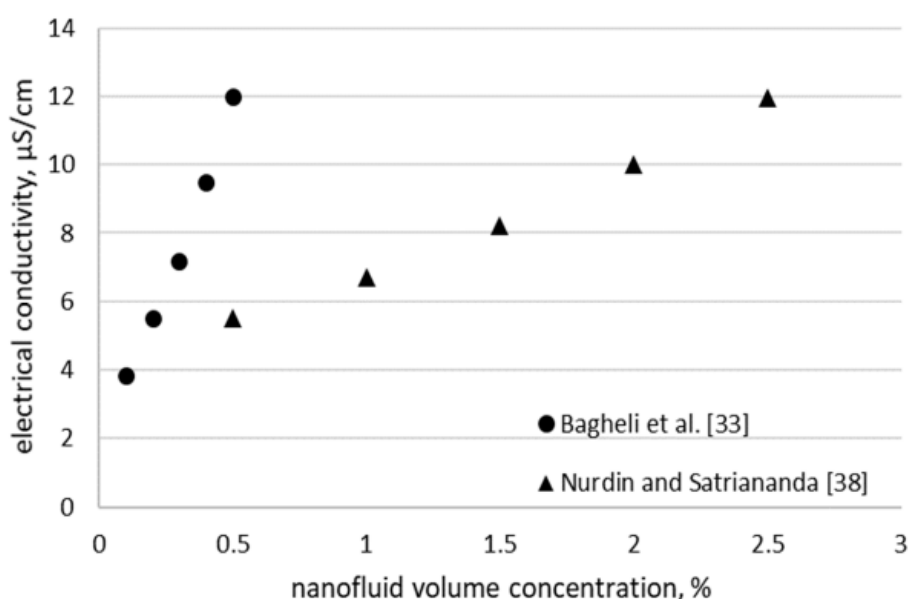
اوصاف، برخی از نویسندگان (برای مثال [۲۲]) با زیاد شدن غلظت، افزایشی را مشاهده کردند که پس از کاهش بوده است. توضیح این رفتار توسط زاورا و همکاران [۲۲] که باور داشتند که کاهش هدایت الکتریکی به دلیل افزایش قطر ذرات است (بدلیل رشد مساحت و افزایش تعداد ذرات)، داده شده است. بنابراین چون تعداد ذرات افزایش می‌یابد، بارهای موجود برای تشکیل EDL ناکافی است و نیروی جاذبه الکترواستاتیک به نیروی دافعه در بین نانوذرات موجود در نانوسیالات آلومینا تبدیل می‌شود. به هر حال، در اینجا لازم به ذکر است که زاورا و همکاران [۲۲] از SDBS به عنوان واکنش دهنده سطحی استفاده کردند در حالی که سایر نویسندگان از واکنش دهنده سطحی استفاده نمی‌کردند.



شکل ۲-۱- هدایت الکتریکی نانوسیال آلومینا-آب

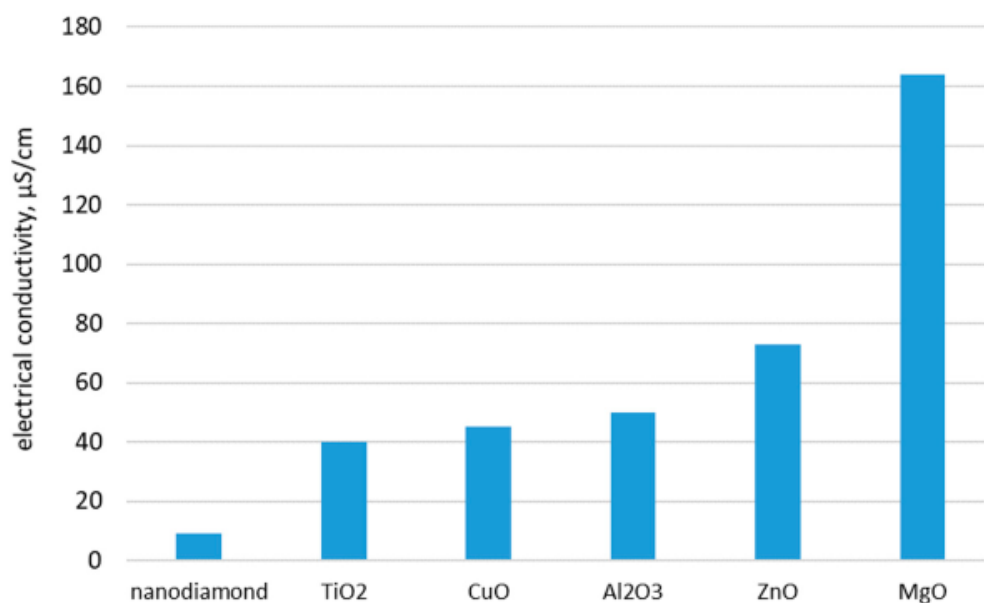
بنابراین، اگر نتایج شکل ۲-۱ را در نظر بگیریم می‌توان گفت که افزودن واکنش دهنده‌های سطحی می‌تواند بسیار زیاد بر رفتار الکتریکی نانوسیالات تأثیر بگذارد و بر رفتار الکتریکی نانو سیال بگذارد. پدیده ای که در سیال ظاهر می‌شود، نیازمند جزئیات بیشتری است که با مطالعات هماهنگ شده حمایت می‌شود.

نتایج تجربی نانوسیالات با آب و اکسید آهن در شکل ۲ ترسیم شده است که در آن دو منبع مشاهده شده است. باغلی و همکاران [۲۲] مقادیر کمتری به دست آوردند، اما از یک واکنش دهنده سطحی (تترا متیل آمونیوم هیدروکسید) استفاده کردند. به هر حال، از مقایسه نتایج شکل ۲-۱ و ۲-۲ دقیقاً نمی‌توانیم بگوییم که تأثیر واکنش دهنده سطحی در مقادیر رسانای الکتریکی چیست و بنابراین تحقیقات بیشتری لازم است.

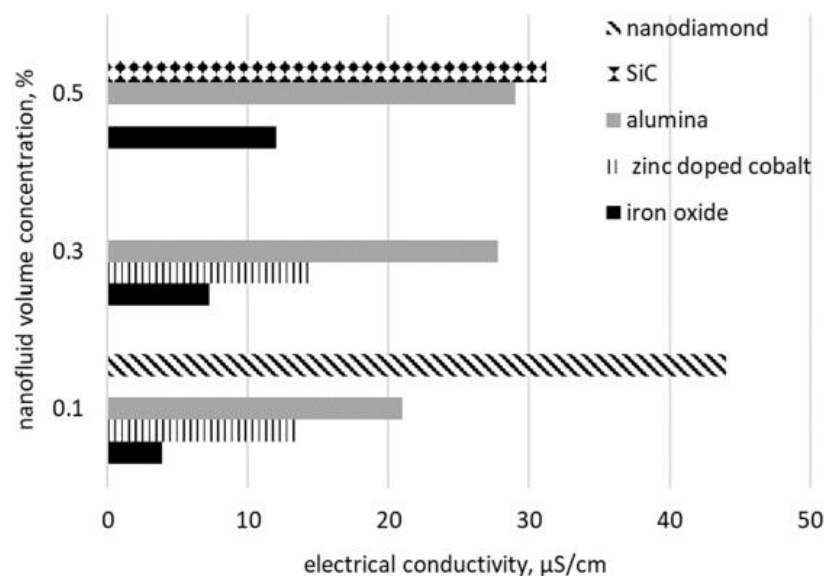


شکل ۲-۲- هدایت الکتریکی اکسید نانوسیال آهن-آب

یک مقایسه جالب دیگر را می‌توان بر اساس غلظت یکسان نانوذرات پراکنده در آب، اما انواع مختلف بدست آورد (شکل‌های ۳-۲ و ۴-۲). شکل ۳-۲ حاوی داده‌هایی برای انواع مختلف نانوذرات با غلظت یکسان در آب است (یعنی ۰/۰۱ درصد) و می‌توان خاطرنشان کرد که بیشترین مقادیر برای اکسید منیزیم به دست آمد در حالی که نانوسیالات نانوالماسی کمترین مقدار را دارند. از طرف دیگر، در شکل ۴-۲ به وضوح می‌توان گفت که با افزایش غلظت به ۰/۰۱٪، نانوسیال‌های نانوالماسی در مقایسه با داده‌های سایر منابع بالاترین مقادیر را دارند.



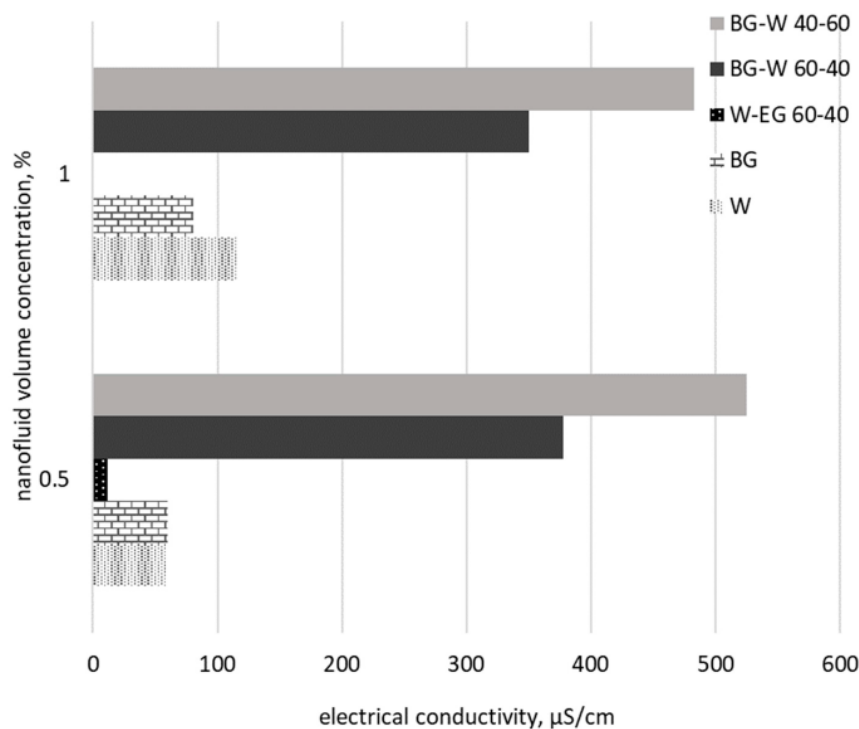
شکل ۳-۲- مقایسه هدایت الکتریکی نانوسیالات مختلف یا ۰/۰۱٪ با انواع مختلف نانوذرات محلول در آب [۲۶،۲۹]



شکل ۲-۴- مقایسه هدایت الکتریکی با انواع مختلف نانوذرات [۳۳,۳۴,۳۷,۳۹,۴۱]

اگر به داده‌های جدول ۲-۳ توجه کنیم، می‌توان خاطرنشان کرد که داده‌های آزمایشی نانوسیالات با EG به عنوان سیال پایه بسیار پراکنده هستند، بنابراین نتیجه گیری دقیق از عوامل تأثیرگذار را نمی‌توان بیان کرد. با این حال، اکثر نتایج حاصل از نانوسیالات EG حاکی از افزایش زیاد هدایت الکتریکی در صورت افزودن نانوذرات است. علاوه بر این، نتایج مربوط به سیالات پایه ی دیگر، مانند BG، روغن‌ها یا مخلوط‌های مختلف کمیاب است. همانطور که قبل از به دست آوردن بالاترین مقادیر برای مخلوطی بین آب و بیو گلیکول نیز تأیید شد و حداقل مقادیر آن برای EG به عنوان پایه است.

به هر حال، همانگونه که در شکل ۲-۵ دیده می‌شود، بر اساس بررسی داده‌ها می‌توانیم مقایسه ای بین نانوذرات آلومینای محلول در سیالات پایه مختلف بدست آوریم.



شکل ۵-۲- مقایسه نتایج نانوسیالات آلومینا با سیالات پایه مختلف [۴۱،۵۱،۵۵،۵۶]

با نگاهی به شکل ۵-۲ می‌توان گفت با استفاده از همان غلظت نانوذرات، سیال پایه به دلیل شکل گیری EDL و هم افزایی بین سیال پایه و نانوذرات، به شدت بر هدایت الکتریکی تأثیر می‌گذارد. بالاترین مقادیر برای مخلوط بین آب و بیو گلیکول به دست آمد و حداقل مقدار برای EG به عنوان سیال پایه مربوط است. همچنین این امر می‌تواند به دلیل مقادیر ثبت شده برای هدایت الکتریکی هر سیال پایه باشد (به جدول ۲ و [۳۱،۴۱،۴۵،۴۶] مراجعه کنید). به عنوان مثال، آب (با هدایت الکتریکی متوسط 5.5 J.LS/cm) [۲۹،۳۲] ۱۰ برابر بیشتر از EG هدایت الکتریکی دارد، در حالی که مقادیر هدایت الکتریکی BG به 45 J.LS/cm [۴۶] می‌رسد.

در نتیجه، افزایش هدایت الکتریکی با غلظت نانوذرات توسط بسیاری از نویسندگان از طریق مکانیسم‌های مختلفی توضیح داده شد که می‌توان آنها را به صورت خلاصه بیان کرد:

- ۱- فرآیندهای پیچیده ای که در تشکیل لایه الکتریکی مضاعف (EDL) و تعامل بین نانوذرات جامد و EDL ایجاد شده اتفاق می‌افتد.

- ۲- وابستگی به غلظت یونی و سایر خصوصیات فیزیکی-شیمیایی سیال پایه.

۳. بهبود مکانیسم‌های هدایت داخل سیستم محلول.

۴- افزایش تحرک الکترون بری نانوذرات (با توجه به ابعاد نانویی ذرات) که متعاقباً هدایت الکتریکی نانوسیال را تقویت می‌کنند.

۵- افزایش غلظت نانوذرات افزایش در دسترس بودن مسیرهای هدایت در نانوسیالات را مشخص می‌کند، که باعث افزایش سرعت در هدایت الکتریکی می‌شوند.

به هر حال، بیشتر محققان (نگاه کنید به [۹-۲۵]) افزایش هدایت الکتریکی را عمدتاً با تشکیل EDL توضیح داده‌اند، به این معنا که ساختار تجمع بار و جداسازی بار وقتی که یک الکتروود (در این مورد نانوذرات جامد) در یک محلول الکترولیت (یعنی سیالات پایه) غوطه‌ور شود، همیشه در رابط رخ می‌دهد. بار سطح (مثبت یا منفی)، حاوی یونهای است که به دلیل واسطه‌های شیمیایی جذب می‌شوند.

در اصل، EDL دو لایه موازی بار را در مجاورت یک جسم جامد نشان می‌دهد. لایه اول، بار سطح (مثبت یا منفی)، حاوی یونهای است که به دلیل واسطه‌های شیمیایی جذب می‌شوند. لایه دیگر حاوی یونهای است که با استفاده از نیروی کولونی به بار سطحی جذب می‌شوند و لایه اول را به صورت الکتریکی نشان می‌دهند. این لایه دوم از یونهای آزادی تشکیل شده است که تحت تأثیر نیروی جاذبه الکتریکی و حرکت حرارتی آزادانه در داخل سیال پایه حرکت می‌کنند.

۲-۶-۲- تأثیر سیال پایه در رسانایی الکتریکی

بحث جالب دیگر می‌تواند در مورد نفوذ سیال پایه، به خصوص با توجه به قطبی بودن آن مطرح شود. همانطور که مشهور است روغنها غیر قطبی هستند و آب سیال قطبی است اما EG یک مولکول قطبی متقارن است، بنابراین حاوی قطبهای داخلی است. در این نظر، EG شامل گروه‌های O-H قطبی است اما دارای هر دو بخش قطبی و غیرقطبی است. بیوگلیکول نوعی آروما از پروپیلن گلیکول است و طیف گسترده‌ای از قطبیت دارد. از طرف دیگر، اگر این گلیکول‌ها با آب مخلوط شوند، قطبیت تحت تأثیر قرار می‌گیرد و مخلوط را می‌توان قطبی در نظر گرفت.

در نتیجه، با توجه به تأثیر سیال پایه، افزایش هدایت الکتریکی می‌تواند تحت تأثیر عوامل زیر قرار بگیرد:

۱- وابستگی به غلظت یونی و سایر خصوصیات فیزیکی شیمیایی سیال پایه.

۲. استفاده از واکنش دهنده‌های سطحی.

۳. قطبیت سیال پایه (یعنی آب سیال قطبی است اما EG می‌تواند قطبی و غیرقطبی باشد) که ایجاد بارهای الکتریکی در سطح نانوذرات را یاری می‌دهد. یونهای با بار متضاد از سطح ذره جذب می‌شوند و باعث پیشرفت لایه پخش شده باردار در مجاورت نانوذرات می‌شوند.

۲-۶-۳- تأثیر دما بر رسانش الکتریکی

مطالعات در مورد تأثیر تغییر دما بر رسانای الکتریکی در جدول ۲-۳ خلاصه شده است. نتیجه گیری کلی این بود که افزایش دما باعث افزایش خطی در هدایت الکتریکی می‌شود [۱۴-۴۷] که یک پدیده منطقی و پرتکرار در فیزیک محلولها است. برخی از جزئیات قبلا در دو جدول ۲-۳ و بخش ۳ ارائه شده است و یک بررسی در ادامه صورت می‌گیرد. مطابق بر آخرین پیشرفتهای علمی، به وضوح می‌توان دریافت که اکثر مطالعات تجربی روی این موضوع به این نتیجه رسیده اند که تأثیر دما به اندازه غلظت مهم نیست و افزایش آن به صورت خطی است. به هر حال برخی استثنائات در تحقیقات ذکر شده است. برای مثال مانند شیرازی و همکاران [۱۲] بیان کردند که دما بر هدایت الکتریکی تأثیر می‌گذارد اما هیچ الگویی مشاهده نشده است (یعنی در واقع داده‌های بسیار پراکنده ثبت شده اند) و آکیلو و همکاران [۱۴] معادله آرنیوسی را بدست آوردند که نتایج تجربی آنها را بهتر توصیف می‌کند. از سوی دیگر، برخی توضیحات در مورد رشد پایین از تحقیقات ساروجی و همکاران [۴۱] بدست آمده است که آنها توضیح دادند که افزایش کم هدایت الکتریکی در هنگام گرمایش به این دلیل است که تجمع یک پدیده وابسته به زمان است و با افزایش دما، زمان تجمع کاهش زیادی می‌کند.

اشکال مورد توجه، حتی اگر چندین مطالعه در مورد تأثیر دما بر هدایت الکتریکی وجود داشته باشد، عدم وجود روابطی است که می‌تواند تأثیر گرما را توصیف کند. حتی اگر دما به عنوان یک پارامتر مهم در نظر گرفته شود، همانطور که در معادلات (۲-۱۲) تا (۲-۱۶) مشاهده می‌شود، بیشتر معادلات تأثیر غلظت و دما را به هم ارتباط می‌دهند.

جدول ۲-۳- خلاصه‌ای از پژوهش‌های تجربی درباره تغییر هدایت الکتریکی با دما.

Reference	تاثیر دما بر مقدار هدایت الکتریکی	Nanopraticle Type	Base Fluid
Shirazi et al. [12]	حداکثر افزایش ۱۱۰۰۰ درصدی در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد برای ۰,۰۶ درصد حجمی. دما به‌صورت خطی بر اندازه هدایت الکتریکی تاثیر نمی‌گذارد، در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد کاهشی مشاهده شد و هیچ توضیحی ارائه نشد.	nitrogen doped activated carbon/graphene (NACG)	EG
Akliu et al. [14]	حداکثر افزایش در درصد حجمی ۱٪ با ۵۳,۵ درصد افزایش. وابستگی هدایت الکتریکی نانوسیالات β -SiC به دما را می‌توان با استفاده از معادله شبه-آرنیوس مدل‌سازی کرد.	β -SiC	
Fal et al. [15]	بیشترین افزایش هدایت الکتریکی برای درصد حجمی ۰,۰۰۸۱ در دمای ۳۳۳,۱۵ کلوین به‌دست آمد و این مقدار ۲۷۲ برابر از حالت به‌کارگیری اتیلن گلیکول در دمای ۲۹۸,۱۵ کلوین بیشتر است.	In_2O_3	
Bagheli et al. [23]	حداکثر افزایش، ۳۶۰ درصد، در دمای ۶۵ درجه سانتی‌گراد	Fe_2O_3	
Coelho et al. [24]	هدایت الکتریکی با افزایش دما زیاد می‌شود.	CuO	water
Anu and Hemalatha [25]	تا ۹۴ درصد افزایش در دمای ۳۰۸ کلوین. درصد افزایش هدایت الکتریکی با افزایش دما کم می‌شود، چون آشفته‌گی حرارتی مانع رفتار نفوذی می‌شود.	un-doped and zinc doped cobalt ferrite	
Heyhat and Irannezhad [27]	حداکثر تقویت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و نسبت جرمی ۰,۰۵ درصد GO به‌دست آمد. این مقدار ۱۵ برابر از حداکثر به‌دست آمده برای ۱ درصد جرمی SiC در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد، بیشتر است.	Ag SiC Graphene oxide (GO)	
Nurdin and Satriananda [28]	تا ۲۲ درصد افزایش برای ۲,۵ درصد در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد	Fe_2O_3	
Ganguly et al. [34]	تا ۱۱۵ درصد افزایش برای ۳ درصد در دمای ۴۵ درجه سانتی‌گراد	Al_2O_3	EG-Water mixture
Minea and Luciu [35]	افزایش خطی با دما	Al_2O_3	
Sunder et al. [37]	افزایش خطی با دما بیشترین افزایش هدایت الکتریکی برای ۰,۱ درصد ND-Ni در دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد است با ۱۳۳۹,۸۱ درصد افزایش.	ND-Ni nano-composite	
Chereches and Minea [38]	افزایش خطی با دما	TiO_2 SiO_2 alumina + titania hybrid alumina + silica hybrid	
Islam et al. [39] Islam and Shabani [40]	حداکثر افزایش ۱۳ برابری برای ۰,۵ درصد در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد	TiO_2	EG-Water mixture
Sarojini et al. [41]	افزایش خطی با دما. برای نسبت‌های حجمی پایین (کمتر از ۰,۵ درصد) افزایش قابل ملاحظه‌ای در هدایت الکتریکی با دما مشاهده نمی‌شود.	Cu Al_2O_3 CuO	
Guo et al. [42]	در دما ۴۵ درجه سانتی‌گراد برای نانوسیال با آب تا ۱۰ برابر افزایش	SiO_2	
Ijam et al. [43]	در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، حداکثر افزایش هدایت الکتریکی در غلظت ۰,۱۰ درصد، ۱۶۶۴ درصد است.	graphene	
Khdher et al. [45]	حداکثر افزایش ۵۱۱۲ درصدی در دمای ۳۰ درجه سانتی‌گراد و در غلظت ۰,۱ درصد Al_2O_3 به‌دست آمد. دما به‌صورت خطی بر هدایت الکتریکی اثر دارد.	Al_2O_3	bio glycol
Naddaf and Heris [47]	در محدوده دمایی ۵ تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، دما به‌صورت خطی بر هدایت الکتریکی اثر می‌گذارد.	Graphene MWCNT	diese l oil

۲-۶-۴- عوامل دیگری که بر هدایت الکتریکی تأثیر می گذارد

عوامل دیگری که ممکن است بر خواص سیال‌های تقویت شده با نانوذرات تأثیر بگذارند را می‌توان در قالب وجود یا عدم وجود عوامل فعال، ابعاد نانوذرات و روش آماده‌سازی خلاصه کرد. متأسفانه تاکنون در رابطه با هدایت الکتریکی مطالعات نظام‌مندی انجام نشده است. در هر صورت، بعضی مولفان (به مراجع [۲۶، ۴۱] رجوع کنید) تلاش کردند تا این ویژگی‌ها را، مانند آنچه در ادامه بیان خواهد شد، تبیین کنند.

تأثیر عوامل فعال سطحی به‌ندرت بررسی شده و نتیجه خاصی نمی‌توان گرفت. مولف فقط دو تحقیق در این موضوع پیدا کرده و نتایج آن‌ها پراکنده است.

شغل و همکاران [۲۶] مطالعه‌ای جالب درباره چند نانوذره که در آب و آب+SDS (سدیم دودسیل سولفات) در غلظت‌های مختلف پخش شده، انجام دادند. آن‌ها اعلام کردند که هدایت الکتریکی آب خالص با SDS با افزایش غلظت مواد فعال سطحی زیاد می‌شود (یعنی، ۲ غلظت متفاوت SDS در نظر گرفته می‌شود: ۰,۰۱ و ۰,۰۲ درصد وزنی). در رابطه با نانوسیالات دارای SDS، اثر عوامل فعال سطحی با نوع نانوذره مرتبط است. برای مثال در نانوسیالات TiO_2 , ZnO , MgO , Al_2O_3 و CuO اضافه کردن نانوذرات هدایت الکتریکی سیال مبنا و سیال مبنا + عوامل فعال سطحی را زیاد می‌کند. با این وجود، برای نانوسیالات MWCNT پدیده مشابهی مشاهده نشده است (یعنی با یا بدون افزودن عوامل فعال سطحی). برای تمام نانوسیالات، به‌جز MWCNT، اضافه کردن عوامل فعال سطحی باعث افزایش هدایت الکتریکی می‌شود. به‌علاوه، مولفان نتایج خود درباره نانولوله‌های کربنی و توضیحات درباره مکانیزم هدایت یونی را با گفته گلوور و همکاران [۵۳] مقایسه کردند که در آن از نانولوله‌های کربنی با غلظت تا ۰,۲ درصد وزنی در محلول آب-EG 50:50 دیونیزه استفاده کردند. آزمایش‌های گلوور و همکاران [۵۳] افزایش خطی هدایت الکتریکی را تا ۱۳ برابر نشان می‌دهد و توجیه آن‌ها مبتنی بر هدایت یونی و فعال بودن نانولوله‌های کربنی است. به‌طور دقیق‌تر، نانولوله‌های فعال در مقایسه با نانولوله‌های اولیه غیرفعال هدایت الکتریکی را کاهش می‌دهند، چون آن‌ها اتصال دوگانه سیستم نانولوله‌ها را می‌شکنند. با این وجود، این مکانیزم‌ها نیاز به تفسیر بیشتر و مشاهدات تجربی بیشتر دارند.

ساروجینی و همکاران [۴۱] اثر عامل فعال سطحی SDS (با غلظت ۰,۱ و ۰,۵ mM) را بررسی کرده و نتایج را با تحقیقات بدون عامل فعال مقایسه کردند. مشاهده شد که افزایش

هدایت الکتریکی در حضور SDS با غلظت کمتر (تا ۰,۳ درصد)، بالاتر است و در غلظت‌های بیشتر (بیش از ۰,۳ درصد) پایین‌تر است.

۲-۶-۵- هدایت الکتریکی - روشی برای برآورد پایداری؟

تعداد مشخصی گروه تحقیقاتی وجود دارد [۲۲، ۳۴، ۴۰، ۵۱، ۵۴] که هدایت الکتریکی را به پایداری نانوسیال‌ها مرتبط کردند. با این وجود، تحقیقات بیشتری در این زمینه نیاز است تا پدیده مذکور را توضیح دهد، حتی باوجود توضیحاتی که در تحقیق حاضر ارائه می‌شود. برای مثال، آزمون‌ها باید در بازه زمانی مشخص و در رابطه با پتانسیل زیتا انجام شود. اگرچه، تفسیری که برپایه این مشاهده معتبر است، مبتنی بر این واقعیت است که وقتی انباشتگی اتفاق می‌افتد، خوشه‌ها تشکیل شده و این اتفاق پتانسیل سطحی نانوذرات را کم می‌کند. کاهش پتانسیل سطحی مشخصاً نشانه‌ای از عدم پایداری در یک نانوسیال است و نانوسیال ناپایدار، به دلیل کاهش پتانسیل الکتریکی، چند نانوذره ناپیوسته الکتریکی خواهد داشت (که باردار هستند). علاوه بر این، تراکم نانوذرات منجر به افزایش اندازه ذره می‌شود، پدیده‌ای که اثر منفی آشکاری بر حرکت براونی و تحرک الکتروفورز نانوذرات جامد دارد [۴۱، ۵۰].

فصل سوم

مواد و روش کار

۳-۱- اندازه گیری رسانایی موثر الکتریکی نانوسیالات:

برای اندازه گیری رسانایی الکتریکی نانوسیالات، یک سلول رسانایی بسیار دقیق (Tetracon) با دامنه کاربری $1\mu\text{S/cm}$ - 2 S/cm مورد استفاده قرار گرفته است. طول میله سلول 120 nm و قطر آن 15 nm است. در مقایسه با سلولهای اندازه گیری متعارف با دو الکترود، سیستم ۴ الکتروده Tetracon مجهز به سنسور دمای استاندارد داخلی، درجه دقت بسیار بالاتری دارد. در شکل ۳-۱ دستگاه هدایت الکتریکی سنج را مشاهده میکنید.



شکل ۳-۱- تصویر اندازه گیری رسانایی موثر الکتریکی

رسانایی الکتریکی بعنوان تابعی از جزء حجمی نانوذرات (ϕ) و دما (T) اندازه گیری شد. زمان پاسخ اندازه گیری مشخصاً حدود 20 s بود. رسانایی الکتریکی نانوسیال آبی اکسیدمس ابتدا در دمای اتاق (25°C) اندازه گیری شد و اندازه گیری های بعدی نیز انجام پذیرفتند تا اثرات تغییرات دما و جزء حجمی بر روی رسانایی موثر الکتریکی نانوسیال مورد امتحان قرار گیرد.

۳-۲- تهیه نانوسیالات

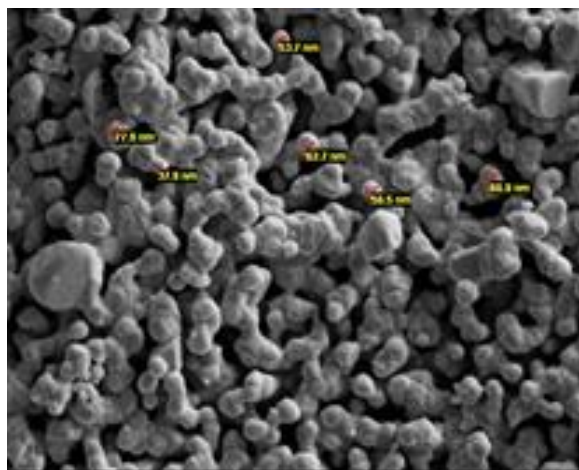
طرز تهیه نانو سیال اولین قدم کلیدی در کاربردی کردن این مفهوم برای تغییر راندمان انتقال حرارت می باشد. تهیه نانو سیال را که از طریق افزودن نانو ذرات به سیال پایه صورت می گیرد نباید مانند یک اختلاط ساده جامد مایع در نظر گرفت. زیرا تهیه نانو سیال مستلزم ایجاد شرایط خاص و ویژه ای است. برخی از این شرایط خاص عبارتند از یکنواخت بودن

سوسپانسیون، پایدار بودن سوسپانسیون و توده‌های شدن کم ذرات وعدم تغییر ماهیت شیمیایی سیال برای رسیدن به چنین خواص ویژه ای از راهکارهای مختلف استفاده می شود. بدین ترتیب پس از تهیه نانو ذرات با استفاده از معادله زیر غلظت‌های مختلف نانو سیال ساخته شد:

$$\% \text{ volume concentration } \varphi = \frac{\left[\frac{w_{np}}{\rho_{np}} \right]}{\left[\frac{w_{np}}{\rho_{np}} + \frac{w_{water}}{\rho_{water}} \right]} \quad (1-3)$$

که در آن ρ_{np} و ρ_w دانسیته نانو ذرات و آب و w جرم آنها می‌باشد.

نانو ذراتی که به روش دو مرحله‌ای تهیه می‌گردند باید تا حد ممکن پایدار بوده و ذرات پراکنده شده در سیال تجمع پیدا نکرده و کلوخه و ته‌نشین نشوند برای رسیدن به چنین وضعیت پایداری باید مسأله پایدارسازی تعلق نانو ذرات در سیال مورد توجه قرار بگیرد. برای پایداری نانو سیال در این تحقیق از دستگاه همزن مغناطیسی استفاده شد. شدت همزن تأثیر مهمی بر پراکندگی نانو ذرات در درون سیال پایه دارند پیوندهای ضعیف ایجاد شده در بین ذرات توده‌ای شده با اعمال نیرو شکسته می‌شود با این حال نانو ذرات به شدت متمایل به توده‌ای شدن مجدد هستند یکی از دلایل این مسأله نیروی واندروالس می‌باشد. به منظور ارزیابی نانو سیال تهیه شده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) (PHILIPS EM 208) استفاده گردید. به منظور ارزیابی مورفولوژی نانو ذرات سنتز شده از آنالیز TEM استفاده گردیده شد. شکل ۲-۳ نشان دهنده SEM نانو کامپوزیت سنتز شده می‌باشد.



شکل ۲-۳- تصاویر SEM نانوذرات (۲۰٪ وزنی برای آلومینا و ۸۰٪ برای روی) بعد از پراکندگی

با توجه به مطالب گفته شده نمونه (۲۰٪ وزنی برای آلومینا و ۸۰٪ برای روی) برای آزمایشات انتقال حرارت انتخاب گردیده شد. انتخاب این درصد به این دلیل می باشد که هدف اصلی تحقیق بهبود خواص اکسید روی می باشد بنابراین افزودن بیشتر آلومینا سب دور شدن روی از مشخصات اصلی خود می باشد.

۳-۳- نتایج و بحث

شکل ۳-۳ نشان دهنده دستگاه ضریب هدایت حرارتی می باشد که جهت اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی سیالات بکار میرود و برای محدوده های دمایی ۰ تا ۱۰۰ درجه سانتیگراد را به راحتی پاسخگو می باشد.



شکل ۳-۳- دستگاه ضریب هدایت حرارتی سنج

در جدول ۳-۱ نتایج اصلی در مورد هدایت حرارتی نانوسیالات بر پایه آب نشان داده شده است که مشخص است هدایت حرارتی نانوسیالات هیبریدی بر پایه آب تاکنون در مقالات مورد توجه قرار نگرفته است. این تحقیق به طور تجربی پایداری پراکندگی و هدایت حرارتی نانوسیالات دارای نانوذرات Al_2O_3 و ZnO را برای غلظت های مختلف (۰,۵، ۰,۲۵، ۰,۰۷۵ و ۰,۰۱ درصد وزنی) در محدوده دمایی [۲۵ درجه سانتیگراد تا ۵۰ درجه سانتیگراد] مطالعه کردند. آنها به طرز جالب توجهی دریافتند که ضریب هدایت حرارتی سوسپانسیون با افزایش دما افزایش می یابد. به عنوان مثال، در غلظت ۱ درصد وزنی با اندازه نانوذرات ۱۲۵ نانومتر در

محدوده دمایی ۲۵-۵۰، به میزان بالای ۱۰۰٪ افزایش یافته است. همچنین افزایش هدایت حرارتی برای هر دو نانوسیال یک تابع نسبتاً خطی از غلظت و دما می‌باشد. همچنین مطالعات پیشین نیز نشان دادند که هدایت حرارتی نانوسیالات کاملاً وابسته به دما، غلظت نانوذرات، نوع نانوذرات و سیال پایه است. نتایج نشان داد که با افزایش غلظت و دما، هدایت حرارتی نانوسیال افزایش می‌یابد.

با توجه به افزایش مشاهده شده در هدایت حرارتی، پیش بینی می‌شود نانوسیالات دارای انتقال حرارت بیشتری نسبت به سیالات پایه دارند که قادرند موجب بهره‌وری تجهیزات انتقال حرارت بسیار کوچکتر و مؤثر برای خیلی از کاربردهای صنعتی از جمله الکترونیک، انرژی، مواد غذایی و پزشکی را فراهم کند. بررسی حاضر فقط روی برنامه‌های کاربردی از جمله هدایت الکتریکی نانوسیالات برپایه آب متمرکز است. مطالعات تجربی و عددی موجود در مقالات به طور عمده خواص ترموفیزیکی نانوسیالات را مورد بررسی قرار داده‌اند.

جدول ۳-۱- داده‌های آزمایشگاهی هدایت حرارتی نانوسیالات در دماهای مختلف و کسر حجمی گوناگون

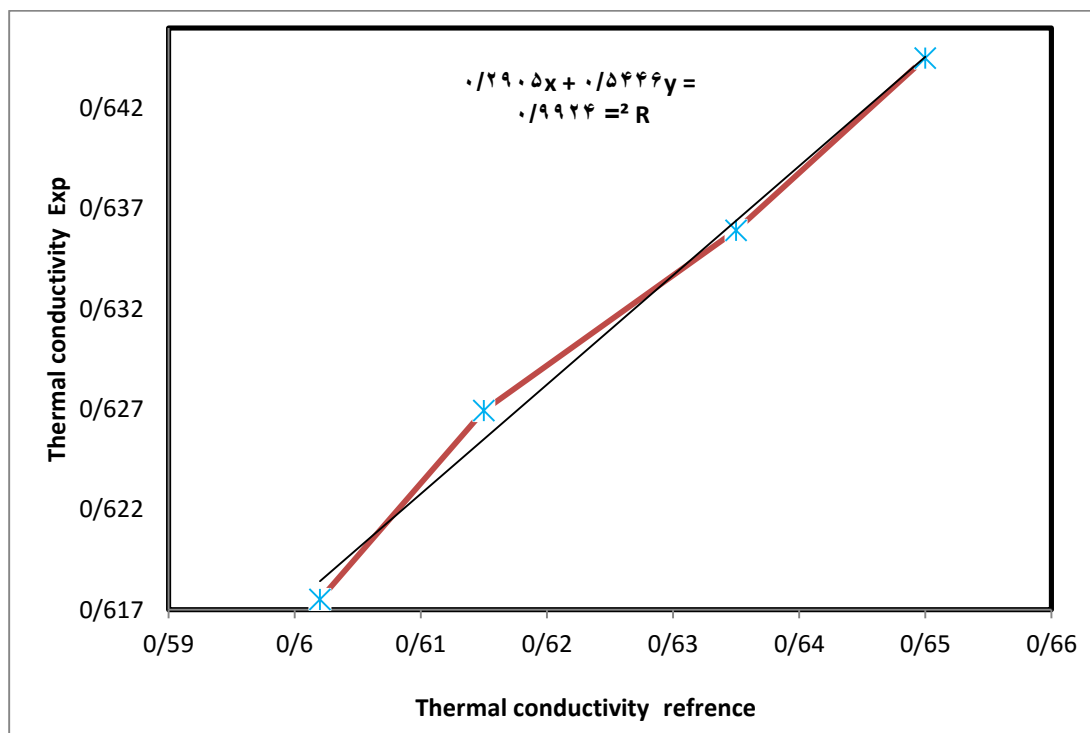
دما (°C)	k درصد افزایش نسبت به سیال پایه (%)	سایز نانوذرات (nm)	غلظت نانوسیال ϕ
25	19	125	0.25wt%
25	30-76	125	1-0.5vol.%
25	20-75	125	0.25-1 vol.%
25-30	23-50	125	0.75 vol.%
30-40	33-74	125	0.75 vol.%
35-45	50-85	125	0.75 vol.%
45-50	75-90	125	0.75 vol.%
25-40	31-100	125	1 vol.%
25-40	8-116	125	0.25-0.75 vol.%
25	Over 100	125	1 vol.%
30	Over 100	125	1 vol.%
35	Over 100	125	1vol.%
40	Over 100	125	1vol.%
25-40	24-68	125	0.5 vol.%

هدایت حرارتی k آب خالص به ترتیب ۳،۳ و ۴،۱ کمتر از آب مایع در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد است. روابط زیادی برای پیش بینی هدایت حرارتی نانوسیالات به عنوان تابعی از هدایت حرارتی نانوذرات k_{np} و هدایت حرارتی سیالات پایه k_{bf} و کسر حجمی نانوذرات ϕ بسط داده شده است. مدل چوی و پاک مدل تعمیم یافته Maxwell است:

$$k_{nf} = k_{bf} \frac{k_{np} + (n-1)k_{bf} - (n-1)(k_{np} - k_{bf})\phi}{k_{np} + (n-1)k_{bf} + (k_{np} - k_{bf})\phi} \quad (2-3)$$

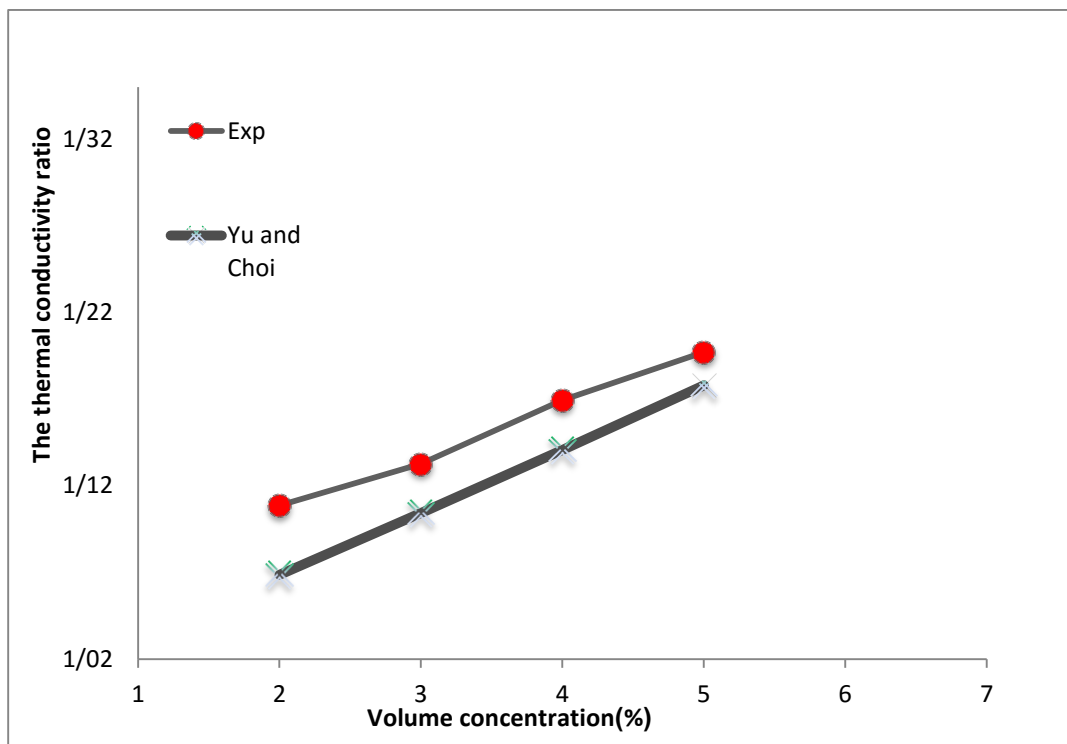
n یک ضریب شکلی تجربی که برابر $n = 3 / S$ می باشد و S ضریب کروی بودن نانوذرات است. برای ذرات کروی $S = 1$ می باشد که مدل Maxwell را برای غلظت های کم میکروذرات، بسط می دهد.

نمودار ۱-۳ نمایانگر مقایسه ای داده های هدایت حرارتی مرجع با داده های آزمایشگاهی میباشد. که ضریب همبستگی به خوبی نشانگر رابطه معنادار آنها میباشد.



نمودار ۱-۳- مقایسه داده های تئوری هدایت حرارتی با داده های آزمایشگاهی

به طور تجربی تأثیر نانوذرات و نوع سیال پایه را بر هدایت حرارتی محلول را نشان میدهد. دو نانوذره Al_2O_3 و ZnO به صورت هیبریدی در آب پراکنده شدند و در نتیجه یک نانوسیال خالص حاصل شد. نتایج نشان داد که هدایت حرارتی مخلوط بطور خطی با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می یابد. همچنین که ضریب هدایت حرارتی نانوسیال تجربی در مقایسه با ضریب هدایت حرارتی حاصل شده از مدل تئوری چوی همبستگی خوبی نشان میدهد.



نمودار ۳-۲- مقایسه ضریب هدایت حرارتی نانوسیال آزمایشگاهی با ضریب هدایت حرارتی حاصل شده از مدل تئوری

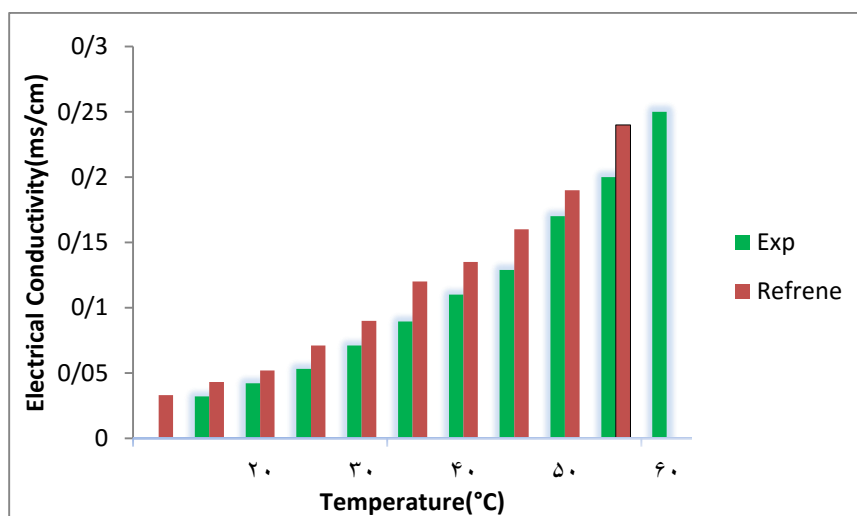
مقدار رسانایی الکتریکی آلومینا $10^{-8} \mu\text{S/cm}$ در متون گزارش شده است [۱۹ و ۲۰]؛ رسانایی سیال پایه (آب مقطر) که در مطالعه حاضر مورد استفاده قرار گرفته از $1 \mu\text{S/cm}$ تا $3.5 \mu\text{S/cm}$ در دامنه دمایی آزمایش حاضر، متغیر است. نمودار ۳-۲ رسانایی الکتریکی اندازه گیری شده آب بعنوان تابعی از دما را نشان میدهد. میتوان دید که مقادیر رسانایی که از آزمایش بدست آمده اند با مقادیر مرجع موجود در متون [۲۱-۲۳] از لحاظ مرتبه بزرگی، بخوبی مطابقت دارند.

نمودار ۳-۲ رسانایی موثر الکتریکی در نانوسیال آلومینا در جزء حجمی‌های مختلف را نشان میدهد. مشاهده میشود که رسانایی الکتریکی نانوسیال آلومینا با افزایش جزء حجمی نانوذرات آلومینا، تقریباً بطور خطی افزایش می‌یابد. داده‌های آزمایشی همچنین نشان میدهند که برای یک جزء حجمی داده شده، رسانایی الکتریکی سوسپانسیون با افزایش دما، افزایش می‌یابد. بیشترین مقدار رسانایی الکتریکی، $351 \mu\text{S/cm}$ ، برای جزء حجمی ۰.۰۳ در دمای 45°C بدست آمد؛ مقدار متناظر در دمای اتاق ($T=24^\circ\text{C}$) برابر با $258 \mu\text{S/cm}$ بود.

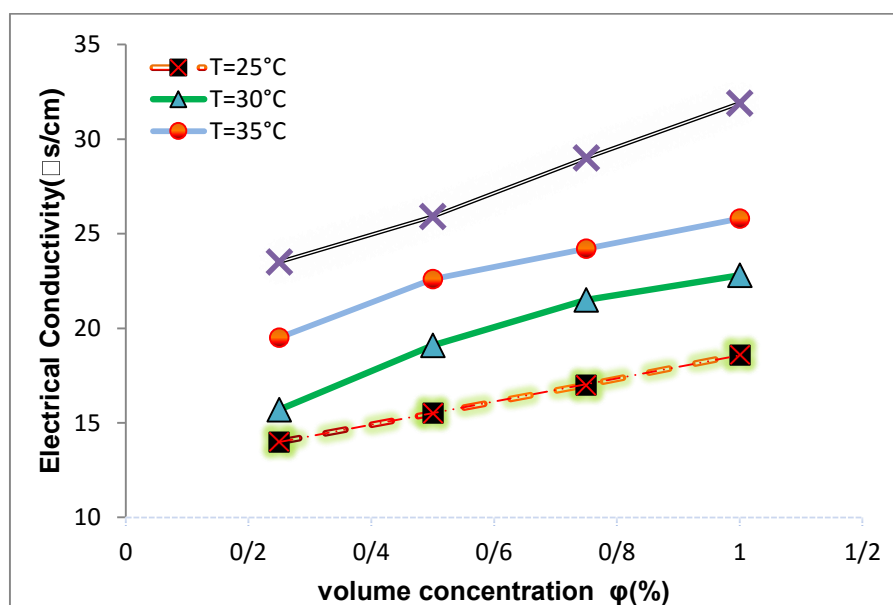
امتحان کردن افزایش رسانایی الکتریکی نانوسیال آلومینا و روی به نسبت سیال پایه حائز اهمیت است. به این خاطر، نرخ افزایش رسانایی موثر الکتریکی (تفاوت بین رسانایی

1 Order of magnitude

الکتریکی سوسپانسیون نانوذرات و رسانایی الکتریکی سیال پایه، تقسیم بر رسانایی الکتریکی سیال پایه) بعنوان تابعی از دما، در جزء حجمی های 1-0.25% رسم شده است. همانطور که در نمودار 3-3 و 3-4 مشاهده میشود، نرخ افزایش بنسبت بیشتر شدن جزء حجمی نانوذرات، بیشتر میشود، که نشانگر وابستگی به جزء حجمی است؛ این تغییر همچنین به دما نیز وابسته است (هرچقدر دما بالاتر باشد، افزایش یافتن بیشتر است). یک افزایش چشمگیری در رسانایی الکتریکی برای غلظت حجمی 0.75% ($\phi=0.075$) نانوذرات آلومینا در آب در دمای اتاق (T = 25°C)، مشاهده شد.

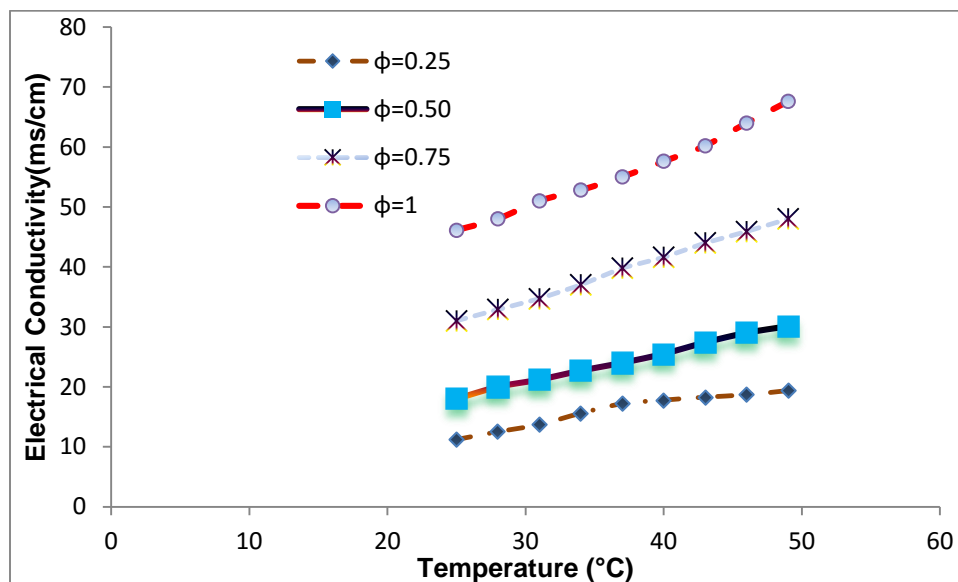


نمودار 3-3- رسانایی الکتریکی اندازه گیری شده آب بعنوان تابعی از دما.



نمودار 3-4- رسانایی موثر الکتریکی نانوسیال آلومینا

با بالا رفتن دما، در دمای 40 °C افزایشی 100% در رسانایی الکتریکی برای همان جزء حجمی $\phi=0.075$ اندازه گیری شد. برای بهتر شدن درک فیزیکی در مورد تغییر رسانایی نانوسیال، داده‌های آزمایشی را میتوان با پیش‌بینیهای مدل تئوریک کلاسیک مقایسه کرد. مدل رسانایی مکسول¹ در اجسام ناهمگن اولین رویکرد تئوریک بود که برای محاسبه رسانایی موثر الکتریکی یک سوسپانسیون دلخواه از ذرات کروی، مورد استفاده قرار گرفت.



نمودار ۳-۵- افزایش رسانایی الکتریکی نانوسیال آبی تغییر با دما در جزء حجمی‌های مختلف

این مدل پیش‌بینی میکند که رسانایی موثر سوسپانسیون (λ_{eff})، تابعی از رسانایی ذرات (λ_p)، رسانایی سیال پایه (λ_{bf}) و جزء حجمی (ϕ) ذرات است:

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{bf}} = 1 + \frac{3(\alpha - 1)\phi}{(\alpha + 2) - (\alpha - 1)\phi} \quad (3-3)$$

که در آن $\alpha = \lambda_p / \lambda_{bf}$ ، نسبت رسانایی در دو فاز است.

تعمیم مدل مکسول بسته به ماهیت هدایتی ذرات و سیال پایه، به حالات زیر منجر

میشود [۲۵]:

- a) $\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{bf}} = 1 - \frac{3}{2}\phi$, for $\lambda_p \ll \lambda_{bf}$ ذرات عایق
- b) $\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{bf}} = 1$, for $\lambda_p = \lambda_{bf}$ رسانایی برابر
- c) $\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{bf}} = 1 + 3\phi$, for $\lambda_p \gg \lambda_{bf}$ ذرات با رسانایی بالا

حالات a تا c برای مقدار ثابت نسبت رسانایی (λ_p / λ_{bf})، تاثیر تئوریک جزء حجمی

ذرات بر رسانایی نسبی ($\lambda_{eff} / \lambda_{bf}$) را، آنطور که مدل مکسول پیش‌بینی کرده، نشان میدهند.

¹ Maxwell

کاربری مدل مکسول برای سوسپانسیونهای رقیق ($\phi < 1$) با ذرات بزرگ (سایز ذره بزرگتر از دهها میکرومتر) با موفقیت توسط داده‌های آزمایشی تایید شده است [۲۶ و ۲۷]. شرایط آزمایشی حال حاضر متناظر با حالت a در مدل مکسول است (ذرات آلومینا مشخصه رسانایی الکتریکی بسیار ضعیفی دارند)، که در آن شیب منحنی رسانایی نسبی برای ذرات عایق مقداری منفی دارد (-1.5). بنابراین انتظار میرود که رسانایی الکتریکی مخلوط کاهش یابد. با این حال از شکل ۳ میتوان مشاهده کرد که رسانایی الکتریکی اندازه گیری شده سوسپانسیون بطور خطی با جزء حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. بنابراین مدل تئوریک [۲۴]، که اندازه گیری پراکندگیهای ذرات سایز بزرگ (میکرومتر و بزرگتر) را بخوبی پیش بینی میکرد [۲۶ و ۲۷]، افزایش رسانایی در مخلوطهای سیال-نانوذرات را کمتر از میزان واقعی پیش بینی میکند. دلیل این امر، این واقعیت است که جدا از ویژگیهای فیزیکی سیال و رسانایی ذرات و سیالات، رسانایی موثر الکتریکی نانوسوسپانسیونهای کلویدی^۱ در یک مایع، وابستگی پیچیده ای به مشخصه‌های EDL، جزء حجمی، غلظت یونی و سایر ویژگیهای شیمی فیزیکی نشان میدهد که بخوبی قابل مدلسازی با مدل استاندارد نیست. در واقع، افزایش مشاهده شده در رسانایی الکتریکی سوسپانسیون بنسبت سیال پایه، حاصل اثر بار خالص ذره جامد و تعاملات لایه دابل الکتریکی^۲ (EDL) است [۲۸ و ۲۹]. وقتی ذرات آلومینا در یک مایع قطبی (در این مورد آب) معلق میشوند، بارهای الکتریکی در سطحشان ایجاد میشود. یونهای دارای بار مخالف سطح ذره، جذب میشوند که منجر ایجاد یک لایه پخش شده در اطراف ذره میگردد. این لایه با نام لایه دابل الکتریکی [۲۸] شناخته شده و عموماً بوسیله پارامتر κ^{-1} شناخته میشود (طول دبای^۳). برای این حالت وقتی قدرت یونی محلول خیلی پایین باشد، مقدار یونهای داخل محلول برای جبران بار الکتریکی کافی نیست، و بنابراین چگالی بار الکتریکی روی سطح ذره بالاست. بار سطحی ذرات، همراه با ابر یونی که EDL را تشکیل میدهند، از طریق معلق سازی، فعالانه مکانیزم رسانایی را بهبود میبخشند. بعلاوه، اجرام معادل ذره ای کاهش یافته، مشخص کننده پراکندگی همسان نانوذرات هستند که منجر به افزایش تحرک پذیری الکتروفوریتیک^۴ میشود که بنوبه خود رسانایی موثر الکتریکی سوسپانسیون نانوذره را افزایش میدهد. با افزایش جزء حجمی ذره، مسیرهای رسانایی در محلول بیشتر در دسترس قرار میگیرند، که آنهم بنوبه خود رسانایی الکتریکی کلی محلول را افزایش میدهد. پارامتر مهم دیگر در این زمینه نقش

1 Colloidal nanosuspensions

2 Electrical Double Layer

3 Debye length

4 Electrophoretic

ضخامت نسبی EDL است EDL های ضخیمتر تمایل به افزایش دادن کلی غلظت فاز حامل دارند چراکه در این فرایند، تعداد بیشتری از ضد یونها EDL را ترک میکنند (استثنای دونان^۱). این امر منجر به افزایش رسانایی موثر الکتریکی میشود. طبق تئوری DLVO [۲۸]، پارامتر ضخامت EDL، κ با دمای مطلق T رابطه عکس دارد. بنابراین با افزایش در دما κ^{-1} (همان ضخامت EDL) نیز افزایش می‌یابد که اثری مثبت بر افزایش رسانایی الکتریکی در سوسپانسیون نانوذره دارد.

در اینجا میتوان به این نکته اشاره کرد که یک عامل مهم دیگر که شاید بر رسانایی الکتریکی تاثیر بگذارد، کپه شدن نانوذرات در محلول است. ارتباطات بینایی پیچیده بین کیتیک تراکمی نانوذرات و الکتروستاتیک درون لایه دوپل الکتریکی، فرایند انتقال بار در سوسپانسیون را تعیین میکنند [۲۵ و ۲۸]. تئوری پایداری ذرات کلوییدی (DLVO) کل انرژی تعاملی بین جفت ذرات را بعنوان تابعی از فاصله بینشان توضیح میدهد. این انرژی حاصل موازنه بین پتانسیل دافعه ناشی از بارهای الکتریکی موجود در EDL و پتانسیل جاذبه ناشی از نیروهای وان در والس^۳ است. وقتی پتانسیل دافعه بالا باشد، سوسپانسیونها پایداری دارند و بعید است که منعقد شوند. کاهش نیروی دافعه ممکن است بتدریج منجر به خوشه شدن و ایجاد کپه ذرات شود. در زمینه مطالعه آزمایشی حاضر، در حالی که آلومینا یک رسانای الکتریکی بسیار ضعیف است (مقاومت آلومینا از مرتبه $10^{14} \Omega$ گزارش شده) [۱۹ و ۲۰] و قدرت یونی محلول بسیار پایین است (سیال پایه آب دیونیزه است)، مقدار یونهای داخل محلول برای جبران بارهای الکتریکی کافی نیست، و بنابراین چگالی بار خالص الکتریکی روی سطح ذرات بالاست. پس خاصیت دافعه الکتروستاتیک بر نیروهای جاذبه غالب میشود [۲۸]. با این حال، نمیتوان از حدی از بهم چسبیدگی در نانوذرات Al_2O_3 آبی چشمپوشی کرد، که این امر بخاطر ماهیت غیر خیس Al_2O_3 خالص تشدید هم میشود. اثر کپه شدن نانوذرات روی رسانایی الکتریکی نانوسیال هنوز کاملاً روشن نیست و تا امروز یک حوزه تحقیقی فعال بشمار می‌آید. همانگونه که توسط بوردی و دیگران^۴ [۳۱] مشاهده شده، تشکیل کپه‌ها تعداد موثر حاملهای بار را کاهش میدهد و بنابراین رسانایی الکتریکی را کم میکند. علاوه بر این، افزایش حاصله در اندازه موثر «ذره» بعنوان کند کننده حرکت براونی عمل کرده که در نتیجه تاثیری منفی بر رسانایی الکتریکی میگذارد. اگر نانوذرات از ماده ای رسانای الکتریسته باشند (مثلاً پودر فلز)

1 Augment the bulk carrier phase concentration

2 Donnan exclusion

3 Van der Waals

4 Bordi et al.

رسانایی الکتریکی می‌تواند بخاطر ایجاد مسیرهای رسانایی کوتاه از طریق تماس کپه به کپه، بازهم افزایش یابد. با این حال، Al_2O_3 ذاتا رسانای ضعیفی است و این مکانیزم عملا بحساب نمی‌آید. در کار اخیر چاکرابورتی و پازی^۱، مکانیزم مشابهی پیشنهاد شده است [۳۲]، که در آن مسیر رسانایی الکتریکی بالای ایجاد شده از طریق تماس فیزیکی ذرات در کپه، با کاهش چگالی عددی ذرات از طریق تجمع، مخالفت میکند. علاوه بر این، تشکیل EDL ضخیمتر منجر به تولید ضد یونهای بیشتر شده اما در عوض تحرک الکتروفوریتیک ذرات/کپه‌ها را هم کاهش میدهد. بنابراین میتوان نتیجه گرفت که رسانایی موثر الکتریکی ممکن است همیشه با کپه شدن نانوذرات افزایش نیابد.

از آنجا که داده‌های آزمایشی رابطه ای خطی بین فاکتور افزایش از سوئی و هم دما و هم جزء حجمی نانوذره از سوئی دیگر نشان داده اند (شکل 4a و b)، یک تحلیل رگرسیون خطی دوفاکتوره بکار گرفته شد، تا رابطه ای تجربی برای فاکتور بدون بعد افزایش برحسب تابعی از دما، در جزء حجمی‌های مختلف بدست آید. نتیجه در معادله (۳-۴) با مقدار R^2 برابر با ۰,۹۹۰۱ داده شده.

$$(\lambda_{\text{eff}} - \lambda_{\text{bf}}) / \lambda_{\text{bf}} = 3679.049\phi + 1.085799T - 43.6384 \quad (3-4)$$

در اینجا λ_{eff} رسانایی الکتریکی موثر نانوسیال، λ_{bf} رسانایی الکتریکی سیال پایه، ϕ جزء حجمی نانوذره، و T دمای کلی نانوذره برحسب $^{\circ}\text{C}$ است. در اینجا میتوان به این نکته توجه کرد که معادله (۳-۴) نشاندهنده اهمیت نسبی اثر ϕ و T روی λ_{eff} نانوسیال آلومیناست. ضریب جزء حجمی خیلی از ضریب دما بزرگتر است که نشاندهنده وابستگی شدیدتر رسانایی موثر الکتریکی به جزء حجمی، بنسبت دماست.

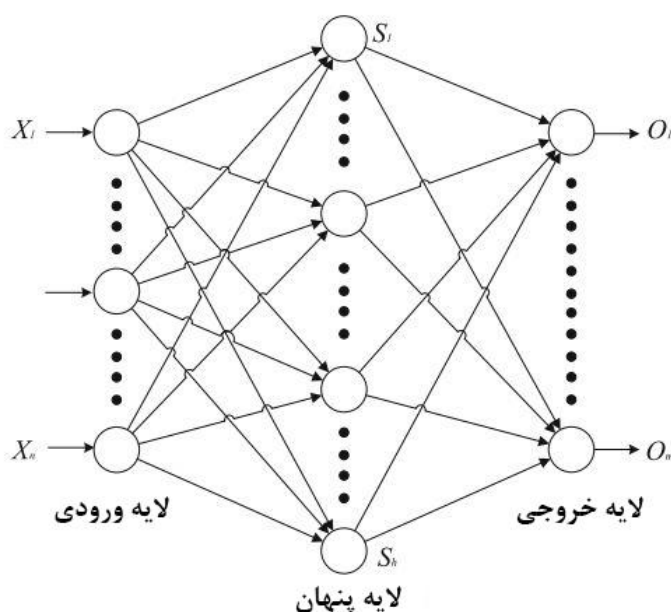
1 Chakraborty and Padhy

فصل چهارم

مدلسازی و بررسی نتایج

۴-۱- شبکه عصبی بازخورد روبه جلو^۱

در رویکرد پیشنهادی از یک مدل شبکه عصبی چند لایه بازخورد روبه جلو^۲ به همراه تابع یادگیری انتشار عقب لونیبرگ^۳ استفاده نمودیم. یک شبکه عصبی بازخورد روبه جلو یک شبکه عصبی است که اتصالات میان نرون‌های آن بصورت یک طرفه و در یک سمت می‌باشد. شکل ۴-۱ معماری یک شبکه عصبی چند لایه بازخورد روبه جلو را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل نشان داده شده است لایه اول، لایه ورودی و لایه‌ای انتهایی لایه خروجی نام دارد. لایه‌ای که لایه ورودی و خروجی را به یکدیگر متصل می‌سازد لایه پنهان نام دارد. همچنین X یک نمونه داده می‌باشد که بردار ویژگی آن بصورت $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ در لایه ورودی به شبکه عصبی مصنوعی داده می‌شود، الگوریتم شبکه مصنوعی تعلق نمونه‌های داده ورودی به کلاس‌های مختلف تعیین نموده و آن‌ها در لایه خروجی بصورت O_1, O_2, \dots, O_n ارائه می‌نماید.



شکل ۴-۱- معماری شبکه عصبی مصنوعی بازخورد روبه جلو

بطور کلی در یک شبکه عصبی چند لایه بازخورد روبه، محاسبه خروجی (تعلق نمونه- های داده به کلاس‌ها) توسط مراحل زیر انجام می‌پذیرد:

1 Feed forward neural network
2 Multilayer Feed Forward
3 Levenberg-Marquardt Back Propagation

۱- یال‌های متصل کننده گره‌های لایه ورودی به لایه پنهان هر یک دارای وزنی معین می‌باشند که مجموع اوزان لایه ورودی توسط رابطه زیر بدست می‌آید.

$$s_j = \sum_{i=1}^n (W_{ij}X_i) - \theta_j \quad j = 1, 2, \dots, h \quad (1-4)$$

در رابطه فوق n تعداد گره‌های لایه ورودی، W_{ij} وزن اتصالی گره i ام لایه ورودی به گره j ام لایه پنهان، θ_j آستانه گره j ام لایه پنهان و X_i نشان دهنده ورودی i ام می‌باشد.

۲- خروجی هر یک از گره‌های لایه پنهان بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$S_j = \text{sigmoid}(s_j) = \frac{1}{1+e^{-s_j}} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (2-4)$$

۳- خروجی نهایی بر مبنای خروجی هر یک از گره‌های لایه پنهان با استفاده از روابط

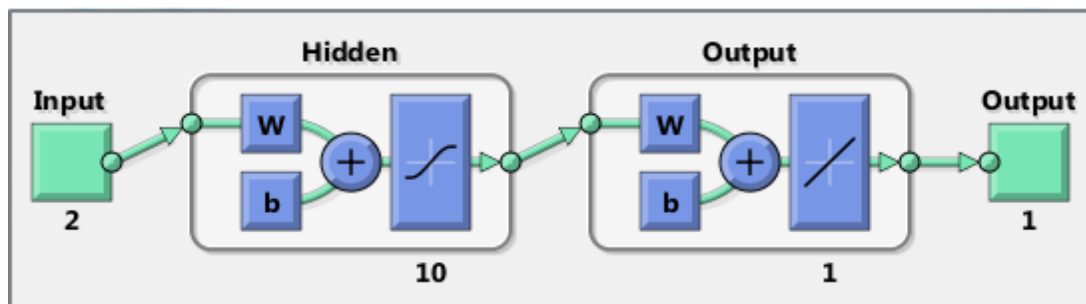
ذیل محاسبه می‌شود:

$$o_k = \sum_{j=1}^h (w_{jk}S_j) - \theta'_k \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (3-4)$$

$$O_k = \text{sigmoid}(o_k) = \frac{1}{1+e^{-o_k}} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (4-4)$$

که در روابط بالا w_{jk} وزن اتصال از گره j ام لایه پنهان به گره k ام لایه خروجی، k' آستانه گره k لایه خروجی است.

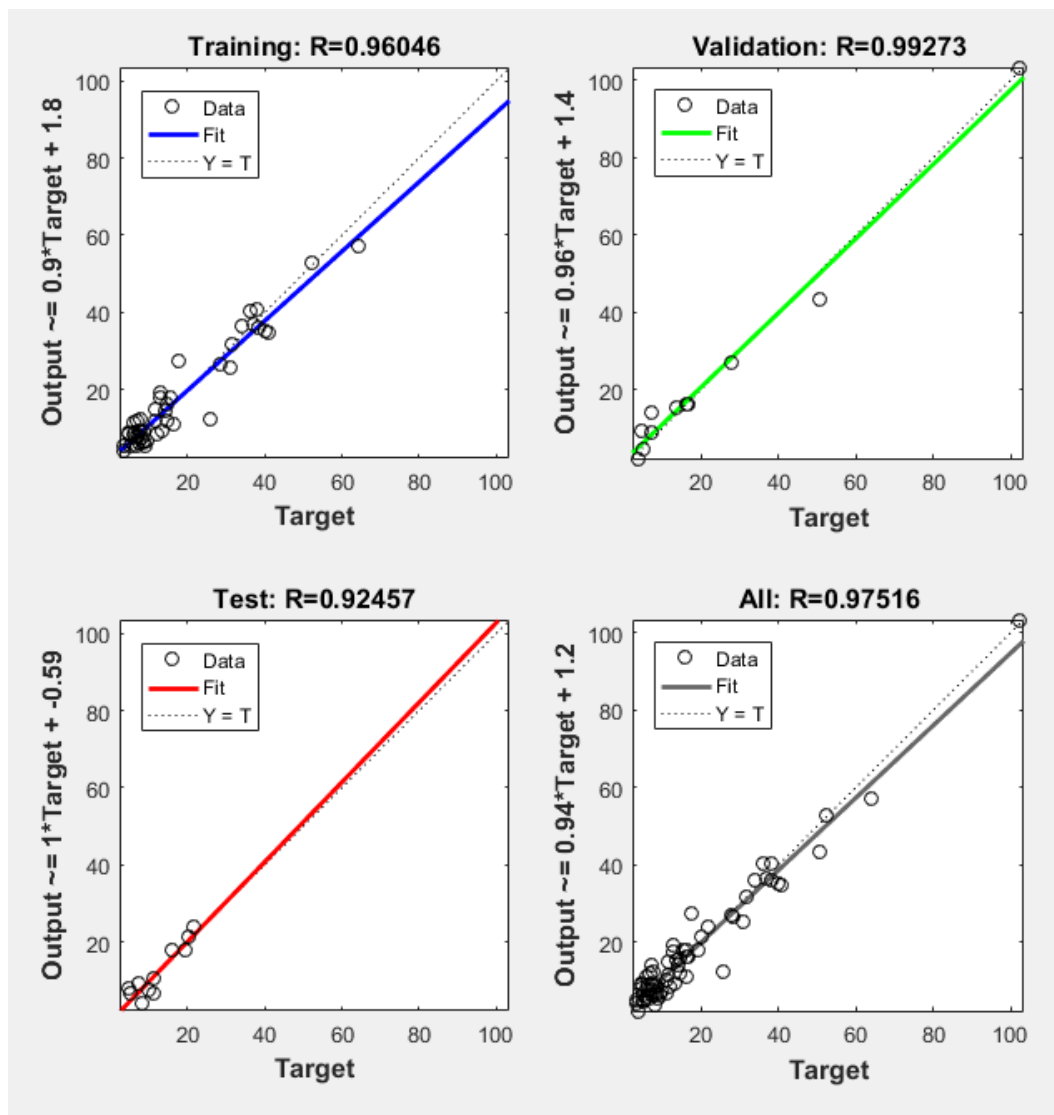
پارامترهای دما و کسر حجمی نانوذرات درون سیال پایه به عنوان داده‌های ورودی و هدایت الکتریکی به عنوان پارامتر هدف انتخاب گردیدند که توپولوژی و ساختار شبکه را در شکل ۲-۴ مشاهده می‌کنید.



شکل ۲-۴- توپولوژی و ساختار شبکه

شکل ۲-۴- نشان دهنده مقادیر پیش بینی شده برای داده‌های هدایت الکتریکی در مقابل مقادیر بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی می‌باشد. همانطور که مشخص است داده‌های نمودارها از خط $Y=X$ پیروی می‌نمایند که نشان شبکه توانسته است با دقت بالایی مقادیر را پیش بینی نماید. به عبارت دیگر، زمانی که مقادیر پیش بینی شده با مقادیر آزمایشگاهی متناظرشان یکسان باشند باید تابع خط ۴۵ درجه باشند. هر چه قدر پراکندگی مقادیر حول خط $Y=X$ کمتر باشد عملکرد سیستم بهتر می‌باشد. در علم آمار، این پراکندگی با ضریب

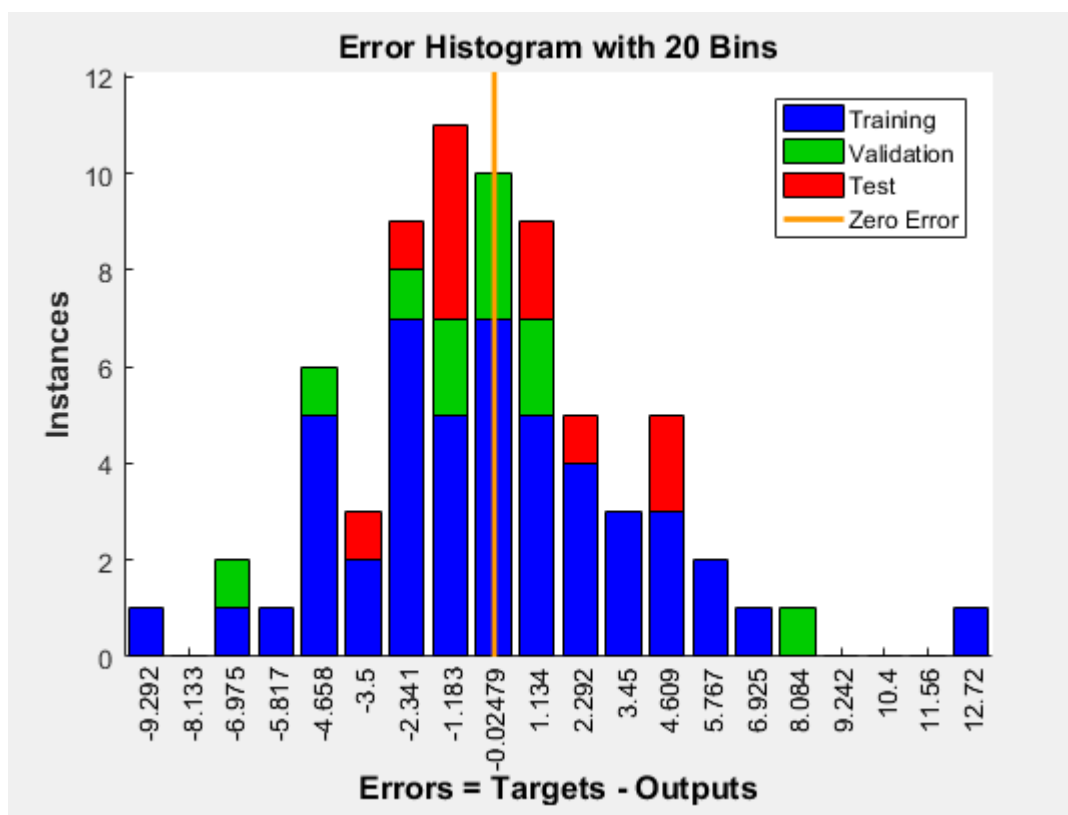
همبستگی نشان داده می‌شود. اگر ضریب همبستگی به عدد یک نزدیک باشد به این مفهوم می‌باشد که مقادیر پیش بینی شده برای مدل و اندازه گیری شده در آزمایشگاه یکسان می‌باشند. یکی از مشکلاتی که برای شبکه‌های عصبی با تعداد داده کم در آموزش آنها رخ می‌دهد بروز پدیده Overfitting می‌باشد که سبب می‌گردد مدل نتواند عمومیت پیدا کند. یکی از راهکارهای تشخیص سرباله Overfitting بررسی میزان خطا برای داده‌های تست و صحت می‌باشد. نزدیکی مقادیر ضریب همبستگی برای این نوع داده‌ها نشان می‌دهد که پدیده Overfitting در مدل رخ نداده است. همانطور که از نمودار پیداست ضریب همبستگی برای داده‌های تست در ضریب هدایت الکتریکی ۰.۹۲۴ و برای داده‌های صحت سنجی ۰.۹۹۲ می‌باشد که نشان می‌دهد در مدل ارائه شده این پدیده اتفاق نیفتاده است.



نمودار ۴-۱- بررسی مقایسه ای مقادیر پیش بینی شده ضریب هدایت الکتریکی توسط شبکه‌های عصبی و نتایج آزمایشگاهی (محور x (Target)): مقادیر آزمایشگاهی، محور (YOutput): مقادیر پیش بینی شده)

همانطور که از نمودار پیداست داده‌های پیش بینی شده انطباق خوبی بر نتایج آزمایشگاهی دارند. هم چنین در نمودار باقیمانده مقادیر خطا حول عدد صفر پراکنده شده اند. این به مفهوم این است که متوسط انحرافها نزدیک به صفر است. این خاصیت از این امر ناشی می‌شود که بعضی انحرافها مثبت و انحرافهای دیگر منفی اند، و مجموع انحرافهای مثبت مجموع انحرافهای منفی را خنثی می‌کنند.

همان طور که در نمودار ۴-۲- نشان داده شده است مقادیر اختلاف خطاهای به دست آمده برای داده‌های هدایت الکتریکی حول محور صفر پراکنده شده است البته این برای همه داده‌های صحت صنجی، آموزش و تست است که نشان از موفق بودن پیش بینی می‌باشد.

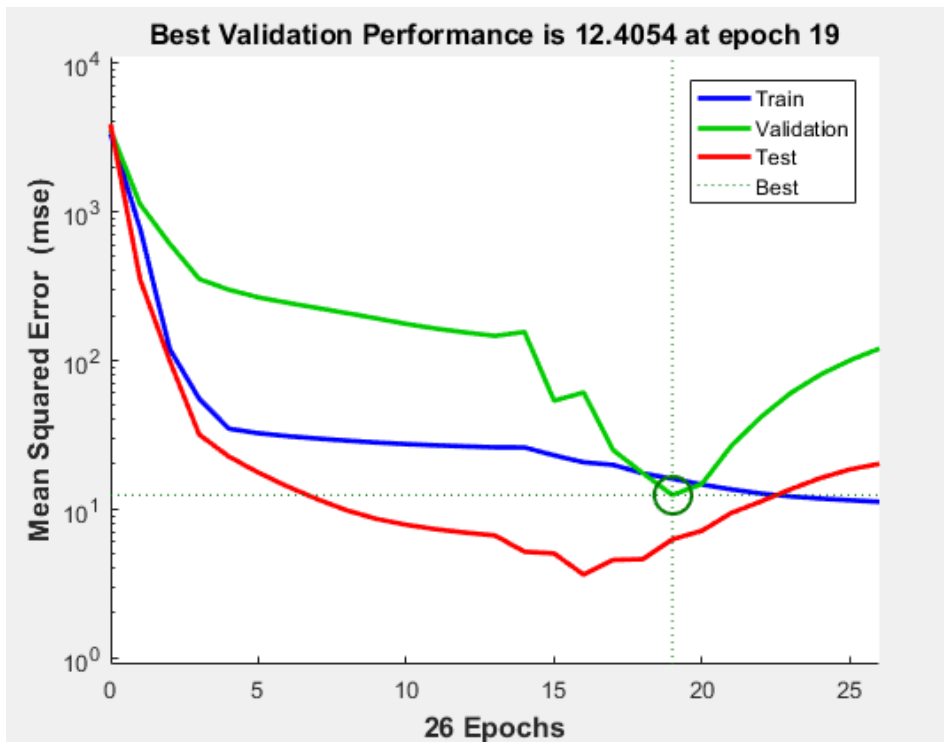


نمودار ۴-۲- نمودار توزیع خطا برای داده‌های ضریب هدایت الکتریکی نانو سیال (محور X تفاوت مقدار خطا بین نتایج آزمایشگاهی و پیش بینی شده، محور Y تعداد داده)

همان طور که در شکل‌های ۴-۳ تا ۴-۵ دیده می‌شود روال آموزش برای داده‌های هدایت الکتریکی در صورتی که خطای مجموعه ارزیابی در ۷ تکرار متوالی افزایش یابد متوقف می‌شود این توقف در تکرار ۱ رخ داده است و نتایج حاصل به دلایل زیر مطلوب می‌باشد:

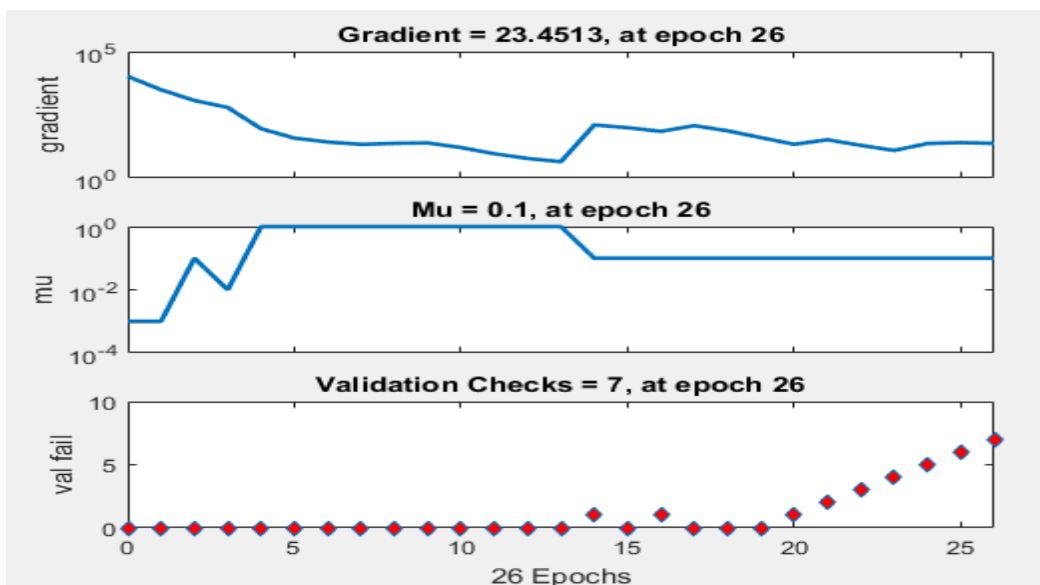
مقدار خطای میانگین مربعات نهایی کوچک است.

خطای مجموعه آموزشی با خطای مجموعه تست دارای رفتار و خصوصیات مشابهی است.



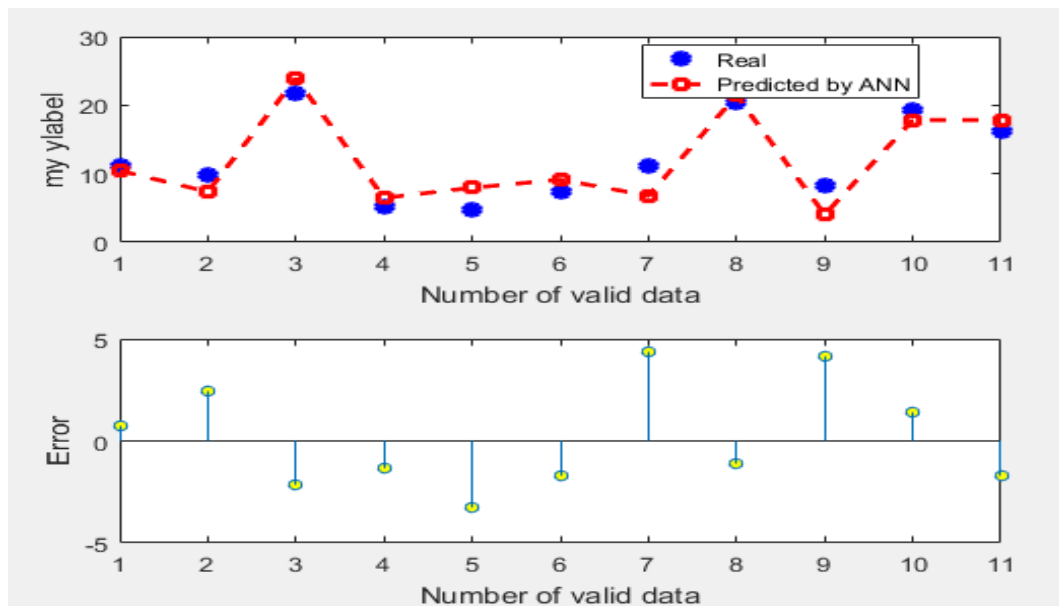
نمودار ۳-۴- نمودار کارایی شبکه برای هدایت الکتریکی (تعداد تکرارها بر حسب مجموع مربعات خطا)

نمودار ۴-۴- نیز نشان می‌دهد که نوسانات و خطای مدل به وجود آمده بسیار کم می‌باشد و شبکه با ۲۶ بار حدس و خطا در حدس ۱۹ به پاسخ بهینه رسیده است و ۷ بار متوالی این درایه‌های ماتریسی برای مدل پیش بینی شده تکرار گردیده است.



نمودار ۴-۴- بررسی میزان خطا و نوسانات شبکه

نمودار ۴-۵ نشان می‌دهد که داده‌های واقعی و داده‌های پیش‌بینی شده به کمک نرم افزار متلب چه میزان اختلاف دارند و همانطور که نمودار گویا می‌باشد رابطه معناداری بین داده‌های آزمایشگاهی و داده‌های پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مصنوعی وجود دارد و خطای شبکه قابل چشم‌پوشی است.



نمودار ۴-۵ - مقایسه بین داده‌های واقعی و داده‌های پیش‌بینی شده به کمک شبکه

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادها

۵-۱- نتیجه گیری

در این تحقیق، بررسی کاملی روی نتایج هدایت الکتریکی انجام شد. حتی باوجود این که توجه زیادی به خواص دیگر نانوسیالات (هدایت حرارتی، ویسکوزیته، حرارت ویژه را ببینید) معطوف شده است، اما تحقیقات روی هدایت الکتریکی می تواند اطلاعات ارزشمندی درباره رفتار این سیالات در کاربردهای مختلف دنیای واقعی فراهم کند. بعضی از نتایجی که می توان از این تحقیق پیشرفته به دست آورد در زیر خلاصه می شود:

۱- هدایت الکتریکی، همراه با پتانسیل زتا، می تواند ابزاری مناسب برای ارزیابی پایداری نانوسیالات باشد. به طور دقیق تر، افزایش هدایت الکتریکی به ثبات بهتر محلول نسبت داده می شود. از طرف دیگر، کاهش در هدایت الکتریکی نشان از حلالیت ضعیف دارد و این ویژگی را می توان در فاصله زمانی مشخصی نیز برای بررسی ثبات بلند مدت یک نانوسیال اندازه گیری کرد.

۲- هدایت الکتریکی به نوع مایع پایه و قطبیت بستگی دارد.

۳. هدایت الکتریکی تحت تأثیر افزودن واکنش دهنده های سطحی است.

۴- با افزایش دما، رسانایی الکتریکی افزایش می یابد. با این حال، تنوع آن با غلظت نانوذرات کاملاً توصیف و درک نشده است، و نتایج آن تا حدودی متناقض است (به عنوان مثال، بیشتر نویسندگان متوجه افزایش هدایت الکتریکی با افزایش غلظت شده اند، اما مطالعاتی وجود دارد که با این فرضیه مغایرت دارد).

۵. مشخص شد که افزایش هدایت الکتریکی به طور عمده توسط سه دلیل تعیین می شود:

رسانایی سطحی نانوذرات، توسعه لایه دوتایی الکتریکی، قطبیت مایع.

۶- هنگامی که نانوذرات به مایع پایه اضافه می شود، مدل ماکسول و همچنین سایر مدل های نظری کلاسیک نمی توانند به خوبی تغییرات هدایت الکتریکی را توصیف کند (به عنوان مثال مقادیر تجربی را کمتر از حد واقعی پیش بینی می کند).

۷. فقط معادلات معدودی برای تخمین هدایت الکتریکی در منابع تحقیقاتی آزاد موجود

است که اکثر آنها روابط خطی دارند.

۸- هیچ یک از مطالعات مروری در مورد کاربردهای ترجیحی نانوسیالات تولیدی بر

اساس عملکرد هدایت الکتریکی بحث نکرده اند.

در این تحقیق هدایت الکتریکی نانوذرات $\text{ZnO-Al}_2\text{O}_3$ با میانگین قطر تقریبی ۲۵ nm مورد بررسی قرار گرفت. رنج غلظت‌های نانو ذرات در محدوده ۰/۲۵ تا ۱ % می‌باشد. نتایج نشان داد که هدایت الکتریکی با افزایش غلظت نانو ذرات روند صعودی دارد، با افزایش دما نیز همین روند مشاهده گردید. داده‌های حاصل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی پیش بینی شد و برای صحت و درستی این پیش بینی از ضریب همبستگی و مربعات خطا استفاده گردید. طبق نتایج بدست آمده، این مقادیر برای داده‌های ولیدیشن و تست برای ضریب ارای مقادیر ۰/۹۹۲ و ۰/۹۹۴ می‌باشد که تاییدی بر موفق بودن پیش‌بینی می‌باشد.

به عنوان یک نتیجه گیری کلی، مشخص شد که حتی اگر تحقیقات در مورد نانوسیالات از چند دهه پیش آغاز شده باشد، اکثر مطالعات هدایت الکتریکی محدود به نانوسیالاتی بر اساس آب، EG و چند مخلوط W-EG هستند. سایر مطالعات سیالات پایه پراکنده هستند و هنوز نتیجه گیری قابل قبول را نمی‌توان گرفت. یکی دیگر از مشاهدات، این بار در مورد نانوسیالات تقویت شده با مایع یونی (NEIL)، این است که هیچ مطالعه‌ای در رابطه با رفتار الکتریکی آنها تا به امروز در تحقیقات آزاد موجود نیست. حتی اگر در ابتدا حدود ۸ سال پیش تولید این NEILها مورد توجه قرار گرفته باشد.

پارامترهای دما و کسر حجمی نانوذرات درون سیال پایه به عنوان داده‌های ورودی و هدایت الکتریکی به عنوان پارامتر هدف انتخاب گردیدند. داده‌های نمودارها از خط $Y=X$ پیروی می‌نمایند که نشان شبکه توانسته است با دقت بالایی مقادیر را پیش بینی نماید. به عبارت دیگر، زمانی که مقادیر پیش بینی شده با مقادیر آزمایشگاهی متناظرشان یکسان باشند باید تابع خط ۴۵ درجه باشند. هر چه قدر پراکندگی مقادیر حول خط $Y=X$ کمتر باشد عملکرد سیستم بهتر می‌باشد. ضریب همبستگی برای داده‌های تست در ضریب هدایت الکتریکی ۰.۹۲۴ و برای داده‌های صحت سنجی 0.992 می‌باشد که نشان می‌دهد شبکه به خوبی قادر به پیش بینی ضریب هدایت الکتریکی بوده است. نوسانات و خطای مدل به وجود آمده بسیار کم می‌باشد و شبکه با ۲۶ بار حدس و خطا در حدس ۱۹ به پاسخ بهینه رسیده است و ۷ بار متوالی این درایه‌های ماتریسی برای مدل پیش بینی شده تکرار گردیده است.

۵-۲- پیشنهادات و مسیرهای آینده برای تحقیق

علیرغم خصوصیات برتر آنها، نانوسیالات هنوز تاکنون برای اکثر کاربردهای صنعتی در حال توسعه اند و توصیف بهتری در خصوص کاربردهای واقعی یا ترجیحی در کاربردهای

زندگی واقعی، ممکن است یک نکته عالی برای سطح آمادگی فن آوری نانوسیالات باشد. به طور خلاصه، چالش‌های مرتبط با مسیرهای آینده برای تحقیق را می‌توان به این شکل شناسایی کرد:

۱. برای بررسی مناسب بودن برای ارزیابی هدایت الکتریکی به عنوان شاخص پایداری نانوسیالات، تحقیقات هماهنگی لازم است.

۲. مطالعه هماهنگ در مورد کلیه خصوصیات الکتریکی، از جمله هدایت الکتریکی. به عنوان یک نتیجه گیری کلی مدرن ترین دستاوردها، ممکن است شاهد افزایش هدایت الکتریکی با غلظت و دمای نانوذرات باشد. در نتیجه، تشدید تحقیقات در مورد هدایت الکتریکی، به ویژه با توجه به عوامل مختلف تأثیرگذار مانند نوع مایع پایه (به عنوان مثال: قطبی یا غیر قطبی بودن)، نوع و اندازه نانوذرات، استفاده از واکنش دهنده‌های سطحی و تاثیر غلظت بسیار مهم است.

۳. نکته چالش برانگیز دیگر ممکن است به دست آوردن برخی از روابطی معتبر برای توصیف رشد کلی هدایت الکتریکی باشد.

۴. توجه بیشتر به مطالعه اهمیت استفاده از نانوسیالات در بهبود طول عمر سیستمهای حرارتی الکتریکی نیز ضروری است.

۵- جنبه دیگری که حتی با وجود اینکه خیلی مهم است کمتر مورد مطالعه قرار می‌گیرد و باید مورد توجه قرار گیرد، جنبه‌های کلی اقتصادی جایگزینی سیالات معمولی با نانوسیالات است. در آینده، راندمان هزینه نانوسیالات باید در جهت مناسبی باشد که به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد.

در نتیجه، با وجود در دسترس بودن بسیاری از کاربردهای بالقوه، تا به امروز تعداد اندکی یا هیچ کاربرد صنعتی برای استفاده نانوسیالات گزارش نشده است. با افزایش تحقیقات، انتظار می‌رود که نانوسیالات می‌توانند به عنوان سیالات انتقال حرارت در بسیاری از کاربردها (مانند خنک کنندگی الکترونیکی، صنعت خودرو و انرژی خورشیدی) تأثیر بسزایی داشته باشند.

فهرست منابع

1. Pordanjani, A.H.; Aghakhani, S.; Afrand, M.; Mahmoudi, B.; Mahian, O.; Wongwises, S. An updated review on application of nanofluids in heat exchangers for saving energy. *Energy Convers. Manag.* 2019, 198, 111886. [CrossRef]
2. Sharafeldin, M.A.; Gróf, G.; Abu-Nada, E.; Mahian, O. Evacuated tube solar collector performance using copper nanofluid: Energy and environmental analysis. *Appl. Therm. Eng.* 2019, 162, 114205. [CrossRef]
3. Mudagi, B.S. The Study of Some Problems of Magneto Hydrodynamic Flow in Presence of Transverse Magnetic Field. Ph.D. Thesis, University of Pune, Maharashtra, India, 2011; pp. 21–38.
4. Nakhla, D.; Thompson, E.; Lacroix, B.; Cotton, J.S. Measurement of heat transfer enhancement in melting of n-Octadecane under gravitational and electro hydrodynamics (EHD) forces. *J. Electrostat.* 2018, 92, 31–37. [CrossRef]
5. Ghoshal, U.; Miner, A.C. Cooling of Electronics by Electrically Conducting Fluids. Patent No. US 6,708,501 B1, 23 March 2004.
6. Semat, H.; Katz, R. Electrical Conduction in Liquids and Solids. In *Physics*; University of Nebraska: Lincoln, NB, USA, 1958; p. 154.
7. Banisi, S.; Finch, J.A.; Laplante, A.R. Electrical conductivity of dispersions: A review. *Miner. Eng.* 1993, 6, 369–385. [CrossRef]
8. Maxwell, J.C. A Treatise of Electricity and Magnetism, 3rd ed.; Oxford University Press: London, UK, 1892; Volume 1, Part II, Chapter IX; pp. 435–449.
9. Bruggeman, D.A.G. Berechnung Verschiedener Physicalischer Konstanten von Heterogenen Substanzen. *Annalen Physik* 1935, 24, 639–664.
10. Fricke, H. A Mathematical Treatment of the Electric Conductivity and Capacity of Dispersed Systems, I. The Electric Conductivity of a Suspension of Homogeneous Spheroids. *Phys. Rev.* 1924, 24, 575–585. [CrossRef]
11. Cruz, R.C.D.; Reinshagen, J.; Oberacker, R.; Segadães, A.M.; Ho_mann, M.J. Electrical conductivity and stability of concentrated aqueous alumina suspensions. *J. Colloid Interface Sci.* 2005, 286, 579–588. [CrossRef]
12. Shirazi, S.F.S.; Gharekhani, S.; Yarmand, H.; Badarudin, A.; Metselaar, H.S.C.; Kazi, S.N. Nitrogen doped activated carbon/graphene with high nitrogen level: Green synthesis and thermo-electrical properties of its nanofluid. *Mater. Lett.* 2015, 152, 192–195. [CrossRef]
13. Mohamed, R.A. Modeling electrical properties of nanofluids using artificial neural network. *Phys. Scripta* 2019, 94, 10522. [CrossRef]
14. Akilu, S.; Baheta, A.T.; Kadirgama, K.; Padmanabhan, E.; Sharma, K.V. Viscosity, electrical and thermal conductivities of ethylene and propylene glycol-

based γ -SiCnanofluids. *J. Mol. Liq.* 2019, 284, 780–792. [CrossRef]
Nanomaterials 2019, 9, 1592 21 of 22

15. Fal, J.; Wanic, M.; Malick, M.; Oleksy, M.; Zyla, G. Experimental Investigation of Electrical Conductivity of Ethylene Glycol Containing Indium Oxide Nanoparticles. *Actaphysica Polonica A* 2019, 135, 1237–1239. [CrossRef]

16. Baby, T.T.; Ramaprabhu, S. Investigation of thermal and electrical conductivity of graphene based nanofluids. *J. Appl. Phys.* 2010, 108, 124308. [CrossRef]

17. Zyla, G.; Vallejo, J.P.; Fal, J.; Lugo, L. Nanodiamonds—Ethylene Glycol nanofluids: Experimental investigation of fundamental physical properties. *Int. J. Heat Mass Trans.* 2018, 121, 1201–1213. [CrossRef]

18. Zyla, G.; Fal, J. Experimental studies on viscosity, thermal and electrical conductivity of aluminum nitride–ethylene glycol (AlN–EG) nanofluids. *Thermoch. Acta* 2016, 637, 11–16. [CrossRef]

19. Zyla, G.; Fal, J. Viscosity, thermal and electrical conductivity of silicon dioxide–ethylene glycol transparent nanofluids: An experimental studies. *Thermoch. Acta* 2017, 650, 106–113. [CrossRef]

20. Fal, J.; Wanic, M.; Budzik, G.; Oleksy, M.; Zyla, G. Electrical Conductivity and Dielectric Properties of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Silicon Oxide–Lignin Hybrid Particles. *Nanomaterials* 2019, 9, 1008. [CrossRef]

21. Zyla, G.; Fal, J.; Bikic, S.; Wanic, M. Ethylene glycol based silicon nitride nanofluids: An experimental study on their thermophysical, electrical and optical properties. *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostruct.* 2018, 104, 82–90. [CrossRef]

22. Zawrah, M.F.; Khattab, R.M.; Girgis, L.G.; El Daidamony, H.; Abdel Aziz Rehab, E. Stability and electrical conductivity of water-base Al₂O₃ nanofluids for different applications. *HBRC J.* 2016, 12, 227–234. [CrossRef]

23. Bagheli, S.; Fadafan, H.K.; LotfiOrimi, R.; Ghaemi, M. Synthesis and experimental investigation of the electrical conductivity of water based magnetite nanofluids. *Power Technol.* 2015, 274, 426–430. [CrossRef]

24. Coelho, M.F.; Rivas, M.A.; Vilão, G.; Nogueira, E.M.; Iglesias, T.P. Permittivity and electrical conductivity of copper oxide nanofluid (12 nm) in water at different temperatures. *J. Chem. Thermodyn.* 2019, 132, 164–173. [CrossRef]

25. Anu, K.; Hemalatha, J. Magnetic and electrical conductivity studies of zinc doped cobalt ferrite nanofluids. *J. Mol. Liq.* 2019, 284, 445–453. [CrossRef]

26. Shoghl, S.N.; Jamali, J.; Moraveji, M.K. Electrical conductivity, viscosity, and density of different nanofluids: An experimental study. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 2016, 74, 339–346. [CrossRef]

27. Heyhat, M.M.; Irannezhad, A. Experimental investigation on the competition between enhancement of electrical and thermal conductivities in water-based nanofluids. *J. Mol. Liq.* 2018, 268, 169–175. [CrossRef]
28. Satriananda, I.N. Satriananda, Investigation on Electrical Conductivity Enhancement of Water Based Maghemite (γ -Fe₂O₃) Nanofluids. *Int. J. Mater. Sci. Appl.* 2017, 6, 32–36.
29. Mashali, F.; Languri, E.; Mirshekari, G.; Davidson, J.; Kerns, D. Nano diamond nanofluid microstructural and thermo-electrical characterization. *Int. Commun. Heat Mass* 2019, 101, 82–88. [CrossRef]
30. Modesto-Lopez, L.B.; Biswas, P. Role of the effective electrical conductivity of nano suspensions in the generation of TiO₂ agglomerates with electrospray. *J. Aerosol Sci.* 2010, 41, 790–804. [CrossRef]
31. Zakaria, I.; Mohamed, W.A.N.W.; Azmi, W.H.; Mamat, A.M.I.; Mamat, R.; Daud, W.R.W. Thermo-electrical performance of PEM fuel cell using Al₂O₃ nanofluids. *Int. J. Heat Mass Trans.* 2018, 119, 460–471. [CrossRef]
32. Hadadian, M.; Goharshadi, E.K.; Youssefi, A.J. Electrical conductivity, thermal conductivity, and rheological properties of graphene oxide-based nanofluids. *Nanopart. Res.* 2014, 16, 2788. [CrossRef]
33. Selimefendigil, F.; Öztop, H.F. Modeling and optimization of MHD mixed convection in a lid-driven trapezoidal cavity filled with alumina–water nanofluid: Effects of electrical conductivity models. *Int. J. Mech. Sci.* 2018, 136, 264–278. [CrossRef]
34. Ganguly, S.; Sikdar, S.; Basu, S. Experimental investigation of the effective electrical conductivity of aluminum oxide nanofluids. *Power Technol.* 2009, 196, 326–330. [CrossRef]
35. Minea, A.A.; Luciu, R.S. Investigations on electrical conductivity of stabilized water based Al₂O₃ nanofluids. *Microfluid Nanofluid* 2012, 13, 977–985. [CrossRef]
36. Minea, A.A. Electrical and rheological behavior of stabilized Al₂O₃ nanofluids. *Curr. Nanosci.* 2013, 9, 81–88.
37. Sundar, L.S.; Shusmitha, K.; Singh, M.K.; Sousa, A.C.M. Electrical conductivity enhancement of nanodiamond–nickel (ND–Ni) nanocomposite based magnetic nanofluids. *Int. Commun. Heat Mass* 2014, 57, 1–7. [CrossRef]
38. Chereches, E.I.; Minea, A.A. Electrical conductivity of new nanoparticle enhanced fluids: An experimental study. *Nanomaterials* 2019, 9, 1228. [CrossRef] [PubMed] *Nanomaterials* 2019, 9, 1592 22 of 22

39. Islam, M.R.; Shabani, B.; Rosengarten, G. Electrical and thermal conductivities of 50/50 water-ethylene glycol based TiO₂ nanofluids to be used as coolants in PEM fuel cells. *Energy Proc.* 2017, 110, 101–108. [CrossRef]
40. Islam, R.; Shabani, B. Prediction of electrical conductivity of TiO₂ water and ethylene glycol-based nanofluids for cooling application in low temperature PEM fuel cells. *Energy Proc.* 2019, 160, 550–557. [CrossRef]
41. Sarojini, K.G.K.; Manoja, S.V.; Singha, P.K.; Pradeepb, T.; Das, S.K. Electrical conductivity of ceramic and metallic nanofluids. *Colloids Surf. A Phys. Eng. Asp.* 2013, 417, 39–46. [CrossRef]
42. Guo, Y.; Zhang, T.; Zhang, D.; Wang, Q. Experimental investigation of thermal and electrical conductivity of silicon oxide nanofluids in ethylene glycol/water mixture. *Int. J. Heat Mass Trans.* 2018, 117, 280–286. [CrossRef]
43. Ijam, I.; Saidur, R.; Ganesan, P.; Golsheikh, A.M. Stability, thermo-physical properties, and electrical conductivity of graphene oxide-deionized water/ethylene glycol based nanofluid. *Int. J. Heat Mass Trans.* 2015, 87, 92–103. [CrossRef]
44. Kole, M.; Dey, T.K. Investigation of thermal conductivity, viscosity, and electrical conductivity of grapheme based nanofluids. *J. Appl. Phys.* 2013, 113, 084307. [CrossRef]
45. Khdher, M.; CheSidik, N.A.; Hamzah, W.A.W.; Mamat, R. An experimental determination of thermal conductivity and electrical conductivity of bio glycol based Al₂O₃ nanofluids and development of new correlation. *Int. Commun. Heat Mass* 2016, 73, 75–83. [CrossRef]
46. Abdolbaqi, M.K.; Azmi, W.H.; Mamat, R.; Sharma, K.V.; Najafi, G. Experimental investigation of thermal conductivity and electrical conductivity of BioGlycol–water mixture based Al₂O₃ nanofluid. *Appl. Therm. Eng.* 2016, 102, 932–941. [CrossRef]
47. Naddaf, P.; Heris, S.Z. Experimental study on thermal conductivity and electrical conductivity of diesel oil-based nanofluids of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes. *Int. Comm. Heat Mass Trans.* 2018, 95, 116–122. [CrossRef]
48. Shen, L.P.; Wang, H.; Dong, M.; Ma, Z.C.; Wang, H.B. Solvothermal synthesis and electrical conductivity model for the zinc oxide-insulated oil nanofluid. *Phys. Lett. A* 2012, 376, 1053. [CrossRef]
49. Hill, A.V. The possible effects of the aggregation of the molecules of hemoglobin on its dissociation curves. *J. Physiol.* 1910, 40, iv–viii.
50. Goutelle, S.; Maurin, M.; Rougier, F.; Barbaut, X.; Bourguignon, L.; Ducher, M.; Maire, P. The Hill equation: A review of its capabilities in pharmacological modelling. *Fundam. Clin. Pharmacol.* 2008, 22, 633–648. [CrossRef]

51. Huang, Z.; Wang, F.; Wang, Q.; Yao, W.; Sun, K.; Zhang, R.; Zhao, J.; Lou, Z.; Li, J. Significantly Enhanced Electrical Performances of Eco-Friendly Dielectric Liquids for Harsh Conditions with Fullerene. *Nanomaterials* 2019, 9, 989. [CrossRef]
52. Konakanchi, H.; Vajjha, R.; Misra, D.; Das, D. Electrical conductivity measurements of nanofluids and development of new correlations. *J. Nanosci. Nanotechnol.* 2011, 8, 6788–6795. [CrossRef]
53. Glover, B.; Whites, K.W.; Hong, H.; Mukherjee, A.; Billups, W.E. Effective electrical conductivity of functional single-wall carbon nanotubes in aqueous fluids. *Synth. Met.* 2008, 158, 506–508. [CrossRef]
54. Dong, M.; Shen, L.P.; Wang, H.; Wang, H.B.; Miao, J. Investigation on the electrical conductivity of transformer oil-Based AlN nanofluid. *J. Nano Mater.* 2013, 7, 842963

Abstract

Research into the electrical conductivity of fluids amplified by nanoparticles is currently in its infancy, and the mechanisms of amplification are not fully understood. The results of the ZnO-Al₂O₃ nanocomposite survey showed that all samples were within the nanoscale. On the measurement of the effective electrical and thermal conductivity of aqueous suspensions of nanoparticles of aluminum oxide and titanium (nanofluids), experiments were performed as a function of both volume and temperature components to test the effects of changes in the electrical and thermal conductivity of nanofluids. The results show a significant increase in electrical conductivity, both in terms of volume and temperature. However, the dependence of effective electrical conductivity on temperature is much lower than that of volume. Finally, neural networks were used to predict electrical properties. For this purpose, a neural network with a multi-layered perceptron structure was used to develop the model of estimating electrical properties. To design the model structure, various neural networks were constructed and implemented by changing the adjustable parameters (including the transfer function, the training rule, the amount of the moment, the number of hidden layers, the number of neurons of the hidden layer). In each case, the structure with the highest correlation coefficient is selected as the final model.

Keywords: Electrical conductivity, ZnO-Al₂O₃ nanofluids, Aluminum oxide, Titanium



Energy Institute of Higher Education

A model for predicting the electrical and thermal conductivity of ZnO-Al₂O₃ Nano fluids using MATLAB software

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Master of Science (Doctor of Philosophy) in Energy Conversion

By:
Hamed Shariati

Supervisor:
Dr. Seyed Iman Vasefi
Dr. Heydar Madah

Feb 2020