

نانو ذرات مغناطیسی Clay/APTS/Fe₃O₄ کاتالیزگری کارآمد با قابلیت جداسازی مغناطیسی جهت سنتز ترکیبات ۲- آمینو-۴H- بنزو [b] پیران

محمد رضا نظری فر^۱، قاسم راه پیمان^{۱*}، بهارک پولادیان^۲

^۱ گروه شیمی آلی، دانشکده شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد لامرد، لامرد، ایران

^۲ گروه شیمی آلی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

چکیده:

با توجه به کاربرد گسترده مشتقات بنزوپیران در صنعت و داروسازی، در این پژوهش سنتز مشتق های ۲- آمینو-۴H- بنزو [b] پیران از واکنش سه جزئی یک مرحله ای بین انواع آلدهیدهای آروماتیک، مالونونیتریل و دیمدون با استفاده از نانو ذرات مغناطیسی Clay/APTS/Fe₃O₄ به عنوان یک کاتالیزگر کارآمد، با قابلیت جداسازی مغناطیسی، در حلال اتانول و آب به نسبت یک به یک با بازده عالی و خلوص بسیار بالا معرفی شد. محصولات با استفاده از طیف های FT-IR و ¹H-NMR مورد بررسی قرار گرفته اند. Clay/APTS/Fe₃O₄ چندین ویژگی قابل توجه مانند سطح گسترده برای گروه های عاملی، دوام، عملکرد بهبود یافته، قابلیت استفاده مجدد در واکنش بدون از دست دادن فعالیت کاتالیزگری و قابلیت بازیافت را از خود نشان می دهد. علاوه بر این، سایر مزایای دیگری که می توان برای این روش نام برد شامل شرایط واکنش ملایم تر، مقرون به صرفه بودن، زمان واکنش کوتاه، جداسازی آسان کاتالیزگر، اجتناب از تولید زباله های سمی و مراحل کار ساده می باشد.

واژگان کلیدی: ۲- آمینو-۴H- بنزو [b] پیران، نانو ذرات مغناطیسی، نانو ذرات خاک رس، کاتالیزگرهای ناهمگن، واکنش های چند جزئی.

g.rahpaima@yahoo.com

که در نهایت بازده بالاتری را در مقایسه با سنتز چند مرحله ای ارائه می دهند [۱-۶].

مشتقات چندحلقه ای پیران دسته ای مهمی از ترکیبات هتروسیکل اکسیژن دار می باشند که در ساختار بسیاری از ترکیبات طبیعی حضور دارند و به عنوان هسته مرکزی در بسیاری از ترکیبات ضد باکتری، ضد سرطان، ضد سل، ضد انعقاد، ضد حساسیت، آنتی بیوتیک و ضد افسردگی عمل می نماید [۷-۱۰]. به علاوه این ترکیبات می توانند جهت درمان بیماری های ناشی از تخریب سیستم عصبی همچون آلزایمر و پارکینسون مورد استفاده قرار

۱- مقدمه

واکنش های چند جزئی در سال های اخیر با فراهم آوردن روشی ساده و کارآمد در سنتز ترکیبات پیچیده در یک مرحله، به عنوان ابزارهای قدرتمند و مفید مورد توجه قرار گرفته اند.

تاثیرگذاری واکنش های چند جزئی به دلیل زمان های کمتر واکنش، مراحل جداسازی ساده و مقرون به صرفه بودن می باشد

بگیرند [۱۱-۱۳]. ترکیبات ۲-آمینو-۴H-پیران، به دلیل کاربردهای وسیع و اهمیتی که در سنتز ترکیبات دارویی دارند تاکنون با روش‌های متعددی به وسیله کاتالیزگرهای مختلف و در شرایط متفاوت سنتز شده‌اند [۲۷-۱۴] و رسیدن به یک راهکار مفید و موثر جهت تهیه این ترکیبات با روش‌های نوین و کارآمد از ارزش و اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد.

نانوذرات به دلیل خواص نوری، الکتریکی، مغناطیسی و کاتالیزگری اهمیت بسیاری دارند. اخیراً نانوذررات مغناطیسی (MNPs) به دلیل خواص ویژه مغناطیسی و کاتالیزگری خود در کانون توجه قرار گرفته‌اند و بسیاری از محققان در تلاش برای تهیه نانوذررات مغناطیسی با عملکرد بالا بوده‌اند [۲۸، ۲۹]. نانوذررات مغناطیسی اکسید آهن در سال‌های اخیر به دلیل کاربردهای خاص خود به طور ویژه مورد توجه قرار گرفته است. این نانوذررات به دلیل سمیت، آب‌گریزی و فعل و انفعالات غیرضروری نمی‌توانند مستقیماً در واکنش‌ها استفاده شوند، از این رو واسطه‌ها (لایه‌ها یا پوسته‌ها) کمک بزرگی برای غلبه بر این محدودیت‌ها کرده‌اند [۳۰-۳۴]. بنابراین، در این تحقیق، نانوذررات مغناطیسی Clay/APTS/Fe₃O₄ با موفقیت به عنوان یک کاتالیزگر موثر سنتز شد. در ادامه پژوهش‌های ما در زمینه سنتز مشتقات تتراهیدروبنزو [b]پیران توسط واکنش‌های چند جزئی [۳۵]، در اینجا ابتدا نانوذررات مغناطیسی Clay/APTS/Fe₃O₄ به عنوان یک کاتالیزگر مؤثر سنتز شده و سپس واکنش سه جزئی آلدئیدهای آروماتیک، مالونونیتریل و دیمدون در حضور نانوذررات مغناطیسی Clay/APTS/Fe₃O₄ مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و دستگاه‌های مورد استفاده

کلیه مواد شیمیایی استفاده شده از شرکت تجاری مرک و سیگما آلدریج تهیه شد و بدون خالص‌سازی مجدد مورد استفاده قرار گرفت. پیشرفت واکنش‌ها با استفاده از کروماتوگرافی لایه نازک (TLC) و UV ۲۵۴ کنترل گردید. برای خشک کردن ترکیبات از آن خلأ مدل Bruker ساخت کشور آلمان استفاده گردید. به

منظور پخش یکنواخت ذرات و همگن‌سازی محلول‌ها در طی مراحل سنتز از دستگاه فراصوت مدل H30S ساخت کشور آلمان استفاده شد. طیف‌های رزونانس مغناطیسی هسته هیدروژن توسط دستگاه طیف سنج Avance Bruker با قدرت دستگاه ۲۵۰ مگاهرتز با استفاده از تترامتیل‌سیلان (TMS) به عنوان استاندارد داخلی در حلال دوتره دی متیل سولفوکسید به دست آمده است. برای اندازه‌گیری نقطه ذوب نمونه‌های سنتز شده از دستگاه تعیین نقطه ذوب سری IA9000 استفاده شد. شناسایی محصولات از طریق مقایسه داده‌های فیزیکی و یا از طریق آنالیز داده‌های طیفی صورت گرفته است. طیف FT-IR با دستگاه Tensor Bruker به دست آمده است.

۲-۲- روش تهیه کاتالیزور

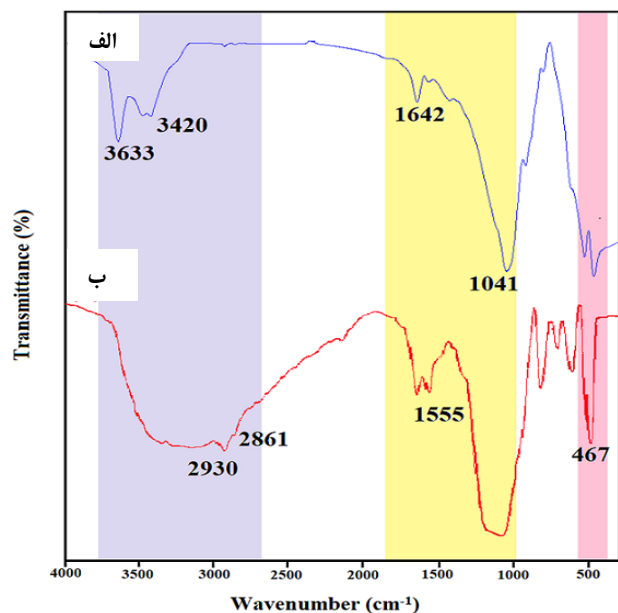
نانو ذرات مغناطیسی Clay/APTS/Fe₃O₄ با استفاده از روش شرح داده شده در پژوهش‌های پیشین سنتز گردید [۳۶]. نانو ذرات خاک رس (Cloisite-Na⁺) قبل از استفاده برای ۲۴ ساعت در دستگاه آون خلا با دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد تحت گاز نیتروژن خشک شد. ابتدا نانوذررات خاک رس (۱ گرم) در ۱۰۰ میلی‌لیتر آب بدون یون قرار گرفته و با دستگاه فراصوت به مدت ۱۵ دقیقه پراکنده شد. سپس (۳-آمینوپروپیل)تری‌اتوکسی سیلان (APTS) (۰/۹۷) میلی‌لیتر و نانوذررات اکسید آهن (Fe₃O₄) (۰/۱۲) گرم به مخلوط اضافه شده و به مدت ۴۵ دقیقه در دمای اتاق به‌طور مکانیکی هم‌زده شدند. سپس نانوذررات مغناطیسی با ساترifiوژ در ۴۰۰۰ دور در دقیقه از محیط واکنش جدا و به مدت یک شبانه روز در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد خشک شد. شمایی از آماده‌سازی شیمیایی Clay/APTS/Fe₃O₄MNPs در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۳- روش تهیه مشتقات ۲-آمینو-۴H-بنزو [b] پیران (4a-4o)

در یک بالن مخلوط ۱ میلی‌مول دیمدون، ۱ میلی‌مول آلدئیدهای آروماتیک و ۰/۰۰۱ گرم Clay/APTS/Fe₃O₄MNPs و ۵ میلی‌لیتر اتانول و آب به نسبت ۱:۱ اضافه شده و سپس بالن در دمای اتاق روی همزن مغناطیسی قرار گرفت. پیشرفت واکنش با

¹ Magnetic Nano Particles

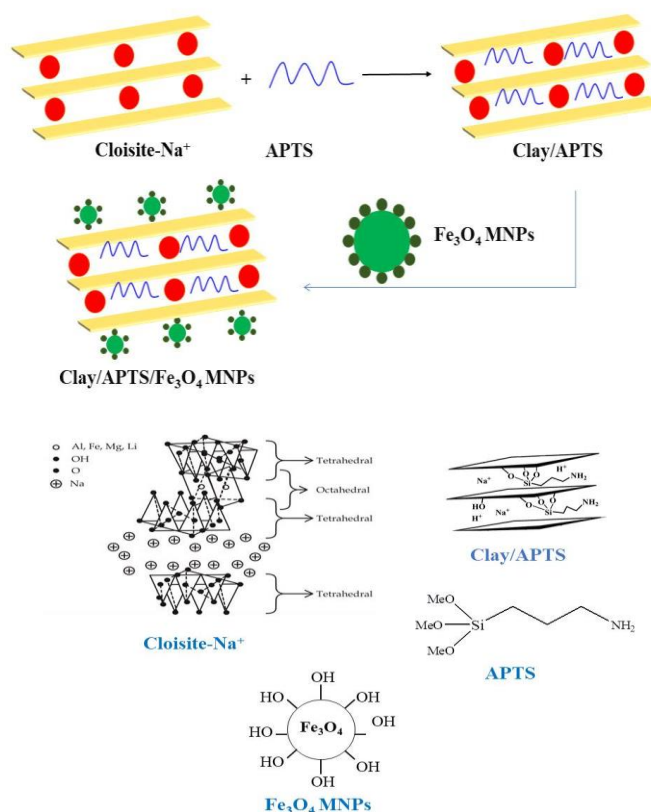
نوار جذبی مربوط به ارتعاش خمشی NH_2 در ناحیه 1555 cm^{-1} ظاهر شده است که تاییدکننده حضور APTS در ساختار نانوذرات خاک رس می‌باشد. همچنین نوار جذبی مربوط به Fe-O در ناحیه 467 cm^{-1} مویید حضور نانوذرات اکسید آهن در ساختار نانوذرات خاک رس می‌باشد.



شکل ۲. طیف FT-IR (الف) نانوذرات خاک رس و (ب) نانوذرات خاک رس پوشش داده شده.

برای مقایسه ساختار بلوری و فاصله صفحات خاک رس پس از پوشش، از روش طیف سنجی پراش اشعه ایکس استفاده شد (شکل ۳). در شکل ۳ الگوی پراش پرتو ایکس نانو ذرات خاک رس، نانوذرات اکسید آهن و نانوذرات خاک رس پوشش داده شده دیده می‌شود و می‌توان تفاوت نانوذره را قبل و بعد از پوشش مشاهده کرد. قله های موجود در 2θ های 30° ، $35^\circ/4$ ، 43° ، $53^\circ/4$ ، $56^\circ/9$ و $62^\circ/5$ به ترتیب مربوط به صفحات اسپینال مکعبی نانوذرات آهن در 220 ، 311 ، 400 ، 422 ، 511 ، 440 می‌باشند. میانگین اندازه در نانو ذرات خاک رس پوشش داده شده با استفاده از معادله شرر، 56 نانومتر محاسبه شد.

شکل ۴ منحنی درصد تخریب نانوذرات خاک رس و نانوذرات خاک رس پوشش داده شده را بر حسب دما نشان می‌دهد. با توجه به این شکل تخریب حرارتی نانوذرات خاک رس پوشش داده شده طی دو مرحله صورت می‌گیرد. مرحله اول مربوط به تخریب حلال باقیمانده و رطوبت‌های جذب سطحی شده می‌باشد. در



شکل ۱. آماده سازی کاتالیزگر Clay/APTS/Fe₃O₄MNPs

استفاده از کروماتوگرافی لایه نازک مورد بررسی قرار گرفت. پس از طی مدت زمان ۱ تا ۲ دقیقه برای مشتق‌های مختلف آلدهید، رسوب حاصله صاف و با n -هگزان شستشو داده شده و کاتالیزگر با استفاده از یک آهنربای قوی جدا گردید.

۳- بحث و نتیجه گیری

۳-۱- مشخصه‌یابی نانوذرات Clay/APTS/Fe₃O₄

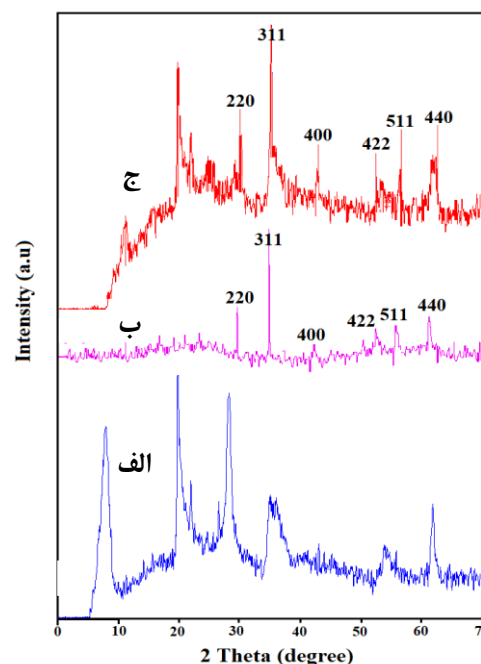
به منظور مشخصه‌یابی نانوذرات Clay/APTS/Fe₃O₄ آنالیز تبدیل فوریه زیرقرمز (FT-IR)، آنالیز الگوی پراش پرتو ایکس (XRD) و آنالیز وزن سنجی حرارتی (TGA) انجام شد.

همان‌طور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در طیف مربوط به نانوذرات خاک رس (الف) نوار جذبی مربوط به O-H کششی و خمشی به ترتیب در ناحیه 3625 cm^{-1} و 1638 cm^{-1} و نوار مربوط به Si-O در ناحیه 1041 cm^{-1} ظاهر شده است. در طیف مربوط به نمونه پوشش داده شده (ب) نوار جذبی در ناحیه 2930 cm^{-1} مربوط به ارتعاش کششی گروه عاملی CH_2 است.

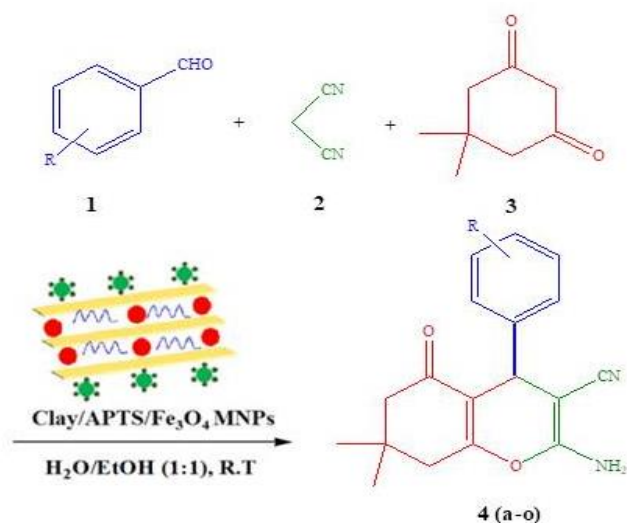
بیانگر میزان پوشش سطح نانوذرات خاک رس به وسیله ۳-آمینو پروپیل تری اتوکسی سیلان و نانوذرات آهن می باشد.

۳-۲- سنتز ترکیبات ۲-آمینو-۴H-بنزو [b] پیران در حضور نانو ذرات Clay/APTS/Fe₃O₄

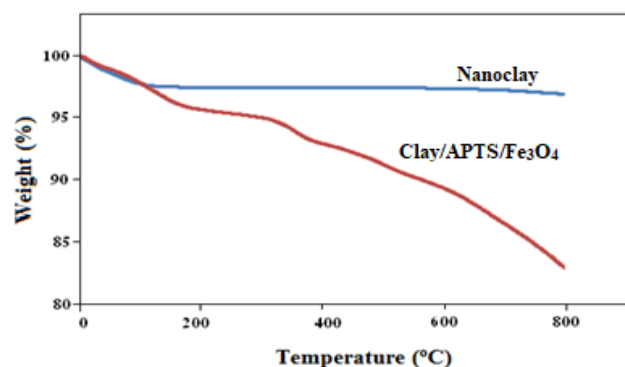
در این قسمت، یک واکنش سه جزئی از آلدهیدهای آروماتیک مختلف (۱)، مالونونیتریل (۲) و دیمدون (۳) با مخلوط اتانول و آب در حضور نانو ذرات Clay/APTS/Fe₃O₄ به عنوان کاتالیزگر برای سنتز مشتقات ۲-آمینو-۴H-بنزو [b] پیران ترتیب داده شد (شکل ۵).



شکل ۳. طیف XRD (الف) نانوذرات خاک رس، (ب) نانوذرات Fe₃O₄ و (ج) نانوذرات خاک رس پوشش داده شده.



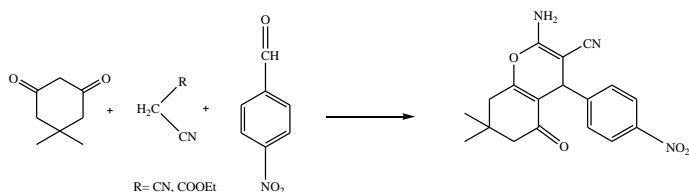
شکل ۵. سنتز مشتقات ۲-آمینو-۴H-بنزو [b] پیران در حضور نانو ذرات Clay/APTS/Fe₃O₄



شکل ۴. طیف TGA نانوذرات خاک رس و نانوذرات خاک رس پوشش داده شده

۳-۲-۱- بهینه سازی شرایط واکنش سنتز ترکیبات تتراهیدروبنزو [b] پیران

به منظور بهینه سازی شرایط واکنش سنتز ترکیبات تتراهیدروبنزو [b] پیران از طریق واکنش دیمدون، آلدهیدهای آروماتیک مختلف و مالونونیتریل از مشتق ۴-نیتروبنزوآلدهید به عنوان مدل استفاده شد (شکل ۶).



شکل ۶ سنتز ترکیب ۲-آمینو-۴(۴-نیتروفنیل)-۵،۶،۷،۸-تتراهیدرو-۷،۷-دی متیل-۵-اکسو-۴H-کرومن-۳-کربونیتریل به عنوان واکنش مدل

این مرحله ۳ درصد افت وزنی در محدوده دمایی ۲۰۰-۸۵ °C مشاهده می شود که به دلیل جذب آب توسط نانوذرات خاک رس می باشد. این مرحله به طور مشابه در منحنی TGA مربوط به نانوذرات خاک رس نیز مشاهده می گردد. در مرحله دوم کاهش وزن زیادی در محدوده دمایی ۸۰۰-۲۰۰ °C دیده می شود که مربوط به تخریب حرارتی لایه آلی ۳-آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان در سطح نانوذرات خاک رس می باشد. درصد وزن باقی مانده در دمای ۸۰۰ °C برای نانوذرات خاک رس پوشش داده شده با ۳-آمینوپروپیل تری اتوکسی سیلان تقریباً برابر با ۸۲ درصد می باشد. در نتیجه میزان درصد افت وزنی برای نانوذرات پوشش داده شده در حدود ۱۵ درصد خواهد بود که این مقدار

حلال‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفت و بهترین حالت استفاده از حلال آب-تانول با نسبت یک به یک مشاهده گردید. نتایج حاصل در جدول شماره ۳ گزارش شده است.

جدول ۳. تاثیر حلال‌های مختلف جهت سنتز ترکیب ۲-آمینو-۴-(۴-نیتروفنیل)-۵-اکسو-۴H-کرومن-۳-کربونیتربیل در حضور ۰/۰۰۱ گرم کاتالیزگر Clay/APTS/Fe₃O₄ در دمای اتاق

ردیف	کاتالیزگر	حلال	زمان (دقیقه)	بازده (درصد)
۱	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	آب	۳	۸۸
۲	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	تانول	۳	۹۱
۳	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	آب-تانول (۱:۲)	۲	۹۴
۴	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	آب-تانول (۲:۱)	۲	۹۶
۵	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	آب-تانول (۱:۱)	۲	۹۸

انواع آلدئیدهای آروماتیک دارای گروه‌های الکترون‌کشنده یا الکترون‌دهنده تحت شرایط واکنش بهینه مورد بررسی قرار گرفتند و گروه‌های عاملی مانند هالیدها، نیترو، متوکسی، سیانو بدون تشکیل هیچ محصول جانبی محصولات مورد نظر را ارائه نمودند. نتایج به دست آمده در این روش در جدول ۴ نشان داده شده است (4a-4o). بررسی انجام شده نشان داد که آلدئیدهای آروماتیک دارای گروه‌های الکترون‌کشنده و آلدئیدهای آروماتیک دارای گروه‌های الکترون‌دهنده محصول مورد نظر را با بازدهی عالی ارائه می‌دهند.

مطابق با مکانیسم پیشنهادی شکل ۷ مالونونیتربیل و آلدئید آروماتیک طی واکنش تراکمی نووناگل حدواسط ۴ را تولید می‌کنند، سپس دیمدون با حدواسط ایجاد شده یک واکنش افزایشی مایکل می‌دهد و نهایتاً در نتیجه‌ی انجام یک واکنش حلقه‌زایی درون مولکولی محصول نهایی ایجاد می‌شود. Clay/APTS/Fe₃O₄ با داشتن گروه‌های APTS و Fe₃O₄ به عنوان بستری عمل می‌کند که با ایجاد یک سطح آبدوست-آبگریز موجب تسهیل واکنش میان مواد اولیه بر روی سطح خاک؛ که پوشیده از هیدروژن‌های اسیدی است می‌شود و سرعت واکنش را افزایش می‌دهد.

محصولات با مقایسه داده‌های تبدیل فوریه زیرقرمز (FT-IR)، طیف‌سنج رزنانس مغناطیس هسته و نقطه ذوب نمونه‌های معتبر شناسایی شدند. شکل ۸ و ۹ طیف‌های IR و ¹HNMR ترکیب

جهت مشخص کردن مقدار بهینه کاتالیزگر؛ میزان کاتالیزگر مورد استفاده جهت سنتز ۲-آمینو-۴-(۴-نیتروفنیل)-۵-اکسو-۴H-کرومن-۳-کربونیتربیل-۶،۷،۸،۵-تتراهیدرو-۷،۷-دی‌متیل-۵-اکسو-۴H-کرومن-۳-کربونیتربیل مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمایش‌ها مشخص نمود که افزایش میزان کاتالیزگر به بیشتر از ۰/۰۰۱ گرم تاثیر چندانی بر سرعت و بهره‌ی واکنش ندارد، همچنین استفاده از Clay/APTS و Fe₃O₄ مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده گردید که در مقادیر همسان با Clay/APTS/Fe₃O₄ این ترکیبات اثر کاتالیزگری بسیار ضعیف‌تری دارند (جدول ۱).

به منظور بهینه‌سازی دما، پیشرفت واکنش در دمای اتاق و دماهای ۵۰، ۷۰ درجه سانتی‌گراد و شرایط رفلاکس بررسی شد و مشاهده گردید مناسب‌ترین حالت، دمای اتاق است و افزایش دما تاثیر معنی‌داری بر سرعت و بازده واکنش ندارد (جدول ۲).

جهت انتخاب حلال مناسب، پیشرفت واکنش مدل در حضور

جدول ۱. اثر مقدار کاتالیزگر جهت سنتز ترکیب ۲-آمینو-۴-(۴-نیتروفنیل)-۵،۶،۷،۸-تتراهیدرو-۷،۷-دی‌متیل-۵-اکسو-۴H-کرومن-۳-کربونیتربیل در حلال آب-تانول (نسبت یک به یک) در دمای اتاق

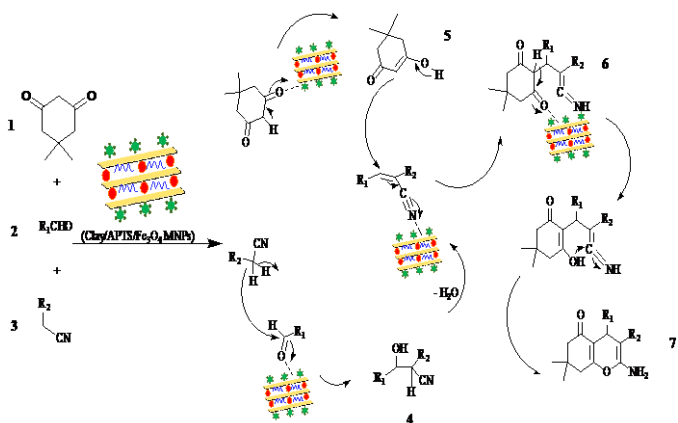
ردیف	کاتالیزگر	مقدار کاتالیزگر (گرم)	زمان (دقیقه)	بازده (درصد)
۱	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	۰/۰۰۰۹	۲	۸۵
۲	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	۰/۰۰۱	۲	۹۸
۳	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	۰/۰۰۲	۲	۹۸
۴	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	۰/۰۰۳	۲	۹۸
۵	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	۰/۰۰۴	۲	۹۵
۶	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	۰/۰۰۵	۲	۹۵
۷	Cloisite Na+	۰/۰۰۱	۲	۳۸
۸	APTS	۰/۰۰۱	۲	ناچیز
۹	Nano Fe ₃ O ₄	۰/۰۰۱	۲	۳۰

جدول ۲. سنتز ترکیب ۲-آمینو-۴-(۴-نیتروفنیل)-۵،۶،۷،۸-تتراهیدرو-۷،۷-دی‌متیل-۵-اکسو-۴H-کرومن-۳-کربونیتربیل در حضور ۰/۰۰۱ گرم کاتالیزگر Clay/APTS/Fe₃O₄ در حلال آب-تانول (نسبت یک به یک) در دماهای مختلف

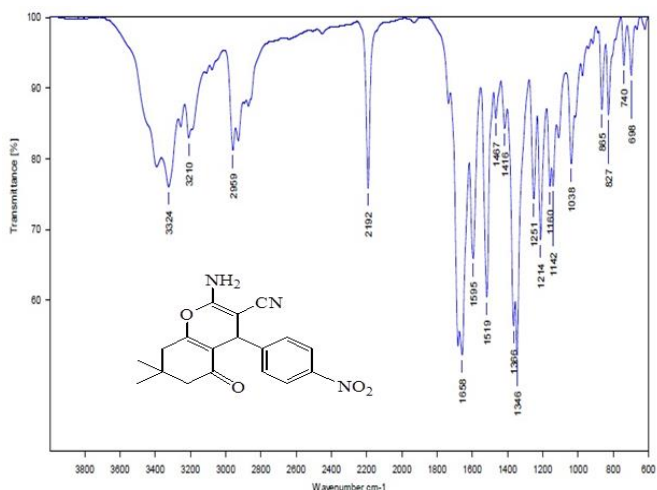
ردیف	کاتالیزگر	دما (درجه سانتی‌گراد)	زمان (دقیقه)	بازده (درصد)
۱	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	دمای اتاق	۲	۹۸
۲	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	۵۰	۲	۹۸
۳	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	۷۰	۲	۹۸
۴	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄	شرایط رفلاکس	۲	۹۵

جدول ۴. سنتز مشتقات ۲-آمینو-۴H-بزو[bl]پیرن در حضور نانو ذرات Clay/APTS/Fe₃O₄

آلدهید	محصول	زمان (دقیقه)	بازده (درصد)	نقطه ذوب اندازه گیری شده نقطه ذوب گزارش شده [۳۵] (درجه سانتی گراد)
C ₆ H ₅ -	4a	۲	۹۷	۲۲۹-۲۲۷
4-BrC ₆ H ₄ -	4b	۱	۹۹	۲۲۸-۲۲۶ ۲۰۰-۲۰۳
4-FC ₆ H ₄ -	4c	۱	۹۹	۲۰۹-۲۱۱ ۲۰۰-۲۰۳
2-ClC ₆ H ₄ -	4d	۱	۹۹	۲۰۹-۲۱۱ ۲۰۸-۲۱۰
3-ClC ₆ H ₄ -	4e	۱	۹۹	۱۸۸-۱۹۱ ۱۸۹-۱۹۱
4-ClC ₆ H ₄ -	4f	۱	۹۹	۲۲۶-۲۲۸ ۲۱۲-۲۱۵
2,4-ClC ₆ H ₃ -	4g	۱	۹۹	۲۱۲-۲۱۵ ۱۸۰-۱۸۲
2-O ₂ NC ₆ H ₄ -	4h	۱	۹۹	۱۸۱-۱۸۳ ۲۲۸-۲۳۰
3-O ₂ NC ₆ H ₄ -	4i	۱	۹۹	۲۲۹-۲۳۱ ۲۰۹-۲۱۲
4-O ₂ NC ₆ H ₄ -	4j	۲	۹۸	۲۰۹-۲۱۲ ۱۷۵-۱۷۷
4-CH ₃ C ₆ H ₄ -	4k	۲	۹۹	۱۷۵-۱۷۷ ۲۱۱-۲۱۳
2-CH ₃ OC ₆ H ₄ -	4l	۲	۹۸	۲۱۲-۲۱۵ ۱۹۳-۱۹۵
3-CH ₃ OC ₆ H ₄ -	4m	۲	۹۶	۱۹۳-۱۹۵ ۱۸۶-۱۸۸
4-CH ₃ OC ₆ H ₄ -	4n	۲	۹۶	۱۸۵-۱۸۷ ۱۹۹-۲۰۲
4-CNC ₆ H ₄ -	4o	۱	۹۹	۱۹۸-۲۰۱ ۲۲۸-۲۲۶
				۲۲۸-۲۲۶



شکل ۷. مکانیسم پیشنهادی برای سنتز مشتقات ۲-آمینو-۴H-بزو[bl]پیرن در حضور نانو ذرات Clay/APTS/Fe₃O₄



شکل ۸. طیف IR ترکیب ۲-آمینو-۴-(۴-نیتروفنیل)-۶،۷،۸،۵-تتراهیدرو-۷،۷-دی متیل-۵-اکسو-۴H-کرومن-۳-کربونیتریل

همان طور که در شکل ۸ دیده می شود، یک نوار جذبی قوی در ناحیه 1366 cm^{-1} دیده می شود که متعلق به ارتعاشات کششی متقارن NO_2 می باشد. نوار جذبی قوی در ناحیه 1519 cm^{-1} متعلق به ارتعاشات کششی نامتقارن NO_2 می باشد و نوار جذبی متوسط در ناحیه 1595 cm^{-1} متعلق به ارتعاشات کششی $\text{C}=\text{C}$ حلقه ی آروماتیک است. نوار جذبی متوسط در ناحیه 1627 cm^{-1} مربوط به ارتعاشات کششی $\text{C}=\text{C}$ می باشد و نوار جذبی قوی در ناحیه 1684 cm^{-1} متعلق به ارتعاشات کششی $\text{C}=\text{O}$ کربونیل است. نوار جذبی متوسط در ناحیه 2192 cm^{-1} نشان دهنده ارتعاشات کششی $\text{C}\equiv\text{N}$ می باشد و دو نوار جذبی متوسط در ناحیه 3324 cm^{-1} و 3393 cm^{-1} متعلق به ارتعاشات کششی NH_2 می باشند.

۲-آمینو-۴-(۴-نیتروفنیل)-۶،۷،۸،۵-تتراهیدرو-۷،۷-دی متیل-۵-اکسو-۴H-کرومن-۳-کربونیتریل را نشان می دهند.

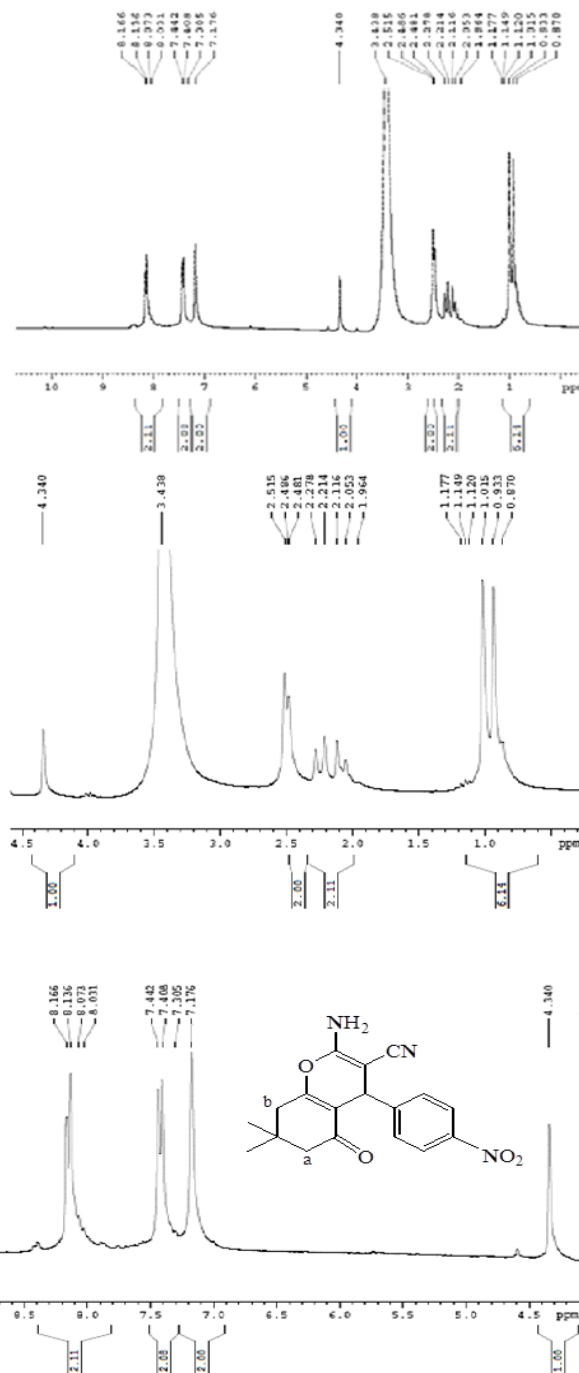
متیلین (a) می‌باشد که انتگرالی معادل با ۱ هیدروژن را داراست و ثابت کوپلاژ آن ۱۶ Hz می‌باشد. دسته‌ی چهارم با داشتن جذب دوتایی در ناحیه‌ی ۲/۲۵ ppm مربوط به هیدروژن متیلین (a) می‌باشد که انتگرالی معادل با ۱ هیدروژن را داراست و ثابت کوپلاژ آن ۱۶ Hz است. دسته‌ی پنجم با داشتن جذب یک‌تایی در ناحیه‌ی ۲/۴۸ ppm مربوط به هیدروژن‌های متیلین (b) می‌باشد که انتگرالی معادل با ۲ هیدروژن را دارد. دسته‌ی ششم با داشتن جذب یک‌تایی در ناحیه‌ی ۴/۳۴ ppm مربوط به هیدروژن بنزیلی می‌باشد که انتگرالی معادل با ۱ هیدروژن را داراست. دسته‌ی هفتم با داشتن جذب یک‌تایی در ناحیه‌ی ۷/۱۸ ppm مربوط به هیدروژن‌های متصل به نیتروژن می‌باشد که انتگرالی معادل با ۲ هیدروژن را دارد و دسته‌ی هشتم با داشتن جذب دوتایی در ناحیه‌ی ۷/۴۲ ppm مربوط به هیدروژن‌های متصل به داراست و ثابت کوپلاژ آن ۸/۵ Hz است. دسته‌ی نهم با داشتن جذب دوتایی در ناحیه‌ی ۸/۱۵ ppm هیدروژن‌های متصل به حلقه‌ی آروماتیک می‌باشد که انتگرالی معادل با ۲ هیدروژن را داراست و ثابت کوپلاژ آن ۸/۵ Hz است. اطلاعات مربوط به بعضی دیگر از محصولات سنتز شده در ادامه آورده شده است.

۲-آمینو-۳-سیانو-۴-فنیل-۷،۷-دی‌متیل-۵-اکسو-۴-تتراهیدروبنزو[*b*]پیران (4a):

IR (KBr, cm^{-1}): 1603, 1661, 1680, 2199, 3324, 3395. $^1\text{H NMR}$ (250 MHz, DMSO- d_6), δ (ppm): 0.92 (s, 3H, CH₃), 1.01 (s, 3H, CH₃), 2.07 (d, $J=16$ Hz, 1H, H-a), 2.24 (d, $J=16$ Hz, 1H, H'-a), 2.49 (s, 2H, CH₂), 4.14 (s, 1H, CH), 7.01 (s, 2H, NH₂), 7.09-7.29 (m, 5H, Ar).

۲-آمینو-۳-سیانو-۴-(۴-کلروفنیل)-۷،۷-دی‌متیل-۵-اکسو-۴-تتراهیدروبنزو[*b*]پیران (4f):

IR (KBr, cm^{-1}): 1605, 1655, 1684, 2193, 3323, 3395. $^1\text{H NMR}$ (250 MHz, DMSO- d_6), δ (ppm): 0.92 (s, 3H, CH₃), 1.00 (s, 3H, CH₃), 2.07 (d, $J=16$ Hz, 1H, H-a), 2.23 (d, $J=16$ Hz, 1H, H'-a), 2.48 (s, 2H, CH₂), 4.17 (s, 1H, CH), 7.05 (s, 2H, NH₂), 7.15 (d, $J=8.25$ Hz, 2H, Ar), 7.33 (d, $J=8.25$ Hz, 2H, Ar).



شکل ۹. طیف $^1\text{HNMR}$ ترکیب ۲-آمینو-۴-(۴-نیتروفنیل)-۵،۶،۷،۸-تتراهیدرو-۷،۷-دی‌متیل-۵-اکسو-۴-تتراهیدروبنزو[*b*]پیران (4f) - کربونیتریل

در شکل ۹ پیک‌های دسته اول با داشتن جذب یک‌تایی در ناحیه‌ی ۰/۹۳ ppm مربوط به هیدروژن‌های متیل می‌باشد که انتگرالی معادل با ۳ هیدروژن را دارد. دسته‌ی دوم با داشتن جذب یک‌تایی در ناحیه‌ی ۱/۰۱ ppm مربوط به هیدروژن‌های متیل می‌باشد که انتگرالی معادل با ۳ هیدروژن را دارد، دسته‌ی سوم با داشتن جذب دوتایی در ناحیه‌ی ۲/۰۸ ppm مربوط به هیدروژن

۲- آمینو-۳-سیانو-۴-(۴-متوکسی فنیل)-۷،۷-دی متیل-۵-اکسو-۷،۸،۸H-۴-تتراهیدروبنزو [b] پیران (4n):

IR (KBr, cm^{-1}): 1606, 1657, 1682, 2192, 3319, 3376. ^1H NMR (250 MHz, DMSO- d_6), δ (ppm): 0.92 (s, 3H, CH₃), 1.00 (s, 3H, CH₃), 2.04 (d, $J=16$ Hz, 1H, H-a), 2.23 (d, $J=16$ Hz, 1H, H'-a), 2.48 (s, 2H, CH₂), 3.68 (s, 3H, OCH₃), 4.07 (s, 1H, CH), 6.82 (d, $J=8.25$ Hz, 2H, Ar), 6.94 (s, 2H, NH₂), 7.03 (d, $J=8.25$ Hz, 2H, Ar).

از آن جا که Clay/APTS/Fe₃O₄ یک کاتالیزگر ناهمگن است، بنابراین می توان آن را پس از تشکیل محصول به راحتی از محیط واکنش جدا نمود و مجدداً برای انجام واکنش های دیگر مورد استفاده قرار داد. از این رو در این کار برای بازیابی کاتالیزگر، پس از تشکیل و خشک شدن محصول، کاتالیزگر با استفاده از آهنربای نئودیمیوم بسیار قوی جدا شد و پس از شستشو با استون مجدد مورد استفاده قرار گرفت. جدول ۵ بازده های متفاوت محصول واکنش کاتالیز شده با کاتالیزگر بازیافتی تا ۵ مرتبه را نشان می دهد. علت کاهش بازده بعد از ۵ مرتبه ممکن است مربوط به تغییر ساختار کاتالیزگر و جدا شدن Fe₃O₄ در آزمایش های متوالی باشد. به علت ناچیز بودن مقادیر کاتالیست (۰/۰۱ گرم)، جهت بالا بردن دقت بازیابی کاتالیزگر از مقادیر ۱۰ میلی مول مواد اولیه و ۰/۰۱ گرم کاتالیزگر استفاده شده است.

جدول ۵. بازیابی و استفاده ی مجدد از کاتالیزگر

ردیف	تعداد دفعات بازیافت	بازده (درصد)
۱	مرتبه ی اول	۹۸
۲	۱	۹۸
۳	۲	۹۷
۴	۳	۹۶
۵	۴	۹۶
۶	۵	۹۳

به منظور ارزیابی کارایی این روش، نتایج به دست آمده با روش های گزارش شده در پژوهش های پیشین در جدول ۶ مقایسه شد. همانطور که در جدول شماره ۶ دیده می شود، استفاده از کاتالیزور Clay/APTS/Fe₃O₄ جهت سنتز مشتقات ۲- آمینو-۴H- بنزو [b] پیران، از نظر زمان واکنش، بازده محصولات و مقدار مصرفی کاتالیزگر، در مقایسه با سایر روش ها برتری خوبی نشان می دهد.

جدول ۶ مقایسه نتایج سنتز مشتقات ۲- آمینو-۴H- بنزو [b] پیران در حضور کاتالیزگرهای مختلف

ردیف	کاتالیزگر / شرایط	زمان (دقیقه)	بازده (درصد)
۱	ASMNPs (10 mg)/ grinding, r.t.[14]	۲-۶	۷۶-۹۶
۲	nano-SnO ₂ (30 mg)/ H ₂ O/Refluxed[15]	۸-۲۰	۸۹-۹۷
۳	LDH@PTRMS@NDBD@CuI (50 mg)/ 40 °C[16]	۵-۱۵	۹۰-۹۶
۴	CuFe ₂ O ₄ @starch (30 mg)/ EtOH, r.t.[17]	۲۰-۵۰	۸۷-۹۶
۵	nano-kaoline/BF ₃ /Fe ₃ O ₄ (100mg)/ 70°C[18]	۴۵-۶۵	۷۲-۹۲
۶	Clay/APTS/Fe ₃ O ₄ (1mg)/ H ₂ O/EtOH, r.t.	۱-۲	۹۶-۹۹

۴- نتیجه گیری

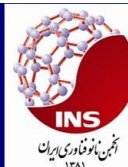
در این مطالعه، نانو ذرات مغناطیسی Clay/APTS/Fe₃O₄ که در پژوهش های پیشین [۳۶] جهت مغناطیسی کردن پلیمر و افزودن قابلیت جدید به آن مورد استفاده قرار گرفته بود، به عنوان یک کاتالیزگر کارآمد مورد استفاده قرار گرفت. این نانو ذرات مغناطیسی دارای چندین مزیت سودمند از جمله روش آماده سازی آسان، دوام و فعالیت کاتالیزگری خوب و امکان جداسازی عالی هستند. در این کار، یک روش بسیار کارآمد برای تهیه ۲- آمینو-۴H- بنزو [b] پیران از طریق واکنش تراکم آلدئیدهای مختلف، مالونونیتریل و دیمدون در حضور نانو ذرات مغناطیسی Clay/APTS/Fe₃O₄ به عنوان یک کاتالیزگر کارآمد در حلال اتانول و آب مورد بحث قرار گرفت. از مزایای روش حاضر می توان به خاصیت جداسازی مغناطیسی کاتالیزگر، روش کار آسان، بازده بالا و مدت زمان بسیار کوتاه واکنش ها اشاره کرد.

مراجع

1. I.A. Azath, P.K. Puthiaraj. ACS Sustainable Chem. Eng. 1, 174–179 (2013)
2. A. Domling. Chem. Rev. 106, 17–89 (2006)
3. D. Tejedor, F. Garcia-Tellado. Chem. Soc. Rev. 36, 484–491 (2007)
4. P. Singh, P. Yadav, A. Mishra, S.K. Awasthi. ACS Omega 5, 4223–4232 (2020)
5. H.G.O. Alvim, E.N. da Silva Ju'nior, B.A.D. Neto. RSC Adv. 4, 54282–54299 (2014)

17. M. Kamalzare, M. Bayat, A. Maleki. *R. Soc. Open Sci.* 7, 200385 (2020)
18. R. Mohammadipour, A. Bamoniri, B.F. Mirjalili. *Scientia Iranica C.* 27, 1216–1225 (2020)
19. J. Albadi, A. Mansournezhad. *Res. Chem. Intermed* 42, 5739–5752 (2016)
20. Z. Zhou, Y. Zhang, X. Hu. *Polycycl. Aromat. Compd.* 37, 39–45 (2017)
21. K. Ahmed, M.A. Ali, O.A. Moustafa M.T. El-Wassimy. *J. Heterocyclic Chem.* 54 1442–1449 (2017)
22. S. Asghari, M. Mohammadnia. *Nano-Met., Chem.* 47, 1004–1011 (2017)
23. H. Kiyani. *Current Org. Synth.* 15, 1043–1072 (2018)
24. A. Magyar, Z. Hell. *Synth* 7, 316–322 (2018)
25. H. Naeimi, M.F. Zarabi. *Appl. Organometal. Chem.* 32, e4225 (2018)
26. C. Thanaraj, G.R. Priya Dharsini, N. Ananthan, R. Velladurai. *Inorg. Nano-Met. Chem.* 49, 313–321 (2019)
27. P. Mohammadi, H. Sheibani. *Mat. Chem. Phys.* 228, 140–146 (2019)
28. T. Osaka, T. Matsunaga, T. Nakanishi, A. Arakaki, D. Niwa, H. Iida. *Anal. Bioanal. Chem.* 384, 593–600 (2006)
29. A.K. Boal. *Synthesis and application of magnetic nanoparticles*, In: Rotello V (ed) *Nanoparticles-Building blocks for nanotechnology*, New York, Plenum Publishers 1–27 (2004)
30. A. Ito, M. Shinkai, H. Honda, T. Kobayashic. *J. Biosci. Bioeng.* 100, 1–11 (2005)
6. J. Zhu. Wiley-VCH, Weinheim, Germany (2005)
7. M. Khoobi, L. Ma'mani, F. Rezazadeh, Z. Zareie, A. Foroumadi, A. Ramazani, A. Shafiee. *J. Mol. Catal. A Chem.* 359, 74–80 (2012)
8. M. Kidwai, S. Saxena, M.K. Rahman Khan, S.S. Thukral. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 15, 4295–4298 (2005)
9. J. Cieplik, M. Raginia, J. Pluta, O. Gubrynowicz, I. Bryndal, T. Lis. *Acta Pol. Pharm. Drug Res.* 65, 427–434 (2008)
10. V.L. Ranganatha, F. Zameer, S. Meghashri, N.D. Rekha, V. Girish, H.D. Gurupadaswamy, S. Khanum. *Pharm. Chem* 346, 901–911 (2013)
11. E. Chandralekha, A. Thangamani, R. Valliappan. *Res. Chem. Intermed* 41, 1951–1966 (2015)
12. W. Kemnitzer, J. Drewe, S. Jiang, H. Zhang, Y. Wang, J. Zhao, S. Jia, J. Herich, D. Labreque, R. Storer, K. Meerovitch, D. Bouffard, R. Rej, R. Denis, C. Blais, S. Lamothe, G. Attardo, H. Gourdeau, B. Tseng, S. Kasibhatla, S.X. Cai. *J. Med. Chem.* 47, 6299–6310 (2004)
13. H. Gourdeau, L. Leblond, B. Hamelin, C. Desputeau, K. Dong, I. Kianicka, D. Custeau, C. Bourdeau, L. Geerts, S.X. Cai, J. Drewe, D. Labrecque, S. Kasibhatla, B. Tseng. *Mol. Cancer Ther.* 3, 1375–1384 (2004)
14. P. Singh, P. Yadav, A. Mishra, S.K. Awasthi. *ACS Omega.* 5, 4223–4232 (2020)
15. B. Baghernejad, M. Fiuzat. *J. Med. Nanomater. Chem.* 3, 235–242 (2023)
16. S. Momeni, R. Ghorbani-Vaghei. *RSC Adv.* 14, 21608–21622 (2024)

31. S.H. Hu, C.H. Tsai, C.F. Liao, D.M. Liu S.Y. Chen. *Langmuir* 24, 11811–11818 (2008)
32. A.S. Lubbe, C. Bergemann, J. Brock, D.G. McClure. *J. Magn. Magn. Mater.* 194, 149–155 (1999)
33. A.L. Chen, Y. Sun, Y.P. Huang, X.X. Yang, X.P. Zhou. *Nanoscale. Res. Lett.* 4, 400–408 (2009)
34. Y.M. Huh, Y.W. Jun, H.T. Song, S. Kim, J.S. Choi, J.H. Lee, S. Yoon, K.S. Kim, J.S. Suh J. Cheon. *J. Am. Chem. Soc.* 127, 12387–12391 (2005)
35. M.E. Sedaghat, F. Farhadi, M.R. Nazarifar, R. Sheikhi Kamareji. *Iran. J. Catal.* 8, pp. 281–288 (2018)
36. B. Pooladian, M.M. Alavi Nikje. *J. Plast. Film. Sheeting* 34, 196–218 (2018)



Clay/APTS/Fe₃O₄ magnetic nanoparticles, as efficient catalysis with magnetic separation capability for the rapid synthesis of 2-amino-4*h*-benzo[*b*]pyrans

Mohammad Reza Nazarifar¹, Ghasem Rahpaima^{1,*}, Baharak pooladian²

¹Department of Chemistry, Islamic Azad University, Lamerd Branch, Lamerd, Iran

²Department of Chemistry, Faculty of Science, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran

Abstract: Considering the wide application of benzopyran derivatives in industry and pharmaceuticals, in this study, the synthesis of 2-amino-4*h*-benzo[*b*]pyran derivatives from a one-step three-component reaction between various aromatic aldehydes, malononitrile and dimedone using magnetic nanoparticles Clay/APTS/Fe₃O₄ was introduced as an efficient catalyst, with magnetic separation capability, in ethanol and water solvent in a one-to-one ratio with excellent yield and very high purity. The products have been investigated using FT-IR and ¹HNMR spectra. Clay/APTS/Fe₃O₄ exhibits several remarkable features such as extensive surface area for functional groups, durability, improved performance, reusability in the reaction without loss of catalytic activity and recyclability. In addition, other advantages that can be mentioned for this method include milder reaction conditions, cost-effectiveness, short reaction time, easy catalyst separation, avoidance of toxic waste generation, and simple work-up steps.

Keywords: 2-amino-4*h*-benzo[*b*]pyrans, Magnetite nanoparticles, Nanoclay, Heterogeneous catalyst, multicomponent reaction

بررسی تجربی حذف ترکیبات گوگردی از سیستم میعانات گازی گوگردی سنتزی چهارتایی با استفاده از روش گوگردزدایی اکسایشی در حضور امواج فراصوت

آمنه تقی زاده^۱، مریم آسمانی^{۱*}، فریدون اسماعیل زاده^۲، ابوالحسن عامری^۱

^۱گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی مهندسی ۲، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

^۲گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه شیراز، ایران

چکیده: از مخازن گازی علاوه بر گاز طبیعی محصول نفتی دیگری به نام میعانات گازی تولید می شود. وجود هر یک از آلاینده ها مانند ترکیبات گوگردی موجود در آن باعث ایجاد مشکلاتی در صنایع پایین دستی و یا آسیب به محیط زیست می شود. در این پژوهش گوگردزدایی یک سیستم میعانات گازی چهارتایی سنتزی شامل نرمال هپتان با ترکیبات مختلف گوگردی، ترت بوتیل مرکاپتان (آلیفاتیک از نوع تیول)، دی پروپیل سولفید (آلیفاتیک از نوع سولفید) و بنزو تیوفن (آروماتیک از نوع تیوفن) در محدوده ۳۰۰-۳۰۰۰ ppm با استفاده از فرآیند موجهی فراصوت (UAOD) انجام شد. برای این منظور، متغیرهای عملیاتی مختلف از جمله هیدروژن پراکسید (۷۰-۱۰۰ v/v) به عنوان اکسید کننده، فرمیک اسید (۷۰-۵ v/v) به عنوان بهبود دهنده، فسفوتنگستیک اسید (۳۰-۱ w/w) به عنوان کاتالیزگر، ایزوبوتانول (۳۰-۱ v/v) به عنوان انتقال دهنده فازی و موجهی فراصوت (۵-۴۰ دقیقه) بر اساس بازده گوگردزدایی مورد بررسی قرار گرفت. طراحی آزمایشات با روش سطح پاسخ (RSM) مدل طرح مرکب مرکزی (CCD) طراحی شده است. استخراج ترکیبات گوگردی اکسید شد با حلال ان-ان دی متیل فرمامید انجام شد. سولفور باقی مانده با استاندارد ASTM D7039 آنالیز شد. بیشترین بازده حذف گوگرد در نقطه بهینه با مقادیر مرکاپتان (۱۱۰۵/۹۹ ppm)، سولفید (۲۲۵۲/۵۰ ppm)، تیوفن (۲۹۶۵/۴۸ ppm)، هیدروژن پراکسید (۲۳/۵۷ % v/v)، فرمیک اسید (۴۹/۲۷ % v/v)، فسفوتنگستیک اسید (۲۱/۱۵ % w/w)، ایزوبوتانول (۲۴/۵۶ % v/v) و زمان موجهی فراصوت (۲۱/۱۷ min)، ۹۹/۹۲ % بدست آمد. علاوه بر این، یک مدل تجربی برای پیش بینی کارایی گوگردزدایی با خطای کمتر از ۰/۱ درصد پیشنهاد شد.

واژگان کلیدی: موجهی فراصوت، میعانات گازی، طراحی آزمایش.

masemani@gmail.com

صنعتی و مصارف دیگر هستند و بر این اساس حذف ترکیبات گوگردی از میعانات گازی امری اجتناب ناپذیر است، لذا، ابداع و استفاده از روشی نوین برای گوگردزدایی مستقیم از میعانات گازی ضرورت دارد. با توجه به اهمیت سولفورزدایی و بهبود روش های موجود صنعتی، مطالعات در این زمینه همچنان ادامه دارد و

۱- مقدمه

معمولا از چاه های گازی علاوه بر گاز، میعانات گازی نیز استحصال می شود که در اغلب موارد گاز و میعانات گازی تولید شده دارای ترکیبات گوگردی چند برابر حد مجاز برای فعالیت های

روش‌های مختلفی نیز برای حذف سولفور بیان شده است که عبارتند از: هیدرودسولفوریزاسیون^۱، هیدرودسولفوریزاسیون عمیق^۲، سولفورزدایی زیستی^۳، سولفورزدایی اکسایشی^۴ و سولفورزدایی اکسایشی در حضور امواج فراصوت^۵. سولفورزدایی که امروزه در صنعت انجام می‌شود، هیدرودسولفوریزاسیون است که این فرآیند نیازمند دمای بالا (بیشتر از ۴۰۰ درجه سانتیگراد)، فشار هیدروژن بالا (بیشتر از ۱۰۰۰ اتمسفر)، استفاده از کاتالیزگرهای فلزی، راکتورهای بزرگ، با زمان واکنش طولانی می‌باشد [۱]. هزینه‌های عملیاتی روش هیدرودسولفوریزاسیون زیاد است و قادر به حذف ترکیبات آروماتیک گوگردی نیز نمی‌باشد [۲]. روش هیدرودسولفوریزاسیون عمیق همانند روش هیدرودسولفوریزاسیون می‌باشد که با انجام اصلاحاتی مانند استفاده زیادتر از مقدار کاتالیزگر فعال، زمان بیشتر انجام فرآیند و کار در دما و فشار بالاتر بر روی این روش می‌تواند علاوه بر ترکیبات آلیفاتیک مقادیر محدودی از ترکیبات آروماتیک گوگردی را حذف کند، از معایب هیدرودسولفوریزاسیون عمیق انجام عملیات تحت دما و فشار بالا، نیازمند احداث واحد تولید هیدروژن به دلیل مصرف زیاد هیدروژن، کاهش بازده روش با افزایش ترکیبات قوی آروماتیک گوگردی، کاهش عمر کاتالیزگر، هزینه زیاد عملیات می‌باشد [۳]. سولفورزدایی زیستی در دما و فشار پایین و در حضور میکروارگانیسم‌هایی صورت می‌گیرد که توانایی تخریب ترکیبات گوگردی را دارند. گوگردزدایی در نفت خام به طور مستقیم با انتخاب گونه‌های میکروبی مناسب امکان پذیر می‌شود و به دو روش گوگردزدایی زیستی هوازی و گوگردزدایی زیستی بی‌هوازی قابل انجام است [۴]. عدم تجاری سازی فناوری، واکنش‌های ناپایدار، زیاد بودن مدت زمان عملیات از معایب آن می‌باشد [۵]. روش سولفورزدایی اکسایشی، شامل واکنش شیمیایی بین یک ماده اکسید کننده و گوگرد است که عدم نیاز به فشار و دمای بالا، توانایی اکسید کردن ترکیبات گوگردی از مزایای آن می‌باشد [۶]. همچنین کاهش کمی و کیفی سوخت توسط اکسید کننده‌ها، هدر رفتن ترکیبات با ارزش سوخت با انتخاب نامناسب حلال از معایب آن می‌باشد [۷].

¹ Hydrodesulfurization (HDS)

² Deep hydrodesulfurization (Deep HDS)

³ Biodesulfurization

⁴ Oxidative desulfurization (ODS)

⁵ Ultrasound Assisted Oxidative Desulfurization (UAOD)

سولفورزدایی اکسایشی در حضور موج‌دهی فراصوت (UAOD) روشی جدیدی است که باعث شده است واکنش اکسیداسیون سریع‌تر، ایمن‌تر و اقتصادی‌تر انجام شود. فرآیند UAOD تحت شرایط عملیاتی متعادلی مانند دمای محیط و فشار اتمسفری انجام می‌شود و منجر به حذف انتخاب‌پذیر ترکیبات گوگردی از هیدروکربن‌های سوخت می‌شود [۸]. توانایی حذف ترکیبات گوگردی و همچنین ترکیبات آروماتیک گوگردی در شرایط فشار و دمای پایین، تبدیل سولفور به سولفون، زمان واکنش اندک، بدون مخاطرات شیمیایی و محصولات جانبی مخاطره‌آمیز و توانایی بازیابی کاتالیزگر از مزایای این روش می‌باشد. بنابراین به هیدروژن و کاتالیزگر گران قیمت، به همراه راکتور بزرگ نیاز نیست. کلیات انجام روش UAOD بدین گونه است که ابتدا مخلوط اکسید کننده که از ترکیب چند ماده شامل اسید و اکسید کننده تهیه شده است را به مایع هیدروکربنی اضافه کرده و تحت دمای خاصی با میزان انرژی مشخص در مدت زمان معین موج‌دهی فراصوت انجام می‌شود. پس از سردسازی و جداسازی خودبه‌خودی فازی آلی و آبی، حلال به مخلوط اضافه می‌گردد و ترکیبات گوگردی اکسید شده توسط حلال جدا شده و وارد فاز آبی می‌شود [۹]. در این روش دو پارامتر اساسی مؤثر بر بازدهی گوگردزدایی وجود دارد که عبارتند از: انتخاب ترکیب اکسید کننده مناسب و انتخاب حلال مناسب می‌باشد. روش UAOD برای حذف ترکیبات گوگردی به عنوان روشی مناسب و کارآمد مطرح گردیده است [۱۰]. تقی‌زاده و همکارانش سه نمونه میعانات گازی سنتزی با ترکیبات گوگردی به ترتیب ترت بوتیل مرکاپتان (نماینده آلیفاتیک از نوع تیول)، دی پروپیل سولفید (نماینده آلیفاتیک از نوع سولفید) و بنزو تیوفن (نماینده آروماتیک‌ها) تهیه کردند و با استفاده از روش گوگردزدایی اکسایشی به کمک موج‌دهی فراصوت (UAOD) موفق به حذف ۹۹/۹۳٪ حذف مرکاپتان، ۹۹/۶۳٪ حذف سولفید و ۹۹/۸۶٪ حذف تیوفن شدند. همچنین پارامترهای مختلفی جهت کاهش ترکیبات گوگردی در فرآیند UAOD مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که پراکسید هیدروژن، فرمیک اسید، فسفو تنگستیک اسید و ایزوبوتانول به ترتیب موثرترین اکسیدکننده، بهبود دهنده، کاتالیزور و عامل‌های انتقال فاز هستند [۱۱]. پژوهش حاضر در ادامه این کار تعریف شده که هدف حذف ترکیبات گوگردی مختلف از یک

مخلوط چهارجزی میعانات گازی سنتزی با استفاده از فرآیند UAOD می باشد. تا کنون کاری جهت حذف گوگرد از میعانات گازی با ترکیبات گوگردی مختلف بصورت چهار جزیی با استفاده از روش UAOD صورت نگرفته است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد شیمیایی مورد استفاده

در آزمایش‌ها مواد شیمیایی مورد استفاده شامل هیدروژن پراکسید (با خلوص ۳۰٪ حجمی) فرمیک اسید (با خلوص ۹۹٪ حجمی)، فسفوتنگستیک اسید (خالص)، ایزوبوتانول (با خلوص ۹۹٪ حجمی)، ترت بوتیل مرکاپتان (با خلوص ۹۸٪ حجمی)، نرمال هپتان (با خلوص ۹۹٪ حجمی)، دی پروپیل سولفید (با خلوص ۹۸٪ حجمی)، بنزو تیوفن (با خلوص ۹۸٪ حجمی) و ان-ان-دی متیل فرمامید (با خلوص ۹۹/۸٪ حجمی) می‌باشند که همه مواد شیمیایی از شرکت مرک آلمان می‌باشند.

۲-۲- دستگاه‌های مورد استفاده

دستگاه‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل: حمام موجهی فراصوت مدل VCLEAN 1-L6 ساخت کشور ایران با تولید فرکانس ۴۰ کیلوهرتز و توان ۱۵۰ وات با تنظیم دما به کمک سیکل چرخشی آب به حجم ۶ لیتر، هیتر همزن مغناطیسی مدل MSH basic ساخت کشور آلمان با توان همزن مغناطیسی و گرمایش به صورت دما ثابت با شار حرارتی ثابت در گستره کاری شار حرارتی تا ۴۰۰ وات و محدوده سرعت همزدن تا ۲۰۰۰ دور بر دقیقه، ترازوی دقیق آزمایشگاهی مدل سارتوریوس ساخت کشور آلمان با دقت ۰/۱ میلی‌گرم، دستگاه آنالیز سولفور کل Sindie 7039 G3 مدل Xos ساخت کشور آمریکا با فرکانس ۶۳-۴۷ هرتز، قدرت ۲۰۰ تا ۲۴۰ جریان متناوب ولتاژ و جریان ۶ آمپر، نمونه گیر با دقت ppm ۰/۱ و سایر وسایل شیشه‌ای از جنس پریکس می‌باشند [۱۱].

۲-۳- طراحی آزمایش

جدول ۱ نوع و مقادیر متغیرها جهت انجام آزمایش‌ها را نشان

می‌دهد. با توجه به اهمیت پارامترها، فاکتورهایی که در جدول ۱ نشان داده شده‌اند متغیرهای مستقل می‌باشند. مقادیر مرکاپتان (X₁)، سولفید (X₂)، تیوفن (X₃)، اکسید کننده (هیدروژن پراکسید (X₄))، بهبود دهنده (فرمیک اسید (X₅))، کاتالیزگر فسفوتنگستیک اسید (X₆)، عامل انتقال دهنده فازی ایزو بوتانول (X₇) و زمان موجهی فراصوت (X₈) به عنوان فاکتورهای متغیر در نظر گرفته شده‌اند. در این پژوهش از نرم افزار Design Expert نسخه ۱۳ استفاده شد. طراحی آزمایشات با انتخاب مدل سطح پاسخ روش طرح مرکب مرکزی و نوع ۱/۲ کسر (نقاط مکعبی نصف می‌شوند) با آلفای ۲ انجام شد. شامل ۸ متغیر و ۵ سطح با کدهای (-۲)، (-۱)، (۰)، (+۱) و (+۲) می‌باشد. تعداد آزمایشات در این مرحله ۱۵۴ آزمایش شد که شامل ۱۴۴ نقطه مکعبی (نقطه عاملی)، ۱۶ نقطه محوری و ۱۰ نقطه مرکزی می‌باشد.

۲-۴- روش انجام اکسیداسیون ترکیبات گوگردی

با توجه به انواع ترکیبات گوگردی موجود در مایعات گازی که به دو دسته آلیفاتیک‌ها همانند تیول‌ها (مرکاپتان‌ها)، سولفید و دی‌سولفیدها و آروماتیک‌ها همانند تیوفن، بنزو تیوفن و دی‌بنزو تیوفن تقسیم می‌شوند، در این پژوهش از هر گروه، یک نماینده ترکیب گوگردار انتخاب و سپس حذف مخلوط آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت و بر این اساس یک نمونه سنتزی چهار جزیی ساخته شده است. نمونه سنتزی میعانات گازی چهار جزیی، شامل نرمال هپتان+ محدوده ۰ الی ۳۰۰۰ ppm ترت بوتیل مرکاپتان+ محدوده ۰ الی ۳۰۰۰ ppm دی پروپیل سولفید+ محدوده ۰ الی ۳۰۰۰ ppm بنزو تیوفن می‌باشد.

با توجه به طراحی آزمایش ارائه شده در جدول ۱ ابتدا نمونه سنتزی شامل نرمال هپتان و مقادیر متغیری از ترت بوتیل مرکاپتان، دی پروپیل سولفید و بنزو تیوفن ساخته شده و به ظرف سونو راکتور منتقل شده است و به آن مقادیر متغیری از مخلوط اکسید کننده شامل هیدروژن پراکسید، فرمیک اسید، فسفوتنگستیک اسید و ایزوبوتانول مطابق با طراحی آزمایش اضافه شد (جدول ۲ مقادیر ترکیبات ۱۵۴ آزمایش انجام شده را

¹ Response Surface Methodolog (RSM)

² Central Composite Design (CCD)

جدول ۱. طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ، طرح مرکب مرکزی با هشت متغیر در پنج سطح به منظور بررسی حذف مخلوط گوگردی از نمونه میعانات گازی

سطح و مقادیر آن ها					بازده تغییرات	متغیرها
-۲	-۱	۰	+۱	+۲		
۰	۷۵۰	۱۵۰۰	۲۲۵۰	۳۰۰۰	۰-۳۰۰۰ ppm	مقدار گوگرد (از نوع ترت بوتیل مرکاپتان(X ₁))
۰	۷۵۰	۱۵۵۰	۲۲۵۰	۳۰۰۰	۰-۳۰۰۰ ppm	مقدار گوگرد (از نوع دی پروپیل سولفید(X ₂))
۰	۷۵۰	۱۵۵۰	۲۲۵۰	۳۰۰۰	۰-۳۰۰۰ ppm	مقدار گوگرد (از نوع بنزو تیوفن(X ₃))
۱۰	۲۵	۴۰	۵۵	۷۰	۱۰-۷۰٪v/v	مقدار اکسید کننده (هیدروژن پراکسید(X ₄))
۵	۲۱/۲۵	۳۷/۵	۵۳/۷۵	۷۰	۵-۷۰٪v/v	مقدار بهبود دهنده (فرمیک اسید(X ₅))
۱	۸/۲۵	۱۵/۵	۲۲/۷۵	۳۰	۱-۳۰٪w/w	مقدار کاتالیزگر (فسفونگستیک اسید(X ₆))
۱	۸/۲۵	۱۵/۵	۲۲/۷۵	۳۰	۱-۳۰٪v/v	مقدار انتقال دهنده فازی (ایزو بوتانول(X ₇))
۵	۱۳/۷۵	۲۲/۵	۳۱/۲۵	۴۰	۵-۴۰ min	مدت زمان(X ₈)

جدول ۲. نتایج حاصل از طراحی آزمایش برای حذف مخلوط گوگردی با روش اکسیداسیون فراصوت از نمونه میعانات گازی، به کمک روش پاسخ سطح طرح مرکب مرکزی

شماره	X1(ppm)	X2(ppm)	X3(ppm)	X4(%v/v)	X5(%v/v)	X6(%w/w)	X7(%v/v)	X8(دقیقه)	SER(GC4)%
۱	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۶/۹۳
۲	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۸۸
۳	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۸۶
۴	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۹۳
۵	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۸۱
۶	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۹۸
۷	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۸۹
۸	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۰۹
۹	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۱۶
۱۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۶/۵۶
۱۱	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۶/۳۳
۱۲	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۷۵
۱۳	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۶/۴۹
۱۴	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۸۱
۱۵	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۶۹
۱۶	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۲۹
۱۷	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۰۳
۱۸	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۳۸
۱۹	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۱۱
۲۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۲۱
۲۱	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۲۲
۲۲	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۳۷
۲۳	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۱۲
۲۴	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۸/۱۰
۲۵	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۶/۷۹
۲۶	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۸۲
۲۷	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۵۱

ادامه جدول ۲

۲۸	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۷۱
۲۹	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۵۹
۳۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۸۶
۳۱	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۴۷
۳۲	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۰۳
۳۳	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۹۸
۳۴	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۶۲
۳۵	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۱۱
۳۶	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۳۱
۳۷	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۶/۹۳
۳۸	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۴۸
۳۹	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۷۵
۴۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۸/۰۴
۴۱	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۰۲
۴۲	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۴۹
۴۳	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۲۳
۴۴	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۴۵
۴۵	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۳۹
۴۶	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۴۹
۴۷	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۳۶
۴۸	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۹۹
۴۹	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۹۴
۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۳۱
۵۱	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۱۲
۵۲	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۸/۲۶
۵۳	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۲۶
۵۴	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۸/۲۲
۵۵	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۸/۱۴
۵۶	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۹۷
۵۷	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۷/۸۱
۵۸	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۳۱
۵۹	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۶/۹۷
۶۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۳۹
۶۱	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۱۸
۶۲	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۵۳
۶۳	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۳۱	۹۸/۱۹
۶۴	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۸/۲۵	۱۳	۹۷/۷۱
۶۵	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۸/۱۳
۶۶	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۳۷
۶۷	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۷/۹۸
۶۸	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۹/۲۱
۶۹	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۱۹
۷۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۹/۳۰
۷۱	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۹/۰۶

ادامه جدول ۲

۷۲	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۷۳
۷۳	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۷/۲۴
۷۴	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۷/۷۳
۷۵	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۷/۵۱
۷۶	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۸۱
۷۷	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۸/۶۶
۷۸	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۷/۹۳
۷۹	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۷/۷۵
۸۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۸/۱۲
۸۱	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۵۱
۸۲	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۸/۵۷
۸۳	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۸/۲۵
۸۴	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۹۲
۸۵	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۸/۴۹
۸۶	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۹۸
۸۷	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۸۵
۸۸	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۹/۴۸
۸۹	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۷/۹۷
۹۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۷/۸۹
۹۱	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۷/۶۹
۹۲	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۸/۷۰
۹۳	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۷/۷۶
۹۴	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۸/۹۵
۹۵	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۸/۶۱
۹۶	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۸/۲۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۲۹
۹۷	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۴۴
۹۸	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۹/۰۱
۹۹	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۸/۷۴
۱۰۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۹/۶۹
۱۰۱	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۸/۸۹
۱۰۲	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۹/۷۱
۱۰۳	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۹/۶۲
۱۰۴	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۹/۶۷
۱۰۵	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۷/۹۶
۱۰۶	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۳۷
۱۰۷	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۷/۹۳
۱۰۸	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۹/۳۶
۱۰۹	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۲۶
۱۱۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۹/۴۹
۱۱۱	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۹/۳۱
۱۱۲	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۲۱/۲۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۹۹
۱۱۳	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۹/۱۹
۱۱۴	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۹۲
۱۱۵	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۶۹

ادامه جدول ۲

۱۱۶	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۹/۸۷
۱۱۷	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۸۱
۱۱۸	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۹/۹۱
۱۱۹	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۹/۸۳
۱۲۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۹/۷۳
۱۲۱	۷۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۸/۵۲
۱۲۲	۲۲۵۰	۷۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۸/۶۲
۱۲۳	۷۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۸/۱۳
۱۲۴	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۷۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۹/۵۶
۱۲۵	۷۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۸/۲۶
۱۲۶	۲۲۵۰	۷۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۹/۶۰
۱۲۷	۷۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۱۳	۹۹/۴۳
۱۲۸	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۲۲۵۰	۵۵	۵۳/۷۵	۲۲/۷۵	۲۲/۷۵	۳۱	۹۹/۵۶
۱۲۹	.	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۶۹
۱۳۰	۳۰۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۴۱
۱۳۱	۱۵۰۰	.	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۷۳
۱۳۲	۱۵۰۰	۳۰۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۸/۸۹
۱۳۳	۱۵۰۰	۱۵۰۰	.	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۶۹
۱۳۴	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۳۰۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۲۱
۱۳۵	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۸/۲۱
۱۳۶	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۷۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۷/۵۸
۱۳۷	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۷/۹۸
۱۳۸	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۷۰	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۷۱
۱۳۹	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱	۱۵/۵	۲۲	۹۸/۱۱
۱۴۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۳۰	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۴۸
۱۴۱	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱	۲۲	۹۷/۹۶
۱۴۲	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۳۰	۲۲	۹۹/۴۳
۱۴۳	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۵	۹۸/۱۲
۱۴۴	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۴۰	۹۹/۳۳
۱۴۵	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۳۱
۱۴۶	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۳۱
۱۴۷	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۳۱
۱۴۸	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۳۱
۱۴۹	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۳۱
۱۵۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۳۱
۱۵۱	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۳۱
۱۵۲	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۳۱
۱۵۳	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۳۱
۱۵۴	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۴۰	۳۷/۵	۱۵/۵	۱۵/۵	۲۲	۹۹/۳۱

نشان می‌دهد). سپس ظرف سونو راکتور به مدت ۵-۴۰ دقیقه در معرض موج‌دهی فراصوت قرار داده شد(حمام فراصوت را در

نشان می‌دهد). سپس ظرف سونو راکتور به مدت ۵-۴۰ دقیقه در معرض موج‌دهی فراصوت قرار داده شد(حمام فراصوت را در

حذف سولفور پس از انجام آزمایشات و مقادیر هر نمونه را در جدول ۲ آورده شده است. در جدول ۳ مقدار ضریب همبستگی (R^2) برابر با ۰/۸۹۲۴ برای رگرسیون مدل ارائه شده است. ضریب همبستگی تنظیم شده برابر با ۰/۸۴۹ و ضریب همبستگی پیش‌بینی شده ۰/۷۳۴۷ می‌باشد که اختلاف کم ضریب رگرسیون تنظیم شده با ضریب رگرسیون پیش‌بینی است. با توجه به جدول آنالیز واریانس (ANOVA) که در جدول ۳ قابل مشاهده است، متغیرهایی که P-value آنها کمتر از ۰/۰۵۰۰ باشد، تأثیرات این ترم‌ها بر متغیر پاسخ بیشتر می‌شود و غیر قابل چشم‌پوشی هستند. بنابراین متغیرهای $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8, X_6^2, X_7^2, X_8^2$ دارای تأثیرات بیشتری نسبت به دیگر متغیرها می‌باشند که ضرایب این متغیرها در جدول ۳ ارائه شده است. برای نمونه‌ی سنتزی مایعات گازی، معادله درجه دوم به صورت معادله ۲ برحسب کد ارائه می‌شود. با توجه به شکل ۲ مشاهده شد که با افزایش مقدار گوگرد، در نمونه‌های نرمال هپتان بازده حذف گوگرد بیشتر می‌شود.

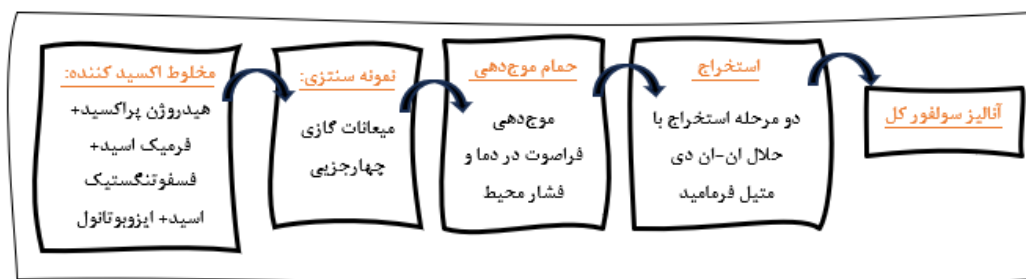
دمای 35 ± 2 درجه سانتی گراد و توان ۱۵۰ وات و فرکانس ۴۰ کیلوهرتز ثابت نگه داشته شد). استخراج فاز آلی طی دو مرحله با استفاده از حلال ان-ان دی متیل فرمامید (در مجموع مقدار حلال مصرفی به نسبت ۱:۱ با نمونه فاز آلی) انجام شد و در نهایت بر روی نمونه فاز آلی آنالیز سولفور کل با استاندارد ASTM D7039 انجام شد و درصد بازده حذف گوگرد (SRE%) با استفاده از معادله ۱ محاسبه گردید.

$$\%SER = (C_i - C_f) / (C_i) \times 100 \quad (1)$$

در معادله ۱، SRE% درصد بازده حذف گوگرد، C_i مقدار سولفور اولیه (ppm) و C_f مقدار سولفور نهایی (ppm) می‌باشد. نمای کلی مرحله به مرحله انجام آزمایشات از نمونه سنتزی میعانات گازی چهار جزئی در شکل ۱ نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

در این مطالعه، جهت بهینه کردن پارامترهای سولفورزدایی به روش اکسیداسیون فراصوت، ارتباط بین پاسخ‌ها و متغیرها بصورت معادله درجه دوم، بیان می‌شود. نتایج



شکل ۱. نمای کلی مراحل انجام آزمایشات

جدول ۳. نتایج حاصل از آنالیز جدول واریانس (ANOVA)

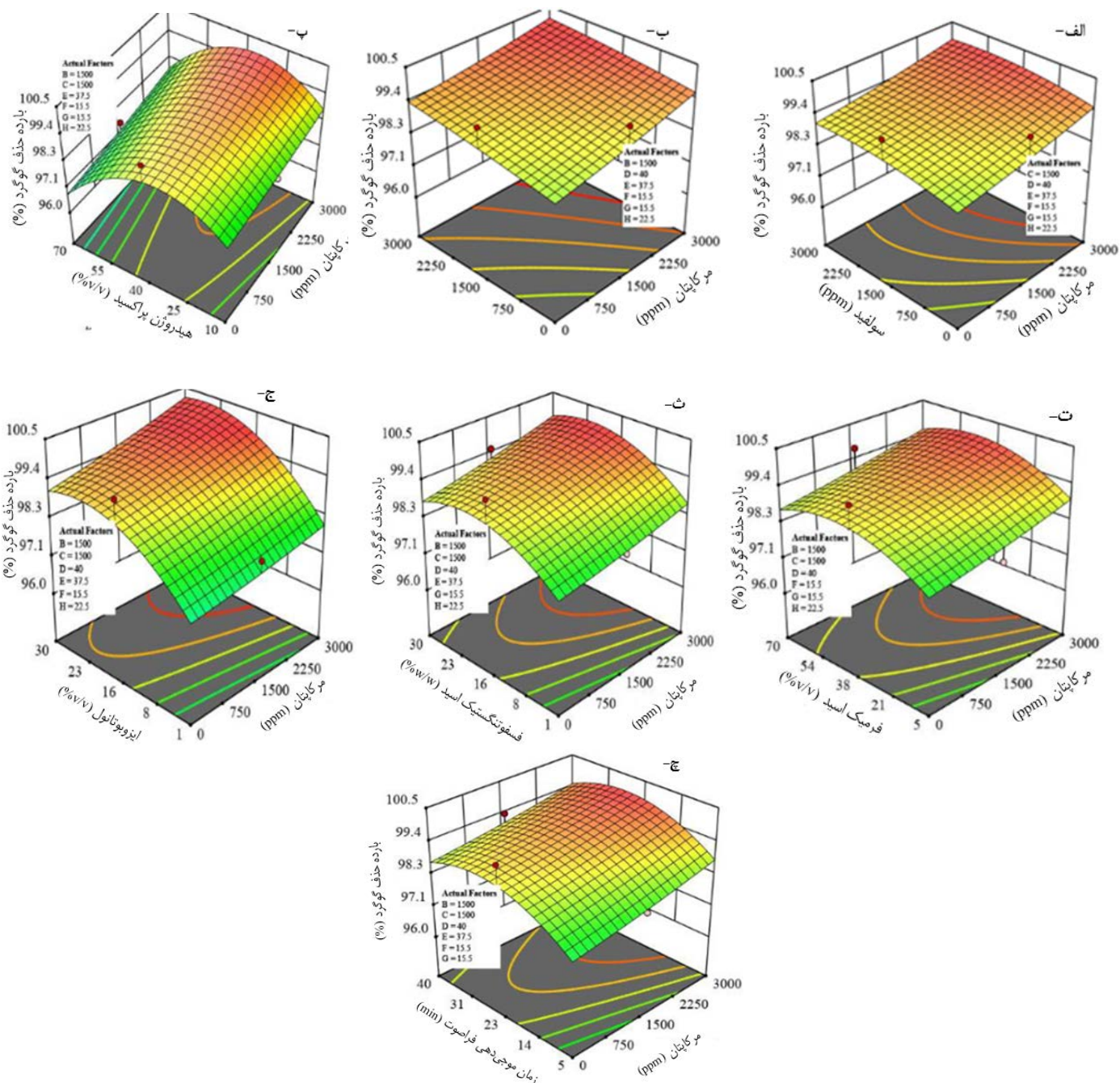
Source	Sum of Square	Df	آنالیز واریانس			P-Value	ضریب معادله درجه دوم بر حسب کد
			Mean Square	F-Value			
Model	۹۹/۸۱	۴۴	۲/۱۵	۲۰/۵۵	< ۰/۰۰۰۱	+۹۹/۳۹	
X_1	۶/۵۶	۱	۶/۵۶	۶۲/۵۹	< ۰/۰۰۰۱	+۰/۲۱۹۷	
X_2	۱/۴۶	۱	۱/۴۶	۱۳/۹۴	۰/۰۰۰۳	+۰/۱۰۳۷	
X_3	۳/۵۷	۱	۳/۵۷	۳۴/۰۵	< ۰/۰۰۰۱	+۰/۱۶۲۱	
X_4	۸/۹۷	۱	۸/۹۷	۶۵/۴۹	< ۰/۰۰۰۱	-۰/۲۵۶۸	
X_5	۳/۳۹	۱	۳/۳۹	۳۲/۳۵	< ۰/۰۰۰۱	+۰/۱۵۷۹	
X_6	۸/۷۳	۱	۸/۷۳	۸۳/۲۵	< ۰/۰۰۰۱	+۰/۲۵۳۴	

ادامه جدول ۳

X ₇	۳۲/۰۵	۱	۳۲/۰۵	۳۰۵/۵۷	< ۰/۰۰۰۱	+۰/۴۸۵۴
X ₈	۵/۳۰	۱	۵/۳۰	۵۰/۵۰	< ۰/۰۰۰۱	+۰/۱۹۷۴
X ₁ X ₂	۰/۰۰۵۸	۱	۰/۰۰۵۸	۰/۰۵۵۱	۰/۸۱۴۹	-۰/۰۰۶۸
X ₁ X ₃	۰/۰۳۶۵	۱	۰/۰۳۶۵	۰/۳۴۷۵	۰/۵۵۶۷	-۰/۰۱۶۹
X ₁ X ₄	۰/۰۱۸۵	۱	۰/۰۱۸۵	۰/۱۷۶۷	۰/۶۷۵۱	+۰/۰۱۲۰
X ₁ X ₅	۰/۰۰۰۲	۱	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۱۵	۰/۹۶۹۶	+۰/۰۰۱۱
X ₁ X ₆	۰/۰۳۲۵	۱	۰/۰۳۲۵	۰/۳۱۰۰	۰/۵۷۸۸	+۰/۰۱۵۹
X ₁ X ₇	۰/۱۴۵۸	۱	۰/۱۴۵۸	۱/۳۰	۰/۲۴۱۰	+۰/۰۳۳۷
X ₁ X ₈	۰/۰۱۲۴	۱	۰/۰۱۲۴	۰/۱۱۸۳	۰/۷۳۱۶	-۰/۰۰۹۸
X ₂ X ₃	۰/۰۴۲۸	۱	۰/۰۴۲۸	۰/۴۰۷۹	۰/۵۲۴۴	+۰/۰۱۸۳
X ₂ X ₄	۰/۰۱۰۵	۱	۰/۰۱۰۵	۰/۱۰۰۲	۰/۷۷۲۲	-۰/۰۰۹۱
X ₂ X ₅	۰/۰۲۳۱	۱	۰/۰۲۳۱	۰/۲۲۰۴	۰/۶۳۹۷	-۰/۰۱۳۴
X ₂ X ₆	۰/۰۵۲۰	۱	۰/۰۵۲۰	۰/۴۹۵۸	۰/۴۸۲۸	+۰/۰۲۰۲
X ₂ X ₇	۰/۰۷۵۱	۱	۰/۰۷۵۱	۰/۷۱۵۸	۰/۳۹۹۴	+۰/۰۲۴۲
X ₂ X ₈	۰/۰۰۱۵	۱	۰/۰۰۱۵	۰/۰۱۴۴	۰/۹۰۴۶	-۰/۰۰۳۴
X ₃ X ₄	۰/۰۰۲۰	۱	۰/۰۰۲۰	۰/۰۱۸۶	۰/۸۹۱۷	+۰/۰۰۳۹
X ₃ X ₅	۰/۰۱۴۰	۱	۰/۰۱۴۰	۰/۱۳۳۸	۰/۷۱۵۳	-۰/۰۱۰۵
X ₃ X ₆	۰/۰۲۴۲	۱	۰/۰۲۴۲	۰/۲۳۰۷	۰/۶۳۱۹	+۰/۰۱۳۷
X ₃ X ₇	۰/۱۵۶۸	۱	۰/۱۵۶۸	۱/۵۰	۰/۲۲۴۱	+۰/۰۳۵۰
X ₃ X ₈	۰/۰۰۶۳	۱	۰/۰۰۶۳	۰/۰۰۶۳	۰/۸۰۶۴	+۰/۰۰۷۰
X ₄ X ₅	۰/۳۷۸۴	۱	۰/۳۷۸۴	۳/۶۱	۰/۰۶۰۱	+۰/۰۵۴۴
X ₄ X ₆	۰/۰۷۳۲	۱	۰/۰۷۳۲	۰/۶۹۷۵	۰/۴۰۵۵	+۰/۰۲۳۹
X ₄ X ₇	۰/۱۱۸۸	۱	۰/۱۱۸۸	۱/۱۳	۰/۲۸۹۵	-۰/۰۳۰۵
X ₄ X ₈	۰/۰۰۰۳	۱	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۳	۰/۹۵۶۶	+۰/۰۰۱۶
X ₅ X ₆	۰/۰۰۰۷	۱	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۶۷	۰/۹۳۴۹	-۰/۰۰۲۳
X ₅ X ₇	۰/۰۱۲۴	۱	۰/۰۱۲۴	۰/۱۱۸۳	۰/۷۳۱۶	-۰/۰۰۹۸
X ₅ X ₈	۰/۰۳۶۵	۱	۰/۰۳۶۵	۰/۳۴۷۵	۰/۵۵۶۸	-۰/۰۱۶۹
X ₆ X ₇	۱/۸۰	۱	۱/۸۰	۱۷/۱۲	< ۰/۰۰۰۱	+۰/۱۱۸۴
X ₆ X ₈	۰/۰۴۷۳	۱	۰/۰۴۷۳	۰/۴۵۰۸	۰/۵۰۳۴	-۰/۰۱۹۲
X ₇ X ₈	۱/۰۶	۱	۱/۰۶	۱۰/۱۳	۰/۰۰۱۹	-۰/۰۰۹۱
X ₁ ²	۰/۰۰۵۷	۱	۰/۰۰۵۷	۰/۰۵۴۰	۰/۸۱۶۸	+۰/۰۱۲۷
X ₂ ²	۰/۰۷۷۹	۱	۰/۰۷۷۹	۰/۷۴۳۱	۰/۳۹۰۶	-۰/۰۴۷۳
X ₃ ²	۰/۰۰۵۲	۱	۰/۰۰۵۲	۰/۰۵۰۰	۰/۸۲۳۵	-۰/۰۱۲۳
X ₄ ²	۵/۶۱	۱	۵/۶۱	۵۳/۵۰	< ۰/۰۰۰۱	-۰/۴۰۱۰
X ₅ ²	۰/۹۳۲۹	۱	۰/۹۳۲۹	۸/۹۰	۰/۰۰۳۵	-۰/۱۶۳۵
X ₆ ²	۱/۰۸	۱	۱/۰۸	۱۰/۳۱	۰/۰۰۱۷	-۰/۱۷۶۰
X ₇ ²	۱/۴۱	۱	۱/۴۱	۱۳/۴۴	۰/۰۰۰۴	-۰/۲۰۱۰
X ₈ ²	۱/۳۱	۱	۱/۳۱	۱۲/۴۶	۰/۰۰۰۶	-۰/۱۹۳۵
Residual	۱۱/۴۳	۱۰۹	۰/۱۰۴۹			
Lack of Fit	۱۱/۴۳	۱۰۰	۰/۱۱۴۳			
Pure Error	۰/۰۰۰۰	۹	۰/۰۰			
Cor Total	۱۰۶/۲۵	۱۵۳				

Fit statistics

R²= ۰/۸۹۲۴, Adj-R²= ۰/۸۴۸۹, Pred-R²= ۰/۷۳۴۷, Model Precision= ۱۹/۷۵۲۹



شکل ۲. تأثیر متقابل مقادیر مختلف ترکیب مرکباتی نسبت به بازده حذف گوگرد در نمونه سنتزی بر حسب (الف) ترکیب گوگردی سولفیدی، (ب) ترکیب گوگردی تیوفنی، (پ) هیدروژن پراکسید، (ت) فرمیک اسید، (ث) فسفوتنگستیک اسید، (ج) ایزو بوتانول، (چ) زمان موج‌دهی فراصوت.

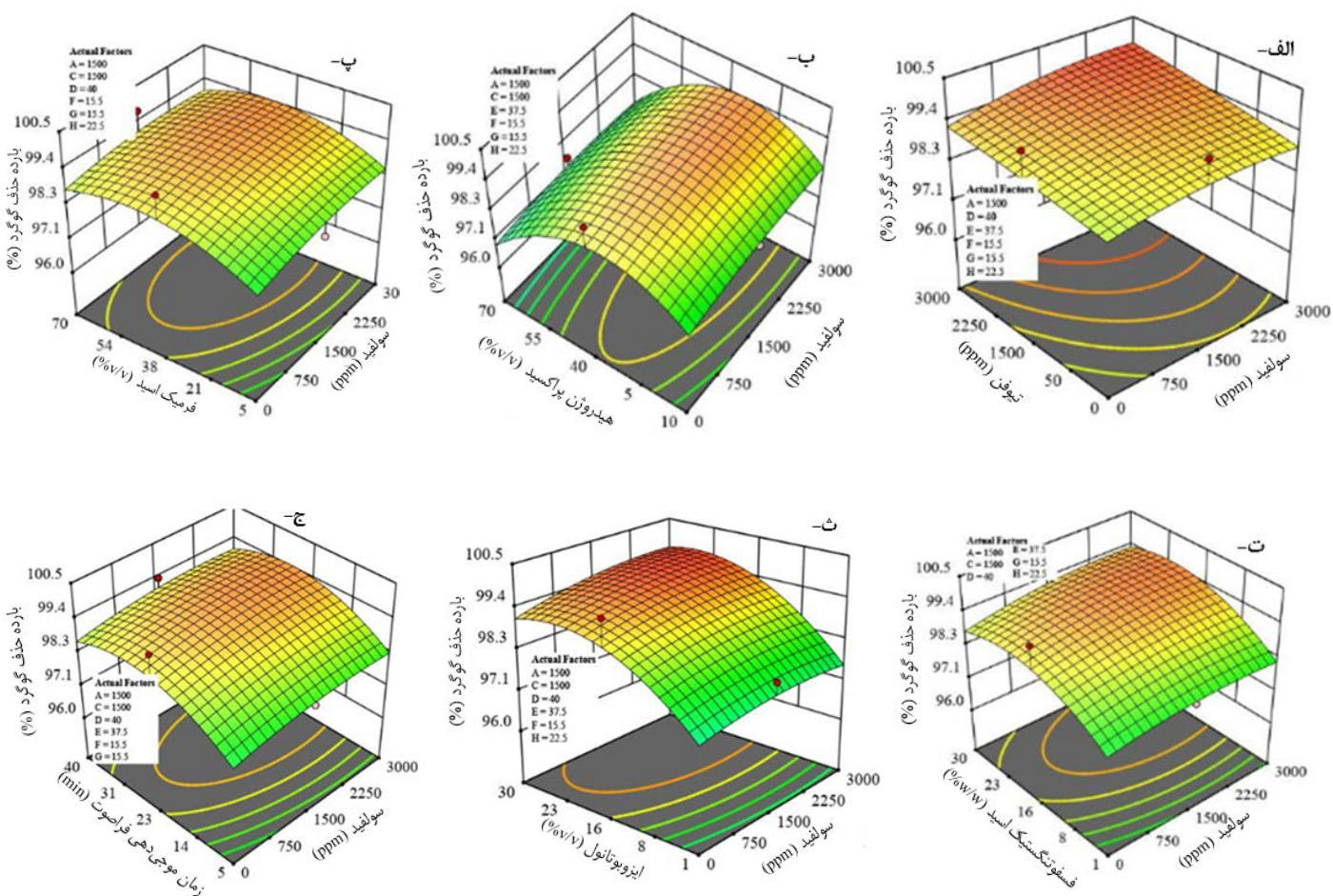
فراصوت است. ترکیبات گوگردی نمونه زیاد یا کم باشد، با افزودن مواد اکسید کننده، حذف گوگرد تا یک مقدار مشخص (حدوداً کمتر از ۵۰ ppm) می‌رسد که نشان از یک رابطه مستقیم بین مقدار گوگرد نمونه و بازده حذف گوگرد می‌باشد. در مخلوط گوگردی هرچه مقدار ترکیب گوگردی مرکباتی نسبت به ترکیبات تیوفنی و سولفیدی بیشتر باشد بازده حذف گوگرد از نمونه میعانات گازی سنتزی بیشتر هست و بالعکس. در شکل‌های

$$\begin{aligned} \%SER = & 99.39 + 0.219X_1 + 0.103X_2 + \\ & 0.1621X_3 - 0.2568X_4 + 0.1579X_5 + 0.2534 \\ & X_6 + 0.4854X_7 + 0.1974X_8 + 0.1184X_6X_7 - \\ & 0.0911X_7X_8 - 0.4010X_4^2 - 0.1635X_5^2 - \\ & 0.1760X_6^2 - 0.2010X_7^2 - 0.1935X_8^2 \end{aligned} \quad (2)$$

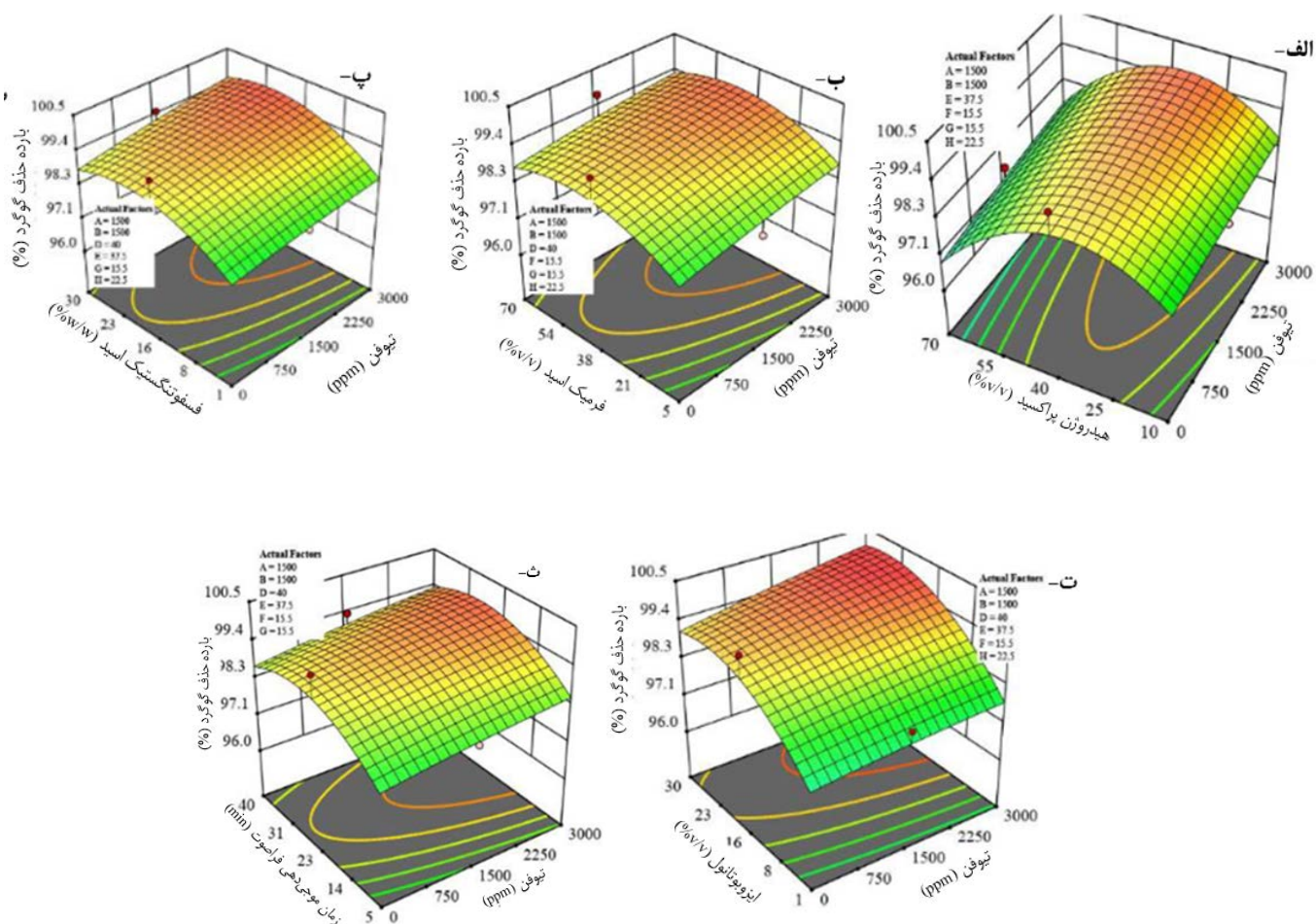
نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها نشان داد که هرچه مقدار ترکیبات گوگردی در نمونه میعانات گازی زیادتر باشد بازده حذف گوگرد بیشتر می‌شود که یکی از دلایل آن خاصیت امواج

۲، ۳ و ۴ مشاهده شده که در مقادیر ثابت سولفور با افزایش مقدار هیدروژن پراکسید بازده حذف گوگرد افزایش و سپس کاهش می‌یابد. بهترین جواب‌ها در مقادیر بالای گوگرد و کمتر از متوسط هیدروژن پراکسید است که دلایلی مانند افزایش فاز آبی و وابستگی مقدار هیدروژن پراکسید به مقادیر بهبود دهنده و کاتالیزگر می‌باشد و باید مقدار هیدروژن پراکسید تنظیم شده باشد که لزوم بهینه‌سازی را می‌رساند. شکل‌های ۲، ۳ و ۴ بیانگر تأثیر بهبود دهنده (فرمیک اسید) بر مقدار سولفور موجود در نمونه و مشاهده بازده حذف گوگرد است. در مقادیر ثابت مخلوط گوگردی با افزایش مقدار فرمیک اسید ابتدا بازده حذف گوگرد زیاد می‌شود و سپس کاهش اندکی می‌یابد که به دلیل افزایش اثر نامطلوب فاز آبی و وابستگی مقدار فرمیک اسید به مقدار هیدروژن پراکسید است که باید بهینه شود و قلیائیت نمونه در یک محدود مشخص نگه داشته شود. بهترین نتایج در

مقادیر بالای گوگرد و مقادیر بالاتر از متوسط فرمیک اسید می‌باشد. در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ با افزایش مقدار کاتالیزگر (فسفوتنگستیک اسید) بازده حذف گوگرد بیشتر می‌شود و ارتباط مستقیم بین مقدار گوگرد موجود در نمونه و مقدار کاتالیزگر وجود دارد چون هر چه مقدار تولید پلی‌اکسومتالات‌ها (محصول واکنش هیدروژن پراکسید و فسفوتنگستیک اسید) زیادتر باشد واکنش تبدیل ترکیبات گوگردی به سولفون‌ها زیادتر می‌شود در نتیجه بازده حذف افزایش می‌یابد. شکل‌های ۲، ۳ و ۴ نشان می‌دهد که مطلوب‌ترین جواب‌ها در مقادیر بالای گوگرد و انتقال دهنده فاز است. هدف استفاده از ایزوبوتانول به عنوان انتقال دهنده فاز است. کمک به انتقال مواد اکسید شده گوگردی از فاز آلی به فاز آبی جهت حذف بهتر گوگرد می‌باشد بنابراین افزایش ایزوبوتانول اثر مثبت بر بازده حذف گوگرد دارد. شکل‌های ۲، ۳،



شکل ۳. تأثیر متقابل مقادیر مختلف ترکیب سولفیدی نسبت به بازده حذف گوگرد در نمونه سنتزی بر حسب (الف) ترکیب گوگردی تیوفنی، (ب) هیدروژن پراکسید، (پ) فرمیک اسید، (ت) فسفوتنگستیک اسید، (ث) ایزو بوتانول، (ج) زمان موج‌دهی فراصوت.



شکل ۴. تأثیر متقابل مقادیر مختلف ترکیب تیوفنی نسبت به بازده حذف گوگرد در نمونه سنتزی بر حسب (الف) هیدروژن پراکسید، (ب) فرمیک اسید، (پ) فسفوتنگستیک اسید، (ت) ایزو بوتانول، (ث) زمان.

گوگردی موجود در میعانات گازی بوده است، نمونه میعانات گازی چهار جریبی طراحی شد که در آن از نرمال هپتان به عنوان نماینده میعانات گازی و ترت بوتیل مرکاپتان به عنوان نماینده مرکاپتان‌ها، دی پروپیل سولفید نماینده سولفیدها و بنزو تیوفن نماینده ترکیبات آروماتیکی استفاده شده است. نتایج نشان داد که بیشترین بازده حذف گوگرد در نقطه بهینه با مقادیر مرکاپتان (۱۱۰۵/۹۹ ppm)، سولفید (۲۲۵۲/۵۰ ppm)، تیوفن (۲۹۶۵/۴۸ ppm)، هیدروژن پراکسید (۲۳/۵۷ % v/v)، فرمیک اسید (۴۹/۲۷ % v/v)، فسفوتنگستیک اسید (۲۱/۱۵ % w/w)، ایزوبوتانول (۲۴/۵۶ % v/v) و زمان موج‌دهی فراصوت (min) ۲۱/۱۷ با استفاده از ظرف سونوراکتور شیشه‌ای و دو مرحله استخراج با حلال آن دی متیل فرمامید، درصد بازده حذف ترکیبات گوگردی ۹۹/۹۲٪ شد. انتخاب روش UAOD همراه با مخلوط اکسید کننده مناسب، درصد بازده حذف گوگرد از

۳ و ۴ نشان از تأثیر زمان بر مقدار گوگرد است. در مقادیر پایین گوگرد با افزایش زمان، بازده حذف گوگرد افزایش می‌یابد و در مقادیر بالای گوگرد با افزایش زمان موج‌دهی فراصوت بازده حذف گوگرد اندکی کاهش می‌یابد که لزوم بهینه سازی را می‌رساند. هر چه مقدار سولفور موجود در نمونه‌ها زیادتر باشد سرعت واکنش‌های اکسیداسیون زیادتر می‌شود و نیاز به زمان موج‌دهی فراصوتی کمتری است. در نتیجه تمام متغیرهای، اکسید کننده، بهبود دهنده، کاتالیزگر، انتقال دهنده فازی و زمان موج‌دهی فراصوت به مقدار ترکیبات گوگردی موجود در نمونه‌ها وابسته هستند.

۴- نتیجه گیری

جهت تحقق اهداف این پژوهش که حذف همه نوع ترکیبات

۹۶/۳۳٪ به ۹۹/۹۲٪ رسید.

مراجع

1. H. Topsøe, B.S. Clausen, F.E. Massoth. (1996).
2. X. Ma, K. Sakanishi, I. Mochida, (Ind. Eng. Chem. Res,1996). Volume 35, pp. 2487-2816.
3. L. Vradman, M. Landau, M. Herskowitz, (1999).
4. S. Mehran, B. Amarjeet, M. Argyrios. (2007).
5. T. Chen, Y. Shen, W. Lee, C. Lin, M. Wan. (Cleaner Production, 2013), Vol. 39, pp. 129-136.
6. M.W. Wan, T.F. Yen. (2007).
7. M.F. Ali, A. Al-Malki, B. El-Ali, G. Martinie, M.N. Siddiqui. (Fuel, 2006), 85, (10-11), pp. 1354-1363.
8. H. Mei, B.W. Mei, T.F. Yen. (2003).
9. T. C. Chen, Y. H. Shen, W. J. Lee, C.C. Lin, M. W. (cleaner production, 2013), pp. 129-136.
10. S. Liu, Z. Liu, H. Zhu, Z. Wang, J. Guo, X. Zhang, H. Yu, X. Yue, P. Ning, B. Li.(2023).
11. A. Taghizadeh, M. Asemani, F. Esmailzadeh, A. Ameri. (2023).



Experimental investigation of sulfur compounds removal from synthetic quaternary gas condensate system using ultrasound assisted oxidative desulfurization (UAOD) method

Ameneh Taghizadeh¹, Maryam Asemani^{1,*}, Fereidoon Esmaeilzadeh², Abolhasan Ameri¹

¹Department of Chemical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

²Department of Chemical Engineering; School of Chemical, Petroleum and Gas Engineering, Shiraz University, Shiraz, Iran

Abstract: In addition to natural gas, gas condensates are also produced from gas reservoirs. The presence of any of the pollutants, such as sulfur compounds, can cause problems in downstream industries or damage the environment. In this research, the desulfurization of a synthetic quaternary gas-condensate system containing of normal heptane with different combinations of tert-butyl mercaptan (aliphatic thiol), dipropyl sulfide (aliphatic sulfide), and benzo thiophene (aromatic thiophene) in the range of 0-3000 ppm were treated using UAOD process. For this purpose, different operating variables including H₂O₂ (10- 70% v/v), CH₂O₂ (5- 70% v/v), H₃P(W₃O₁₀)₄ (1- 30% w/w), C₄H₁₀O (1- 30 % v/v) and sonication (5- 40 min) were examined upon the desulfurization efficiency. The design of the experiments was performed by the response surface method of the central composite design model. And then N, N-dimethylformamide solvent was used to extract oxidized sulfurous compounds from n-heptane. Residual sulfur was analyzed by ASTM D7039 standard method. Maximum desulfurization efficiency, 99.92%, for C₄H₁₀S= 1105.99 ppm, C₆H₁₄S= 2252.50 ppm, C₈H₆S= 2965.48 ppm in 20 mL n-heptane was obtained at H₂O₂= 23.57% v/v, CH₂O₂= 49.27% v/v, H₃P(W₃O₁₀)₄= 21.15% w/w, C₄H₁₀O= 24.56% v/v and sonication time= 21.17 min. Additionally, an empirical model was proposed to predict desulfurization efficiency with an error of less than 0.1%.

Keywords: Ultrasound, Gas condensate, Experimental design.

استخراج و شناسایی ترکیبات فنولی گلبرگ‌های شقایق (*Papaver rhoeas L.*) و تعیین فعالیت آنتی‌اکسیدانی و آنتی‌باکتریایی آن

فاطمه قره داغی قره تپه^۱، سید ابراهیم حسینی^۱، غلامحسین اسدی^{۱*}، ژاله خوشخو^۲

^۱گروه علوم و صنایع غذایی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲گروه علوم و صنایع غذایی، واحد تهران شمال، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده: این پژوهش، با هدف استخراج و شناسایی ترکیبات فنولی شقایق (*Papaver rhoeas L.*) به منظور سنجش فعالیت آنتی‌اکسیدانی و ویژگی های ضد میکروبی مورد بررسی قرار گرفت. استخراج، شناسایی ترکیبات زیست فعال، مقدار ترکیبات موثره عصاره، فعالیت آنتی‌اکسیدانی، حداقل غلظت مهارکنندگی، حداقل غلظت کشندگی و هاله عدم رشد به ترتیب با روش حلال و با کمک فرایند فراصوت، کروماتوگرافی گازی- طیف سنج جرمی (GC-MS)، آزمون MIC، DDPH، MBC و دیسک دیفیوژن انجام شد. نتایج GC-MS منجر به دستیابی به ۱۸ ترکیب از عصاره اتانولی گلبرگ‌های شقایق گردید. نتایج نشان داد از میان ترکیبات، هگزادکانوئیک اسید و ۱۲،۹-اکتادکانوئیک اسید به میزان قابل توجهی، فراوان تر از سایر ترکیبات در گلبرگ شقایق بودند. از دیگر ترکیبات مهم شناسایی شده می‌توان به مورفین و مشتقات مفنمیک اسید اشاره کرد. نتایج آزمون DDPH نشان داد که عصاره اتانولی گلبرگ‌های شقایق توانایی مهار رادیکال‌های آزاد و فعالیت آنتی‌اکسیدانی را دارد. نتایج آزمون هاله عدم رشد، MIC و MBC در *E.coli* و *S.aureus* نیز نشان داد که عصاره اتانولی گلبرگ‌های شقایق در مقابل *S.aureus* کارایی بیشتری دارد. بنابراین با توجه به یافته های فوق می‌توان نتیجه گرفت که گلبرگ‌های شقایق دارای خواص آنتی‌اکسیدانی و ضد میکروبی هستند.

واژگان کلیدی: آنتی‌اکسیدان، ضد میکروبی، فراصوت، کروماتوگرافی.

asadi@srbiau.ac.ir

آسیای شرقی و غربی به صورت وحشی رشد می‌کند و در بسیاری از مناطق جهان به صورت تجاری برای صنایع دارویی و غذایی کشت می‌شود [۲].

به طور کلی، شقایق ترکیبات آنتوسیانین، فلاونوئید و آلکالوئید را در گلبرگ، ریشه و ساقه خود دارد و بیشتر خواص دارویی آن مربوط به ترکیبات فنولیک و آلکالوئیدی آن است. طبق برخی مطالعات بررسی عصاره متانولی شقایق با استفاده از کروماتوگرافی گازی-طیف سنجی جرمی (GC-MS) نشان داده که در ریشه،

۱- مقدمه

گیاه شقایق با نام علمی *Papaver rhoeas L.* به خانواده *Papavaraceae* تعلق دارد. این گیاه یکی از گیاهان چندساله و دوبرگی است که در ابعاد، شکل برگ‌ها، گلبرگ‌ها و کاسبرگ‌ها بسیار متنوع است. همچنین دارای گل‌هایی با ۴ تا ۶ گلبرگ قرمز یا بنفش است [۱]. این گیاه در مناطق مختلف اروپای شرقی،

^۱ P.rhoeas

برگ و گلبرگ به ترتیب ۲۲، ۱۹ و ۱۷ ماده شیمیایی وجود دارد و رایج ترین ترکیبات آلی شامل آلکالوئیدها، ترکیبات فنولی، اسیدهای چرب، استرها، ترپنوئیدها، فیتواسترول ها، رتومرین، ۱۵، ۱۲، ۹-اکتادکاترین-۱-اول، اسید هگزادکانوئیک، دکاربومتوکسی تابرسونین و گاما-سیتوسترول است. به طور خاص، ترکیبات اصلی عصاره گلبرگ های شقایق شامل دکاربومتوکسی تابرسونین، اسید هگزادکانوئیک، ۱۵، ۱۲، ۹-اکتادکاترین-۱-الکل، گلیسرین، گاما-سیتوسترول، بنزیل بنزوات، اکسید آمی تریپتیلین، ۳، ۴-دی هیدرو-۷، ۶-دی متوکسی ایزوکوئینولین-۲-اکسید و تتراهیدرو-۴-هیدروکسی-۴-متیل هستند که بسیاری از این ترکیبات به عنوان آنتی اکسیدان و ضد سرطان عمل می کنند [۳].

ترکیبات پلی فنولی گروه بزرگی از متابولیت های ثانویه در گیاهان هستند که به وفور در گیاهان دارویی، میوه ها و سبزیجات یافت می شوند [۴]. پلی فنول ها اجزای زیستی مهمی هستند و وظایف تغذیه ای را در فعالیت های ضد دیابت، ضد چربی، ضد چاقی و آنتی اکسیدانی انجام می دهند [۵]. در مجموع از آب، حلال های آلی متانول و اتانول برای استخراج مواد موثره موجود در گیاهان دارویی استفاده می شوند که امروزه به طور گسترده از روش فراصوت همراه با مخلوط کردن نمونه با حلال آلی و قرار دادن آن در حمام اولتراسوند طی زمان و دمای مشخص استفاده می شود. زیرا امواج صوتی تولید شده در طول فرآیند، دیواره سلول نمونه را پاره کرده و منجر به استخراج ترکیبات فنولی در زمان کمتر و با افزایش نرخ راندمان و کارایی استخراج ترکیبات زیست فعال می شود. هرچند، فعالیت آنتی اکسیدانی ترکیبات زیست فعال گیاهان دارویی، در شرایط آزمایشگاهی با استفاده از آزمون های مختلفی مانند ظرفیت جذب رادیکال اکسیژن، قدرت آنتی اکسیدانی کاهشی فریک، DPPH^۱ و ABTS^۲ اندازه گیری می شود. با این حال، DPPH محبوب ترین و گسترده ترین روشی است که برای ارزیابی ظرفیت آنتی اکسیدانی استفاده می شود [۶]. همو و همکاران در سال ۲۰۲۴، پژوهشی را با هدف شناسایی و تعیین فعالیت های ضد افسردگی، ضد درد، خصوصیت ضد التهابی

و ضد استروویت عصاره ریشه و عصاره برگ گونه وحشی *P.rhoeas* انجام دادند. استخراج متابولیت های ثانویه و غربالگری فیتوشیمیایی، وجود فنل ها، فلاونوئیدها، ساپونین ها، تانن ها، کومارین ها، ترپنوئیدها و آلکالوئیدها را نشان داد. نتایج استخراج تایید کرد که عصاره ها غنی از متابولیت های ثانویه هستند. لذا ریشه و برگ گیاه شقایق را منبع قابل توجهی از مولکول های فعال زیستی برای استفاده در صنعت داروسازی پیشنهاد دادند [۷].

افقیر و همکاران در سال ۲۰۲۴، با هدف مقایسه ترکیبات فیتوشیمیایی، فعالیت آنتی اکسیدانی و اثرات ضد میکروبی در عصاره های آبی و متانولی گلبرگ های شقایق گونه های *Hypericum perforatum*^۵ و *P.rhoeas* مراکشی را مورد مطالعه قرار دادند. فعالیت آنتی اکسیدانی و اثرات ضد میکروبی بر روی شش باکتری (گرم- و گرم+) آزمایش شد. نتایج نشان داد؛ در مقایسه با عصاره متانولی، عصاره آبی هر دو نوع گیاه *H.perforatum* و *P.rhoeas* محتوای فنلی کل بالاتری داشتند. از سوی دیگر عصاره آبی *P.rhoeas* غلظت فلاونوئید کل بالاتری را در مقایسه با *H.perforatum* از خود نشان داد. در نتیجه اذعان نمودند، عصاره های هر دو گونه گیاه شقایق فعالیت های آنتی اکسیدانی و ضد باکتریایی را دارا می باشند و دارای غلظت بالایی از ترکیبات زیست فعال هستند. لذا قابلیت پتانسیل بالای فعالیت زیستی، آنها را از نظر تجارت دارویی در صنعت داروسازی ارزشمند می سازد [۸].

سرابندی و همکاران در سال ۲۰۲۳، عصاره گلبرگ شقایق را با فرآیند خشک کردن پاششی، ریزپوشانی کردند. طی خشک کردن پاششی پودر عصاره شقایق کپسوله، راندمان کپسولاسیون ترکیبات فنولیک (۹۳-۸۴٪)، آنتوسیانین (۸۳-۷۱٪) و فعالیت آنتی اکسیدانی عصاره در مهار رادیکال های آزاد به روش DPPH (۶۸-۸۰٪) بدست آمد [۹].

همو و همکاران در سال ۲۰۲۳، ترکیبات فنولی، فعالیت های ضد میکروبی و آنتی اکسیدانی گلبرگ های گیاه شقایق *P.rhoeas* سه منطقه جغرافیایی مختلف در مراکش را جمع آوری کردند و نمونه ها را با تست DPPH، ظرفیت آنتی اکسیدانی کل، هاله عدم رشد و فعالیت ضد میکروبی بر روی چهار باکتری بیماری زا و

¹ Oxygen radical absorption capacity (ORAC)

² Ferric reducing antioxidant power (FRAP)

³ (2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl) (DPPH)

⁴ (2, 2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS)

⁵ H.perforatum

یک مخمر مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد تمامی گونه های *P. rhoeas* از سه منطقه مورد مطالعه سرشار از ترکیبات پلی فنول ها، فلاونوئیدها و آنتوسیانین ها می باشند که در خواص آنتی اکسیدانی و ضد میکروبی مورد مطالعه نقش دارند. علاوه بر این، هرچند نتایج متفاوتی در محتوای فنولی و فعالیت های زیستی همه گونه های *P. rhoeas* بدست آمد اما تمامی گونه ها قابلیت مهار رادیکال های آزاد را داشته و همچنین با فعالیت آنتی اکسیدانی و ضد میکروبی بالا قابلیت مبارزه با عفونت های میکروبی را از خود نشان دادند. لذا گیاه شقایق را به عنوان گیاه دارویی پیشنهاد نمودند [۱۰]. برخی از محققین، مطالعه ای را بر روی محتوای اسیدهای چرب و روغن های فرار موجود در گلبرگ شقایق انجام دادند. در این تحقیق، ترکیب اسیدهای چرب و ترکیبات فرار دو نوع صنعتی و چهار نوع خوراکی گونه های شقایق مقایسه گردید. نتایج نشان داد یازده نوع اسید چرب پالمیتیک اسید، پالمیتوئیک اسید، مارگاریک اسید، استتاریک اسید، اولئیک اسید، لینولئیک اسید، لینولنیک اسید، آراشینیک اسید، ایکوزنوئیک اسید، ایکوزادینوئیک اسید و بهنیک اسید در روغن فرار شقایق وجود دارد که اسیدهای لینولئیک، اولئیک و پالمیتیک اجزای اصلی همه گونه ها بودند. در میان اسیدهای چرب تک غیراشباع پالمیتوئیک اسید، اولئیک اسید و ایکوزنوئیک اسید، مقدار اولئیک اسید در بالاترین درصد وجود داشت. هرچند تفاوت های عمده در ترکیبات فرار (مانند ۲ و ۳ متیل بوتانال و ۳ متیل بوتانول γ -n-کاپرولاکتون، پنتوفوران) بسته به ژنوتیپ و سال مشاهده شد [۱۱].

عبدالجبار و همکاران در سال ۲۰۲۲ ترکیبات فیتوشیمیایی و ظرفیت آنتی اکسیدانی عصاره متانولی گلبرگ ها، برگ ها و ریشه های شقایق (*P. Decaisnei* (PD)، گونه بومی از کردستان عراق) را با استفاده از GC-MS، DPPH و ABTS بررسی کردند. نتایج نشان داد بیشترین ترکیبات آلی در PD شامل آلکالوئیدها، فنولیک ها، اسیدهای چرب، استرها و فیتواسترول ها، روماین، دکاربومتوکسی تابرسونین، ۹، ۱۲، ۱۵-اکتادکانترین-۱-آل، اسید هگزادکانوئیک و گاما-سیتوسترول است. همچنین گزارش دادند ظرفیت آنتی اکسیدانی عصاره های موجود در اجزای گیاه در محدوده ۱۴۳/۵-۳۹/۱ میکروگرم در میلی لیتر برای DPPH و ۱۲/۴-۱۲۳/۲۷۶ میکروگرم در میلی لیتر برای ABTS است.

همچنین، پروفایل آلکالوئیدی دو گونه شقایق وحشی، یعنی *P. glaucum* (PG) و *P. Decaisnei* (PD) در شمال عراق با استفاده از کروماتوگرافی لایه نازک مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد؛ آلکالوئید پروآپورفین نوع مکامبری و آلکالوئید آپورفین نوع رومرین از PD جدا شده است و آلکالوئیدهای بنزیلازیوکوئینولین پاپورین (اصلی ترین آلکالوئید)، پالودین و -N-متیل آسیملوبین نوع آپورفین از PG به دست آمده است. بنابراین، پیشنهاد شد PG و PD می توانند منابع قابل اعتمادی برای آلکالوئیدها باشند [۱۰].

شقایق و همکاران در سال ۲۰۱۹ ظرفیت آنتی اکسیدانی و توزیع آلکالوئیدهای نوسکاپین، تبین، کدئین، پاپاورین و مورفین موجود در ریشه، ساقه و کاسبرگ، شش گونه شقایق در مناطق مختلف ایران را با روش DPPH و HPLC بررسی کردند. نتایج نشان داد؛ مقدار آلکالوئیدها در گونه های گیاهی و اجزاء آنها بسیار متفاوت است. طبق نتایج آنها، نوسکاپین بیشترین آلکالوئید فعال در ریشه، ساقه و کاسبرگ گونه های مختلف شقایق بود، اگرچه مورفین در برخی از گونه ها و قسمت های گیاه مشاهده نشد. بیشترین مقادیر مورفین، کدئین، تبین، پاپاورین و نوسکاپین به ترتیب در کاسبرگ *P. dubium* و ریشه *P. arenarium*، *P. tenuifolium* و *P. dubium* یافت شد. همچنین، ظرفیت آنتی اکسیدانی عصاره ها نیز در محدوده ۱/۲۲ در *P. dubium* تا ۴۲/۳۳ میلی گرم در گرم در *P. lacerum* متغیر بود. طبق نتایج آنها، ریشه بالاترین فعالیت آنتی اکسیدانی را در میان سایر اندام های شقایق داشت [۱۳].

ویلکوویچ و همکاران در سال ۲۰۱۹، عصاره گلبرگ های تازه شقایق *P. rhoeas* را به منظور تعیین محتوای آنتوسیانینی با HPLC مطالعه نمودند. نتایج نشان داد بیشترین آنتوسیانین های موجود در عصاره های *P. rhoeas* دلفینیدین-۳-O-گلوکوزید، سیانیدین-۳-O-گلوکوزید، سیانیدین-۳-O-روتینوزید، پئونیدین-۳-O-گلوکوزید، پتوندین-۳-O-گلوکوزید، پتوندین-۳-O-استیل گلوکوزید و دلفینیدین-۳-p-کوماروئیل گلوکوزید می باشد [۱۴].

چوبان و همکاران در سال ۲۰۱۷، ترکیبات آلکالوئیدی موجود در ساقه گیاه شقایق *P. rhoeas* که از مناطق مختلفی در ترکیه و قبرس شمالی جمع آوری و با روش کروماتوگرافی لایه نازک

درجه سانتی‌گراد در دقیقه به ۲۳۰ درجه سانتی‌گراد افزایش یافت و در نهایت با سرعت ۳۰ سانتی‌گراد در دقیقه به ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد رسید. دمای ورودی نمونه و آشکارساز به ترتیب بر روی ۲۵۰ و ۲۴۰ سانتی‌گراد تنظیم شد [۷]. سپس گاز هلیوم به عنوان گاز حامل با سرعت ۱ میلی‌لیتر در دقیقه به ستون تزریق شد و یک میکرولیتر از هر روغن فرار به دستگاه تزریق شد. در نهایت، تفسیر و تشخیص داده‌ها با استفاده از زمان بازدارندگی، ارتفاع پیک و مقایسه سایر مؤلفه‌ها با ترکیبات استاندارد یا با اطلاعات موجود در کتابخانه آدامز، Wiley، Mass Finder، GC/MS یا جداول NIST برای شناسایی ترکیبات زیست‌فعال انجام شد [۳، ۱۴].

فعالیت آنتی‌اکسیدانی عصاره شقایق با استفاده از روش DPPH و با استفاده از ۱،۱-دی‌فنیل-۲-پیکریل‌هیدرازیل انجام شد [۹، ۱۰]. آزمون با مقدار ۵۰ میکرولیتر عصاره به ۲۰۰۰ میکرولیتر در $10^{-5} \text{ mol. L}^{-1}$ (۹۵٪ رادیکال آزاد) در متانول و انکوباسیون به مدت ۳۰ دقیقه در دمای اتاق انجام شد. در نهایت، جذب در طول موج ۵۱۷ nm خوانده و درصد مهار رادیکال آزاد با استفاده از معادله زیر تعیین شد [۳، ۱۳].

$$\%EPPH = \frac{Abs_{control} - Abs_{sample}}{Abs_{control}} \times 100 \quad (1)$$

که در آن $Abs_{control}$ ، میزان جذب محلول (شاهد) بدون استخراج و Abs_{sample} ، میزان جذب نمونه با استخراج است.

همچنین حداقل غلظت مهارکنندگی با روش میکرودیالوژن برات تعیین گردید. کشت میکروارگانیسم مورد آزمون برای تهیه سوسپانسیون سلولی مولر هیتون برات دوبار برای سوبه‌های باکتریایی و به دست آوردن 10^6 واحد تشکیل کلنی (CFU/ml) و 2×10^3 cells/ml تغلیظ شد. سپس نمونه‌ها در دی‌متیل سولفوکسید ۴٪ (DMSO) و $100 \mu\text{l}$ از هر رقت در میکروول‌ها قرار گرفت و به طور جداگانه با $100 \mu\text{l}$ سوسپانسیون باکتریایی تلقیح داده شد. پس از مخلوط دقیق، میکرو پلیت‌های تلقیح شده در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت انکوبه شدند. حداقل غلظت بازدارندگی به عنوان پایین‌ترین غلظت برای مهار شد قابل ملاحظه‌ای از میکروارگانیسم‌ها بیان گردید [۱۵].

برای تعیین حداقل غلظت میکروبی 100 میکرولیتر از بخشی از برات از هر چاهک گرفته شد، روی محیط کشت مولر هیتون

مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج آنها دوازده آلکالوئید مهم در گروه‌های روئادین (ایپگلاوکامین، گلاوکامین، گلاودین، ایزوروئادین، ایزوروئازنین، روئادین، روئازنین)، پروآپورفین (مکامبرین)، آپورفین (رومرین)، پرومورفین (رومرین)، پرومورفین استخراج گردید و بیشترین میزان غلظت بازدارنده حداقلی (MIC) در نمونه عصاره آلکالوئید آپورفین (رومرین)، در برابر استافیلوکوکوس اورئوس با مقدار $1/22 \mu\text{g/mL}$ و کاندیدا آلبیکنس با مقدار $2/4 \mu\text{g/mL}$ مشاهده گردید. در نتیجه پیشنهاد دادند که در *P. Rhoëas* نمونه پورفین فعال‌ترین عصاره و رومرین آلکالوئید اصلی می‌باشد [۱۵].

در این مطالعه با هدف استخراج و شناسایی ترکیبات موثره موجود در گلبرگ‌های گیاه دارویی شقایق (*Papaver rhoëas L.*) به منظور ارزیابی قدرت کشندگی، ویژگی‌های بازدارنده و فعالیت آنتی‌اکسیدانی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد و روش‌ها

برای تهیه نمونه‌ها، گلبرگ‌های شقایق در اوایل اردیبهشت ماه از باغ گیاه‌شناسی نوشهر واقع در منطقه جلگه ای با مختصات جغرافیایی (Zone:39S Easting: 545628.00 m E) (Northing: 4055673.00 m N) جمع‌آوری شدند و پس از جداسازی پرچم‌ها و کاسبرگ‌ها، کلیه گلبرگ‌ها پس از سه روز خشک شدن در سایه به آزمایشگاه منتقل شدند.

سپس برای استخراج مواد موثره گلبرگ‌های شقایق، ۱۰ گرم گلبرگ شقایق و ۴۰ میلی‌لیتر حلال اتانول استفاده شد. سپس نمونه‌ها در دستگاه مولد امواج اولتراسونیک مدل Q125 (Qsonica, USA) به طول موج ۵۲۰ نانومتر و با شدت ۲۰۰ هرتز به مدت ۲ دقیقه قرار گرفت [۵].

به منظور شناسایی ترکیبات موثر عصاره استخراجی شقایق، از دستگاه GC-MS مدل Agilent 6890N-5973N ساخت کشور آمریکا مجهز به جرم‌سنج و ستون کاپیلری ۳۰ متری با قطر ۰/۲۵ میلی‌متر استفاده شد. در ابتدا، کوره ستون به مدت ۵ دقیقه در دمای ۴۰ سانتی‌گراد تنظیم شد، سپس با سرعت ۱۰

آگار گسترده و در دمای ۳۷ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت برای باکتری انکوباسیون انجام گردید. پایین ترین غلظتی که میکروارگانیزم‌های انکوبه کاملاً کشته می‌شوند (کاهش ۹۹/۹٪ در CFU/ml در مقایسه با شاهد) به عنوان MBC تعریف گردید [۱۶، ۱۷].

برای ارزیابی ویژگی ضد میکروبی عصاره گلبرگ شقایق، ابتدا با استفاده از روش دیسک دیفوزیون، با تغییرات جزئی به روش اوبیهی و همکاران انجام شد. این روش شامل سوسپانسیون میکروبی PBS با چگالی نوری CFU/mL بر روی محیط آگار نوترینت از طریق غوطه‌ور کردن پتری‌دیش‌ها بود. عصاره‌های اتانولی در DMSO حل شدند [۸].

سپس، دیسک‌های استریل با قطر ۶ میلی‌متر از کاغذ واتمن با ۱۵ میکرولیتر از عصاره اشباع شدند و در مرکز هر پتری‌دیش روی سطح آگار قرار گرفتند. فرآیند انکوباسیون در دمای ۳۷ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت انجام شد. نتایج با اندازه‌گیری ناحیه شفاف اطراف دیسک و قطر مناطق بازدارنده (هاله عدم رشد) تجزیه و تحلیل شد و در نهایت میانگین قطر مناطق بازدارنده گزارش گردید [۴، ۱۸].

برای آنالیزهای آماری، کلیه آزمون‌ها بر اساس طرح کاملاً تصادفی، با سه تکرار و با استفاده از نرم افزار SPSS نسخه ۲۶ در سطح $\alpha=0/05$ تجزیه و تحلیل شد. علاوه بر این از آزمون پارامتریک t مستقل^۱ برای تعیین نرمال بودن متغیرهای وابسته پژوهش استفاده شد. همچنین از آزمون کولموگروف اسمیرنوف نیز در صورت عدم پیروی داده‌ها از توزیع نرمال بهره گرفته شد و در بررسی معناداری اختلاف میانگین داده‌ها، آزمون غیرپارامتریک Mann-Whitney U test بکار گرفته شد.

۳- بحث و نتایج

کروماتوگرام بدست آمده از عصاره اتانولی گلبرگ شقایق در شکل ۱ آورده شده است. همچنین خلاصه‌ای از مشخصات پیک‌ها در جدول ۱ آورده شده است. بر اساس شکل ۱ و داده‌های جدول ۱، کمترین و بیشترین مقادیر زمان بازداری، به ترتیب مربوط

به پیک ۱ (R.T=۹/۰۵۶) و پیک ۱۸ (R.T=۴۸/۷۶۷) باشد. همچنین کمترین و بیشترین مساحت و ارتفاع به ترتیب مربوط پیک ۴ (Height=۲۴۳۳۲۹۸، Area=۱۳۴۰۵۹) و پیک ۸ (Height=۵۵۵۹۳۹۷، Area=۲۷۸۹۴۸۶۲) می‌باشد. علاوه بر این، کمترین و بیشترین درصد ارتفاع نسبت به بیشینه^۴ (بیشینه درصد) و درصد مساحت نسبت به کل مساحت نمودار (درصد اجزا از کل)^۵ به ترتیب متعلق به پیک ۴ و ۸ است.

مشخصات پیک‌های بدست آمده در جدول ۱ با اطلاعات کتابخانه‌های تطبیق داده شد و نتایج در جدول ۲ آورده شده‌اند. با توجه به جداول ۱ و ۲ و با در نظر گرفتن فاکتور مساحت که نشان‌دهنده فراوانی نسبی ترکیبات است، سه ترکیب با کمترین فراوانی شامل فنول، ۲ (H^۳) فورانون دی هیدرو و ۲۶-کتادینال-۳،۷-دی متیل-(E) و سه ترکیب با بیشترین فراوانی شامل هگزادکانوئیک اسید، ۱۲-۹-اکتا دکانوئیک اسید و H^۴-پیران-۴-وان-۲،۳-دی هیدرو-۵،۳-دی هیدروکسی-۶-متیل می‌باشد.

زمان بازداری نشان‌دهنده زمان لازم برای عبور یک ترکیب از ستون کروماتوگرافی است و هرچه این مقدار کمتر باشد، نشان‌دهنده ترکیباتی با قطبیت کمتر و هرچه این مقدار بیشتر باشد، نشان‌دهنده حضور ترکیباتی با قطبیت بیشتر است. لذا می‌توان نتیجه گرفت؛ هرچه از پیک ۱ به سمت پیک ۱۸ پیش می‌رود بر قطبیت ترکیبات افزوده می‌شود؛ بطوریکه پیک ۱ و ۲ با ترکیبات ۲ (H^۳) فورانون دی هیدرو (گاما-بوتیرولاکتون نوعی هتروسیلیک آروماتیک و جزء دسته فوران‌ها)، ۲-هیدروکسی-۲-سیکلوپنتن-۱-وان (جزء دسته سیکلوپنتنون‌ها) دارای کمترین قطبیت و پیک ۱۸ با ترکیب ۱۲-۹-تترا دکادی ان-۱-آل (با وجود دو پیوند دوگانه در ساختار نوعی دی ان بشمار می‌رود)، دارای بیشترین قطبیت هستند. از سوی دیگر مقادیر ارتفاع و مساحت نشان‌دهنده فراوانی و غلظت ترکیبات در نمونه می‌باشند. بطوریکه ارتفاع پیک نشان‌دهنده فراوانی لحظه‌ای و مساحت پیک نشان‌دهنده کل فراوانی ترکیب در طول زمان بازداری است. همچنین Pct Max و Pct Total نشان‌دهنده نسبت فراوانی یک ترکیب به ترکیب با بیشترین فراوانی و نسبت آن به کل ترکیبات موجود در نمونه هستند و درصد مساحت نشان‌دهنده

^۴ Percentage of Maximum (Pct Max)

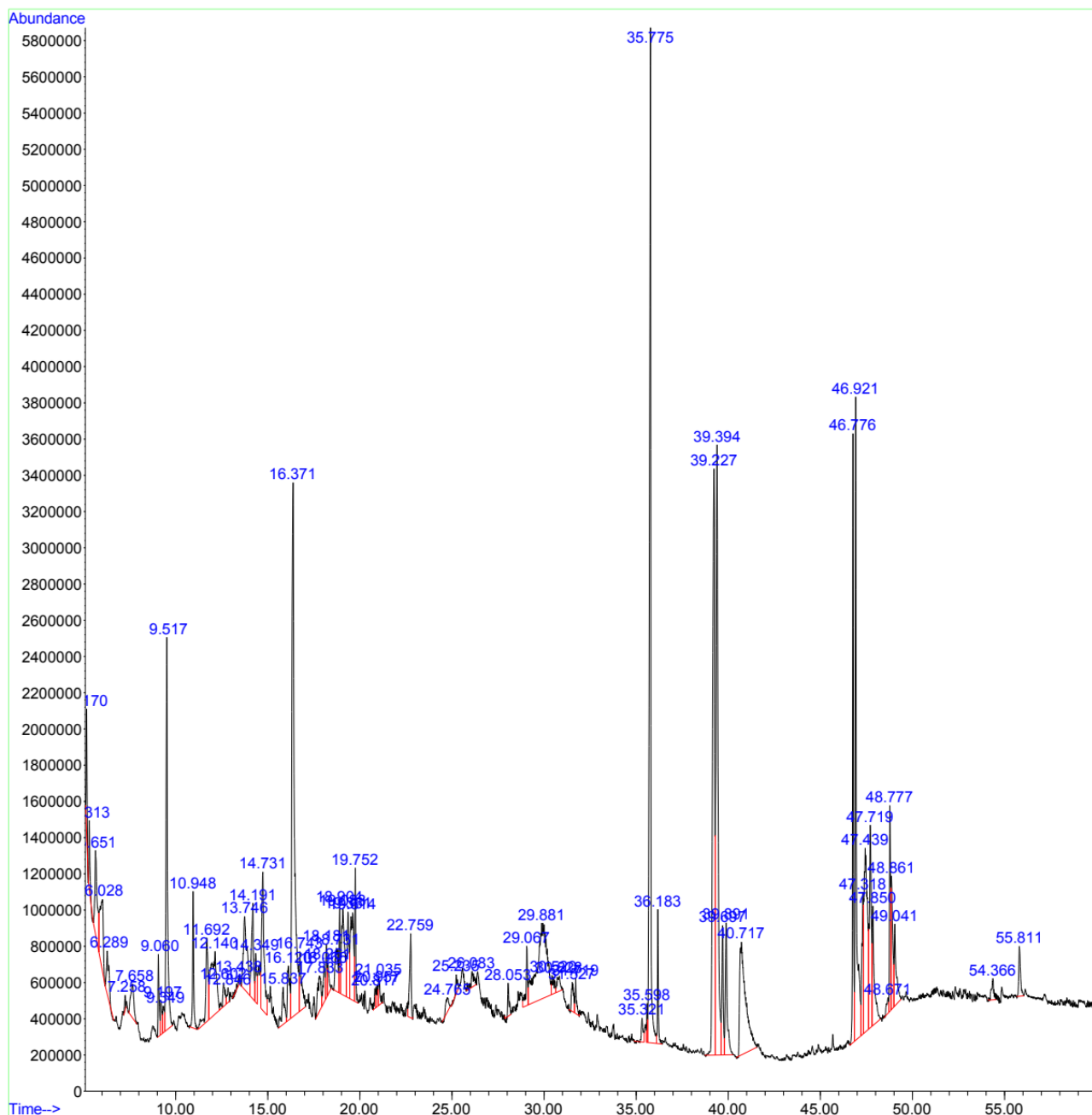
^۵ Percentage of Total (Pct Total)

^۶ Area Pct

^۱ Phosphate-Buffered Saline (PBS)

^۲ Statistical Package for Social Science (SPSS)

^۳ Independent t test



شکل ۱. ترکیبات فنولی و مواد موثره استخراجی از عصاره اتانولی گلبرگ شقایق به روش کروماتوگرافی گازی طیف سنج جرمی

نشان‌دهنده اطمینان بیشتر از شناسایی صحیح ترکیب است. لذا مقادیر کیفیت بالاتر از ۹۰ به وفور در جدول ۲ به چشم می‌خورد که خود دلیلی قاطع بر تایید هویت ترکیبات شناسایی شده می‌باشد.

از سوی دیگر مقایسه ترکیبات شیمیایی استخراج شده از عصاره اتانولی گلبرگ شقایق با تحقیقات پیشین نشان داد؛ حضور ترکیبات فنول‌ها، ترپنوئیدها، آلدئیدها، استرها و اسیدهای چرب پالمیتیک اسید، لینولئیک اسید و لینولنیک اسید، مطابق با نتایج همو و همکاران در سال ۲۰۲۴، گوپچو و همکاران

نسبت مساحت پیک یک ترکیب به کل مساحت پیک‌ها است و برای تعیین فراوانی نسبی ترکیبات در نمونه استفاده می‌شود.

بنابر آنچه در جدول ۲ نشان داده شده ترکیبات فنول (هیدروکربن آروماتیک)، ۱۲،۹-اکتادکانوئیک اسید(لینولئیک اسید، اسید چرب غیر اشباع) و هگزا دکانوئیک اسید (پالمیتیک اسید رایج‌ترین اسید چرب اشباع در طبیعت) به ترتیب کمترین و بیشترین ترکیبات در عصاره شقایق به شمار می‌آیند و با توجه به اینکه فاکتور کیفیت نیز نشان‌دهنده اطمینان از شناسایی ترکیب می‌باشد مقادیر بالاتر،

جدول ۱. پارامترهای بدست آمده از مواد موثره عصاره اتانولی گلبرگ شقایق به روش کروماتوگرافی گازی طیف سنج جرمی

پیک	زمان بازداری (بازگشت)	زمان بازگشت اولیه	مقدار بیشینه	زمان بازگشت آخر	نوع پیک	مساحت زیر نمودار پیک	ارتفاع پیک	% ارتفاع نسبت به بیشینه	% مساحت نسبت به کل مساحت نمودار (اجزا از کل عصاره)
۱	۹/۰۵۶	۶۷۴	۶۸۱	۶۹۸	rBV	۱۸۵۸۳۱۳	۴۵۷۸۹۳	۶/۶۶	۱/۱۲۸
۲	۹/۵۱۷	۷۴۳	۷۶۰	۸۰۶	rVB _r	۱۱۵۷۵۵۳۱	۲۱۳۴۲۲۶	۴۱/۵	۷/۰۲۴
۳	۱۰/۹۴۵	۹۹۶	۱۰۰۵	۱۰۲۶	rVB _r	۲۶۰۹۲۵۶	۷۳۱۶۹۶	۹/۳۵	۱/۵۸۳
۴	۱۱/۶۸۵	۱۱۲۷	۱۱۳۲	۱۱۵۱	rVB _r	۱۱۳۴۰۵۹	۲۴۳۳۲۹	۴/۰۷	۰/۶۸۸
۵	۱۴/۷۳۳	۱۶۳۹	۱۶۵۵	۱۶۸۴	rVB _r	۴۹۷۷۰۹۹	۶۹۰۵۸۲	۱۷/۸۴	۳/۰۲
۶	۱۶/۳۷۷	۱۹۱۵	۱۹۳۷	۱۹۸۳	rBV _r	۲۳۷۷۶۶۷۰	۲۸۱۵۲۵۹	۸۵/۲۴	۱۴/۴۲۸
۷	۱۹/۷۵۲	۲۵۰۹	۲۵۱۶	۲۵۳۰	rBV	۲۲۱۳۳۱۵	۷۳۱۱۶۵	۷/۹۳	۱/۳۴۳
۸	۳۵/۷۸۱	۵۲۴۰	۵۲۶۶	۵۳۰۹	rBV	۲۷۸۹۴۸۶۲	۵۵۵۹۳۹۷	۱۰۰	۱۶/۹۲۷
۹	۳۶/۱۷۷	۵۳۲۶	۵۳۳۴	۵۳۵۴	rBV	۲۱۷۹۹۹۵	۷۳۰۸۶۶	۷/۸۲	۱/۳۲۳
۱۰	۳۹/۲۲۵	۵۸۲۴	۵۸۵۷	۵۸۶۹	rVB _r	۲۵۳۸۵۲۲۸	۳۲۱۷۵۴۳	۹۱	۱۵/۴۰۴
۱۱	۳۹/۳۹۴	۵۸۷۲	۵۸۸۶	۵۹۲۳	rVV ₄	۲۲۸۴۰۷۱۶	۳۳۰۴۰۵۳	۸۱/۸۸	۱۳/۸۶
۱۲	۳۹/۶۹۲	۵۹۲۶	۵۹۳۷	۵۹۵۵	rVB _r	۲۸۱۹۹۷۲	۶۲۵۲۹۲	۱۰/۱۱	۱/۷۱۱
۱۳	۳۹/۸۸۴	۵۹۵۵	۵۹۷۰	۵۹۸۹	rBV _v	۳۲۲۱۰۵۹	۶۴۰۳۲۴	۱۱/۵۵	۱/۹۵۵
۱۴	۴۰/۶۶۵	۶۰۸۴	۶۱۰۴	۶۱۰۵	rBV _r	۲۵۹۲۰۴۳	۶۰۸۷۴۹	۹/۲۹	۱/۵۷۳
۱۵	۴۶/۷۷۳	۷۱۳۶	۷۱۵۲	۷۱۶۵	rBV _r	۱۰۸۰۷۰۶۳	۳۳۴۲۶۶۲	۳۸/۷۴	۶/۵۵۸
۱۶	۴۶/۹۱۹	۷۱۶۶	۷۱۷۷	۷۲۰۰	rVV _r	۱۲۰۰۶۲۷۹	۳۳۰۷۶۱۳	۴۳/۰۴	۷/۲۸۵
۱۷	۴۷/۷۱۲	۷۳۰۸	۷۳۱۳	۷۳۲۹	rVB _r	۲۴۳۴۹۸۴	۶۵۳۹۳۰	۸/۷۳	۱/۴۷۸
۱۸	۴۸/۷۶۷	۷۴۸۶	۷۴۹۴	۷۵۰۵	rVB _r	۴۴۷۱۸۱۴	۱۰۸۱۲۸۷	۱۶/۰۳	۲/۷۱۲

و همکاران در سال ۲۰۲۴، همو و همکاران در سال ۲۰۲۳، عبدالجبار و همکاران در سال ۲۰۲۲، جعفر و همکاران در سال ۲۰۲۱ و شقایق و همکاران در سال ۲۰۱۹ مطابقت دارد [۳، ۷، ۱۰، ۱۲، ۱۳].

از طرف دیگر طبق جدول ۲ ایزوتالاسامین را می‌توان به عنوان آلکالوئید اصلی برشمرد. اما جعفر و همکاران در سال ۲۰۲۱ پاپاورین بنزیلیزوکینولین، شقایق و همکاران در سال ۲۰۱۹ نوسکاپین و چوبان و همکاران در سال ۲۰۱۷ رومرین را به عنوان آلکالوئید اصلی *P. rhoeas* معرفی کردند. از این لحاظ، یافته با نتایج آنها مطابقت ندارد [۱۲، ۱۳]. نکته شایان ذکر اینکه؛ مطابق جدول ۲ در بین سه ترکیب ایزوتالاسامین، تبائین و مشتق تری متیل سلیل مفنامیک اسید به عنوان ترکیبات مخدر و غیرمخدر شناسایی شده، میزان تری متیل سلیل مفنامیک اسید (ترکیب غیر

در سال ۲۰۲۳ و عبدالجبار و همکاران در ۲۰۲۲ است [۱۱، ۷، ۳].

طبق جدول ۲ پالمیتیک اسید در صدر اسیدهای چرب استخراج شده عصاره شقایق می‌باشد. اما طبق نتایج گوپچو و همکاران، که در سال ۲۰۲۳ به چاپ رسیده است، اولئیک اسید، بالاترین میزان اسید چرب را در نمونه شقایق داشته است. لذا نتایج حاصل با یافته آنها مطابقت ندارد. نکته قابل توجه اینکه؛ نتایج بررسی اسیدهای چرب نشان می‌دهد، بیشترین و کمترین میزان اسیدهای چرب به ترتیب مربوط به پالمیتیک اسید، لینولئیک اسید، لینولنیک اسید، اتیل استر لینولئیک اسید، استر اسید لینولئیک و اتیل استر پالمیتیک اسید می‌باشد. علاوه بر این وجود ترکیبات آلکالوئیدی نظیر تبائین (پارامرفین) و ایزو تالاسامین (نوعی آلکالوئید هتیدین و جز دسته دی ترپنوئیدها) با نتایج همو

جدول ۲. ترکیبات استخراج شده از عصاره گلبرگ شقایق به روش GC-MS

پیک	شناسایی از کتابخانه	سایر اسامی	کیفیت	% ترکیب
۱	۲(H ^۳) فورانون دی هیدرو	گاما بوتیرو لاکتون	۸۶	۱/۱۲۸
۲	۲-هیدروکسی-۲-سیکلوپنتن-۱-وان	-	۹۰	۷/۰۲۴
۳	H ^۴ -پیران-۴-وان-۲،۳-دی هیدرو-۵،۳-دی هیدروکسی-۶-متیل	پیرانون	۸۳	۱/۵۸۳
۴	فنول	-	۷۶	۰/۶۸۸
۵	۴-پیریدین کربوکسامید	ایزو نیپکتامید	۴۰	۳/۰۲
۶	H ^۴ -پیران-۴-وان-۲،۳-دی هیدرو-۵،۳-دی هیدروکسی-۶-متیل	پیرانون	۹۴	۱۴/۴۲۸
۷	۲،۶-اکتادینال-۷،۳-دی متیل-(E)	گرانیال، الفا-سیترال، ترانس سیترال	۹۶	۱/۳۴۳
۸	هگزا دکانویک اسید	پالمیتیک اسید، امرسول ۱۴۰	۹۹	۱۶/۹۲۷
۹	اتیل استر هگزا دکانویک اسید	پالمیتیک اسید، اتیل پالمیتات	۹۹	۱/۳۲۳
۱۰	۹،۱۲-اکتا دکانویک اسید-(Z Z)	لینولئیک اسید، ترفاریک اسید، یونیک اسید، امرسول ۳۱۰	۹۹	۱۵/۴۰۴
۱۱	۹،۱۲،۱۵-اکتا دکانویک اسید-(Z Z Z)	لینولئیک اسید، آلفا-اینداسترن ۱۲۰	۹۹	۱۳/۸۶
۱۲	اتیل استر لینولئیک اسید	مندنول، اتیل لینولات	۹۹	۱/۷۱۱
۱۳	۹،۱۲،۱۵-اتیل استر اکتا دکانویک اسید-(Z Z Z)	لینولئیک اسید، اتیل آلفا لینولات	۹۹	۱/۹۵۵
۱۴	فنول ۴،۴-(۱-متیل اتیل ادین) بیس	بیسفنول A، دیان، دیانو، پارا بیس A	۹۸	۱/۵۷۳
۱۵	ایزو-تالاسامین	-	۸۳	۶/۵۵۸
۱۶	مشتق تری متیل سیلیل مفاامیک اسید	تری متیل سیلیل ۲-(۲،۳-دی متیلانیلینو) بنزوات	۴۶	۷/۲۸۵
۱۷	تباتین	پارا-مورفین، مورفینان	۹۹	۱/۴۷۸
۱۸	۹-تتراد کادی ان-۱-أل	-	۹۶	۲/۷۱۲

علاوه بر این، طبق جدول ۴، نتایج آزمون کولموگروف اسمیرنوف، بررسی نرمال بودن متغیرها نشان می‌دهد متغیر فعالیت آنتی اکسیدانی دارای توزیع نرمال می‌باشد.

جدول ۳. آمار توصیفی متغیر فعالیت آنتی اکسیدانی (DPPH)

گروه	تعداد	انحراف استاندارد	میانگین
اسید آسکوربیک IC ₅₀	۳	۰/۴۵	۲۱/۴۴
عصاره شقایق IC ₅₀	۳	۱۲	۸۳۷
کل	۶	۴۴۶/۷۶۵۱۷	۴۲۹/۲۲

استروئیدی غیرمخدر) بصورت مجزا، نسبت به دو ترکیب ایزوتالاسامین، تباتین (آکالوئیدهای مخدر) بیشتر می‌باشد. هرچند مجموع آکالوئیدهای مخدر نسبت به ترکیب غیر استروئیدی غیرمخدر بیشتر است. علاوه بر این مقایسه دو آکالوئید مخدر نشان داد؛ میزان ایزوتالاسامین نسبت به تباتین (پارا مرفین) به مراتب بیشتر می‌باشد. بر اساس نتایج جدول ۳، آمار توصیفی میانگین و انحراف استاندارد متغیر فعالیت آنتی اکسیدانی نشان می‌دهد که میانگین^۱ IC₅₀ عصاره شقایق به طور قابل ملاحظه ای بیشتر از اسید آسکوربیک می‌باشد.

¹ Half-Maximal Inhibitory Concentration

جدول ۴. آمار استنباطی نتایج آزمون کولموگروف اسمیرنوف برای متغیر DPPH

سطح معناداری Sig.	درجه آزادی	مقدار شاخص آزمون
۰/۰۵۶	۶	۰/۳۱۹

مطابق جدول ۵، مقدار F برای آزمون لون برای متغیر فعالیت آنتی اکسیدانی برابر ۳/۷ است که در سطح ۵ درصد معنادار نمی‌باشد ($sig > 0.05$). این نتایج بیانگر این است که در سطح ۵ درصد، فرض برابر بودن واریانس بین دو گروه را نمی‌توان رد کرد ($sig > 0.05$) و واریانس متغیر وابسته دو گروه با یکدیگر تفاوت معناداری ندارند و شرط برابری واریانس‌ها مورد تایید است. به عبارت دیگر، شرط برابری واریانس‌های بین گروهی رعایت شده است و گروه‌ها دارای شباهت (همسانی) می‌باشند. در ادامه، نتایج آزمون t مستقل در جدول ۵ نشان می‌دهد که مقدار شاخص t با توجه به برقراری فرض همسانی واریانس، جهت بررسی مقایسه ای میانگین IC_{50} بین اسید اسکوربیک و عصاره شقایق در حالت برابری واریانس برای این آزمون، برابر ۱۱۷/۶۳۳- است که در سطح ۵ درصد معنادار می‌باشد ($sig < 0.05$). بنابراین، بین IC_{50} اسید اسکوربیک و عصاره شقایق اختلاف معناداری وجود دارد. طبق نتایج فعالیت آنتی‌اکسیدانی نمونه شاهد و عصاره اتانولی گلبرگ شقایق، می‌توان نتیجه گرفت که هرچه مقدار IC_{50} کمتر باشد، توانایی

مهار رادیکال‌های آزاد بیشتر است. بنابراین اسکوربیک اسید به عنوان یک آنتی‌اکسیدان قوی نسبت به عصاره شقایق محسوب می‌شود و در مقایسه با عصاره شقایق، توانایی بسیار بالاتری در مهار رادیکال‌های آزاد دارد. در حالی که عصاره شقایق توانایی کم‌تری در مقایسه با اسکوربیک اسید برای مهار رادیکال‌های آزاد است. با این حال، عصاره شقایق همچنان فعالیت آنتی اکسیدانی دارد؛ اما با کارایی کمتر نسبت به اسکوربیک اسید دارد. بطوریکه نتایج DPPH با یافته‌های افقیر و همکاران در سال ۲۰۲۴، هممو و همکاران در سال ۲۰۲۳، عبدالجبار و همکاران در سال ۲۰۲۲، شقاقی و همکاران در سال ۲۰۱۹ و چوبان و همکاران در سال ۲۰۱۷ مبنی بر فعالیت آنتی اکسیدانی عصاره شقایق مطابقت دارد. هرچند نتایج شقاقی و همکاران در سال ۲۰۱۹ نشان داد که ریشه بالاترین فعالیت آنتی اکسیدانی را در مقایسه با اندام‌های گیاهی گلبرگ، کاسبرگ و ریشه گیاه شقایق داشته است [۳، ۷، ۸، ۱۳، ۱۵].

تجزیه و تحلیل متغیرهای MIC، MBC و هاله عدم رشد طبق نتایج جدول ۶ نشان می‌دهد که میانگین MIC و MBC در *E. coli* بیشتر از *S. aureus* می‌باشد؛ اما این اختلاف در MBC بیشتر است. در مقابل، میانگین هاله عدم رشد *S. aureus* بیشتر *E. coli* بوده است.

جدول ۵. نتایج آزمون t مستقل برای مقایسه میانگین فعالیت آنتی اکسیدانی (DPPH)

نتایج آزمون لون	نتایج آزمون t برای مقایسه میانگین						
	F	سیگما	t	درجه آزادی	تفاوت سیگما (دو طرفه)	Std. تفاوت خطای	فاصله اطمینان ۹۵٪ پایین بالا
واریانس‌های برابر فرض شده است	۳/۷	۰/۱۲۷	-۱۱۷/۶۳۳	۴	۰/۰۰	۶/۹۳۳۰۷	-۸۳۴/۸۰۹۳۰ -۷۹۶/۳۱۰۷
واریانس‌های برابر فرض نشده است			-۱۱۷/۶۳۳	۲/۰۰۶	۰/۰۰	۶/۹۳۳۰۷	-۸۴۵/۳۱۰۵۷ -۷۸۵/۸۰۹۴۳

جدول ۶. آمار توصیفی متغیرهای حداقل غلظت بازدارنده رشد باکتری‌ها، حداقل غلظت کشندگی باکتری‌ها و هاله عدم رشد

متغیر	گروه	میانگین	انحراف استاندارد	میانگین
MIC	<i>E. coli</i>	۱۰/۴۱۶۷	۳/۶۰۸۴۴	۳
	<i>S. aureus</i>	۸/۳۳۳۳	۳/۶۰۸۴۴	۳
MBC	<i>E. coli</i>	۲۰/۸۳۳۳	۷/۲۱۶۸۸	۳
	<i>S. aureus</i>	۱۲/۵	۰/۰۰۰۰۰	۳
هاله عدم رشد	<i>E. coli</i>	۸/۳۳۳۳	۰/۵۷۷۳۵	۳
	<i>S. aureus</i>	۱۰/۶۶۶۷	۰/۵۷۷۳۵	۳

لذا طبق جدول ۹ مقدار شاخص t با توجه به برقراری فرض همسانی واریانس، جهت بررسی مقایسه ای میانگین MIC در دو گروه *E.coli* و *S.aureus* در حالت برابری واریانس برای این آزمون، برابر 0.707 است که در سطح ۵ درصد معنادار نمی باشد ($sig > 0.05$). بنابراین، گروه اثر معناداری بر MIC ندارد و تفاوت میانگین MIC در بین *S.aureus* و *E.coli* معنادار نمی باشد و براساس نتایج جدول ۹ میانگین متغیر MBC در *E.coli* بیشتر از *S.aureus* می باشد.

مطابق نتایج جدول ۱۰، مقدار U آزمون یو من ویتنی برای مقایسه میانگین MBC در گروه های مورد مطالعه برابر $1/5$ است که در سطح ۵ درصد معنادار نمی باشد ($sig > 0.05$); لذا گروه اثر معناداری بر MIC ندارد و تفاوت میانگین MBC بین *E.coli* و *S.aureus* معنادار نمی باشد. همچنین همانطور که اشاره شد، متغیر هاله عدم رشد دارای توزیع نرمال می باشد.

مطابق نتایج جدول ۱۱، مقدار آماره F برای آزمون لون برای

جدول ۷. آمار استنباطی حداقل غلظت بازدارنده، حداقل غلظت کشندگی و هاله عدم رشد آزمون کولموگروف اسمیرنوف

متغیر	مقدار شاخص آزمون	درجه آزادی	سطح معناداری سیگما
MBC	۰/۴۰۷	۶	۰/۰۰۲
MIC	۰/۳۱۹	۶	۰/۰۵۶
هاله عدم رشد	۰/۱۹۵	۶	۰/۲

جدول ۸. نتایج آزمون t مستقل برای مقایسه میانگین متغیر MIC

	نتایج آزمون لون		نتایج آزمون t برای مقایسه میانگین					فاصله اطمینان ۹۵٪	
	F	سیگما	t	درجه آزادی	سیگما (دوطرفه)	تفاوت میانگین	Std. تفاوت خطای	بالا	پایین
واریانس های برابر فرض شده است	۰/۰۰۰	۱	۰/۷۰۷	۴	۰/۵۱۹	۲/۰۸۳۳۳	۲/۹۴۶۲۸	-۶/۰۹۶۸۵	۱۰/۲۶۳۵۱
واریانس های برابر فرض نشده است			۰/۷۰۷	۴	۰/۵۱۹	۲/۰۸۳۳۳	۲/۹۴۶۲۸	-۶/۰۹۶۸۵	۱۰/۲۶۳۵۱

جدول ۹. میانگین و مجموع رتبه های متغیر MBC

گروه	تعداد	میانگین رتبه	مجموع رتبه ها
MBC	<i>E.coli</i>	۳	۴/۵
	<i>S. aureus</i>	۳	۲/۵

جدول ۱۰. نتایج آزمون یو من ویتنی برای مقایسه میانگین متغیر MBC.

شاخص	MBC
Mann-Whitney U	۱/۵
Wilcoxon W	۷/۵
Z	-۱/۵۸۱
Asymp. Sig. (2-tailed)	۰/۱۱۴
Exact Sig. [2*(1-tailed Sig.)]	۰/۲ ^b

متغیر هاله عدم رشد برابر ۰/۰۰۰ است که در سطح ۵ درصد معنادار نمی‌باشد ($\text{sig} > 0.05$). این نتایج بیانگر این است که در سطح ۵ درصد، فرض برابر بودن واریانس بین دو گروه را نمی‌توان رد کرد ($\text{sig} > 0.05$) و واریانس متغیر وابسته دو گروه با یکدیگر تفاوت معنی داری ندارند و شرط برابری واریانس‌ها مورد تایید است. به عبارت دیگر، شرط برابری واریانس‌های بین گروهی رعایت شده و گروه‌ها دارای شباهت (همسانی) می‌باشند. علاوه بر این، جدول ۱۱ نشان می‌دهد که مقدار شاخص t با توجه به برقراری فرض همسانی واریانس، بررسی مقایسه ای میانگین هاله عدم رشد در *S.aureus* و *E.coli* در حالت برابری واریانس برای این آزمون، برابر ۴/۹۵- است که در سطح ۵ درصد معنادار می‌باشد ($\text{sig} < 0.05$). بنابراین، گروه اثر معناداری بر هاله عدم رشد دارد و بین میانگین هاله عدم رشد در دو گروه *S.aureus* و *E.coli* اختلاف معناداری وجود دارد.

طبق نتایج آزمایشات هاله عدم رشد، MIC و MBC در حضور باکتری‌های *S.aureus* و *E.coli* قطر هاله عدم رشد عصاره شقایق در حضور *S.aureus* بزرگتر می‌باشد که این امر نشان می‌دهد عصاره شقایق ممکن است دارای ترکیباتی باشد که به طور خاص برای مهار و از بین بردن باکتری گرم مثبت *S.aureus* مؤثرتر هستند. نتایج بدست آمده با یافته‌های افقیر و همکاران ۲۰۲۴ مطابق دارد [۸]. از سوی دیگر؛ نتایج

نشان می‌دهد، عصاره شقایق در مقابل *S.aureus* کارایی بیشتری دارد، زیرا هم MIC و هم MBC پایین‌تری در مقایسه با *E.coli* دارد. بنابراین قدرت ضد باکتریایی قوی تری دارد. به عبارت دیگر با کاهش میزان کدورت، عصاره شقایق رشد باکتری گرم مثبت *S.aureus* را نسبت به باکتری گرم منفی *E.coli* به مراتب بیشتر مهار کرده است. به همین علت مقادیر MIC باکتری *S.aureus* کمتر از باکتری *E.coli* می‌باشد. یافته‌های آزمون MIC عصاره شقایق با نتایج پژوهش افقیر و همکاران در سال ۲۰۲۴، هممو و همکاران در سال ۲۰۲۳ و چوبان و همکاران در سال ۲۰۱۷ مبنی بر مهار بیشتر *S.aureus* توسط عصاره شقایق مطابقت دارد [۷، ۸، ۱۵]. علاوه بر این با توجه به مقادیر کمتر MBC باکتری *S.aureus* نسبت به *E.coli* می‌توان نتیجه گرفت که عصاره شقایق در از بین بردن باکتری گرم مثبت *S.aureus* نسبت به باکتری گرم منفی *E.coli* موثرتر بوده است. لذا باکتری گرم مثبت کمتری رشد کرده و کمتر مشاهده شده است. یافته‌های آزمون MBC نتایج پژوهش افقیر و همکاران در سال ۲۰۲۴ مبنی بر رشد و مشاهده کمتر *S.aureus* در محیط حاوی عصاره شقایق تایید می‌نماید [۸].

۴- نتیجه گیری

تنوع ترکیبات زیست فعال در عصاره گلبرگ‌های شقایق، که هر کدام دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی متفاوتی می‌باشند؛ نشان‌دهنده اهمیت زیستی یا فیزیولوژیکی آن‌ها در شقایق می‌باشد. قطبیت ترکیبات بر اساس زمان بازداری متفاوت ترکیبات، نشان‌دهنده تفاوت در قطبیت آن‌ها است، که می‌تواند در تعیین خواص حلالیت و واکنش‌پذیری شیمیایی آنها مؤثر باشد. علاوه بر این، ارزیابی‌های کیفیت مرتبط با هر ترکیب نیز در تایید هویت و اطمینان از دقت شناسایی ترکیبات، بسیار تاثیرگذار بوده است. همچنین از نتایج آزمون‌های فعالیت آنتی

جدول ۱۱. نتایج آزمون t مستقل برای مقایسه میانگین متغیر هاله عدم رشد.

نتایج آزمون لون	نتایج آزمون t برای مقایسه میانگین							
	فاصله اطمینان ۹۵٪	تفاوت خطای Std.	تفاوت میانگین	سیگما (دو طرفه)	درجه آزادی	t	سیگما	F
بالا	پایین							
-۱/۰۲۴۵	-۳/۶۴۲۱۶	۰/۴۷۱۴	-۲/۳۳۳۳۳	۰/۰۰۸	۴	-۴/۹۵	۱	۰/۰۰۰
-۱/۰۲۴۵	-۳/۶۴۲۱۶	۰/۴۷۱۴	-۲/۳۳۳۳۳	۰/۰۰۸	۴	-۴/۹۵		

9. K. Sarabandi, Z. Akbarbaglu, S. H. Peighambardoust, A. Ayaseh, S. M. Jafari, Food Chem. 429: p. 136885.(2023).

10. A. Hmamou, E. M. El-Assri, M. El Khomsi, M. Kara, S. Zuhair Alshawwa, O. Al Kamaly, F. E. El oumari, N. Eloutassi, A. Lahkimi, Saudi Pharm. J., 31(8): p. 101686.(2023).

11. K. Gupcsó, Z. Kókai, M. Bálint, S. Tavaszi-Sárosi, É. Z. Németh, Foods. 12(17): p.1-13.(2023).

12. H. J. Jafaar, O. Isbilen, E. Volkan, G. Sariyar, BMC Res. Notes, 14:(1) p. 348.(2021).

13. A. Shaghaghi, A. Alirezalu, E. Nazarianpour, A. Sonboli, S. Nejad-Ebrahimi, Ind. Crops Prod., 142: p. 111870(2019).

14. J. M. H. Velickovic, M. N. Mitic, B. B. Arsic, D. Paunovic, B. T. Stojanovic, J. N. Veljkovic, D. S. Dimitrijevic, S. D. Stevanovic, D. A. Kostic, HPLC Analysis of extracts of fresh petals of *Papaver rhoeas* L. Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Chemia, 2019. 3: p. 239-247.

15. İ. Çoban, G. Gulsoy Toplan, B. Özbek Çelik, Ç. Gürer, G. Sariyar, Variation of alkaloid contents and antimicrobial activities of *Papaver rhoeas* L. growing in Turkey and northern Cyprus. Pharm. Biol., 55(1): p. 1894-1898(2017).

16. D. A. Kostic, S. S. Mitic, M. N. Mitic, A. R. Zarubica, J. M. Velickovic, A. S. Dordevic, S. S. Randelovic, J. Med. Plant Res. 4(17): p. 1727-1732.(2010).

17. A. El Hamdaoui, F. Msanda, H. Boubaker, D. Leach, I. Bombarda, P. Vanloot, N. El Aouad, A. .Abbad, E. H. Boudyach, F. Achemchem, A.

اکسیدانی، حداقل غلظت مهارکنندگی، حداقل غلظت کشندگی و هاله عدم رشد نیز می‌توان استنباط نمود؛ از گلبرگ های شقایق به عنوان گیاه دارویی می‌توان برای توسعه راهکارهای درمانی جدید با توجه به ویژگی های ضد میکروبی و ضدباکتریایی استفاده کرد.

مراجع

1. M. M. A. N. Ranjha, S. Amjad, S. Ashraf, L. Khawar, M. N. Safdar, S. Jabbar, M. Nadeem, S. Mahmood, M. A. Murtaza, Int. J. Fruit Sci., 20(sup3): p. S1201-S1221.(2020).

2. C. Ngernsaengsaruy, N. Leksungnoen, P. Chanton, T. Andriyas, P. Thaweekun, S. Rueansri, R. Tuntianupong, W. Hauyluek, Plants. 12(11): p. 2105.(2023).

3. A. A. Jabbar, F. O. Abdullah, K. K. Abdulrahman, Y. Galali, A. S. Sardar, Research Square., p:1-18. (2022).

4. L.-X. Zheng, X.-Q. Chen, K.-L. Cheong, Int. J. Biol. Macromol., 151: p. 344-354.(2020).

5. Y. Zhao, J. Du, H. Zhou, S. Zhou, Y. Lv, Y. Cheng, Y. Tao, J. Lu, H. Wang, Food Hydrocoll., 129: p. 107665.(2022).

6. A. Pedramnia, A. Sharifi, H. Tavakolipour, Innovation in Food Science and Technology. 2(4):p. 45.(2010).

7. A. Hmamou, M. El Khomsi, E. M. El-Assri, M. Kara, F. El Ouadrhiri, A. Bendaoud, ... , A. Lahkimi, J. Ethnopharmacol., 319, 117208(2024).

8. H. Afqir, S. Belmalha, A. Farihi, A. Elbouzidi, M. Bouhrim, A. Elrherabi, A. Boutagayout, A. Oubihi, M. Ouhssine, Ecol. Eng. Environ. Tech.. 25(2): p.88–101.(2024).

Elmoslih, A. Ait Ben Aoumar, A. El Mousadik,
Biochem. Syst. Ecol.. 76: p. 1-7.(2018).

18. T.-B. Zou, M. Wang, R.-Y. Gan, W.-H. Ling,
Int. J. Mol. Sci.,12(5): p. 3006-3017.(2011).



Extraction and identification of phenolic compounds from papaver petals (*Papaver rhoeas L.*) and determination of their antioxidant and antibacterial activity

Fatemeh Gharahdaghigharahtappeh¹, Seyed Ebrahim Hosseini¹, Gholamhassan Asadi^{1*}, Zhaleh Khoshkhoo²

¹ Department of food science and technology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

² Department of food science and technology, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

Abstract: This study aimed to extract and identify phenolic compounds from papaver petals (*Papaver rhoeas L.*) to evaluate their antioxidant activity, inhibitory, and bactericidal properties. Extraction, identification of bioactive compounds, quantification of active extract components, antioxidant activity, minimum inhibitory concentration (MIC), minimum bactericidal concentration (MBC), and inhibition zone were carried out using solvent extraction with ultrasound assistance, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), DPPH assay, MIC, MBC, and disk diffusion method, respectively. The GC-MS results led to the identification of 18 compounds from the ethanolic extract of papaver petals. Among these, hexadecanoic acid and 9, 12-octadecanoic acid were significantly more abundant than other compounds in the petals. Additionally, other important identified compounds included morphine and derivatives of mefenamic acid. Furthermore, the DPPH assay results indicated that the ethanolic extract of papaver petals has free radical scavenging ability and antioxidant activity. The inhibition zone, MIC, and MBC tests against *E. coli* and *S. aureus* showed that the ethanolic extract of papaver petals was more effective against *S. aureus*. Based on the above findings, it can be concluded that papaver petals possess antioxidant properties and exhibit antimicrobial characteristics.

Keywords: Antioxidant, Antimicrobial, Ultrasound, Chromatography.

نانوپوشش‌ها در خطوط انتقال هوایی برق: هادی، عایق و دکل‌ها

مجید میرزایی*، عباس فیضی نیا، یاسر قربانی

گروه پژوهشی مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

چکیده: خطوط انتقال هوایی روش اصلی انتقال برق هستند. هادی‌ها، عایق‌ها و دکل‌ها تجهیزات الکتریکی اصلی این خطوط به شمار می‌روند. از آنجا که این خطوط در محیط طبیعی فعالیت می‌کنند، مشکلاتی مانند یخ‌زدگی، تخلیه کرونا، رسوب آلودگی و خوردگی به وجود می‌آید. این مشکلات می‌توانند منجر به حوادثی شوند که خسارات اقتصادی زیادی را به همراه دارند. برای حل این مشکلات، می‌توان از پوشش‌های عملکردی با ویژگی‌های فوق‌آبگریز، نیمه‌هادی، ضدخوردگی و سایر ویژگی‌ها بر روی تجهیزات الکتریکی استفاده کرد که دارای مزایای هزینه پایین و کارایی بالا هستند. به همین علت، پوشش‌های عملکردی در سال‌های اخیر به یکی از موضوعات پرطرفدار تحقیقات در حوزه عایق‌کاری خارجی تبدیل شده‌اند. با در نظر گرفتن چالش‌های متعدد مرتبط با تجهیزات الکتریکی در خطوط انتقال هوایی، ضرورت بهره‌گیری از رویکردهای متفاوت احساس می‌شود. این مقاله مروری، پوشش‌های عملکردی را بر اساس زمینه‌های کاربرد و عملکرد آن‌ها دسته‌بندی می‌کند. در هر بخش، ابتدا علل مشکلات تجهیزات الکتریکی به طور مختصر بررسی می‌شود، سپس مکانیزم عملکرد این نوع پوشش‌ها برای رفع مشکلات توضیح داده می‌شود. در ادامه، وضعیت توسعه و کاربرد این پوشش‌ها به صورت خلاصه ارائه شده و محدودیت‌های آن‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در پایان، مسائل کلیدی مرتبط با تحقیق در زمینه پوشش‌های عملکردی مرور خواهند شد و مسیرهای تحقیقاتی آینده مورد بحث قرار می‌گیرند.

واژگان کلیدی: پوشش عملکردی، فوق‌آبگریز، ضد یخ‌زدگی، ضد کرونا، ضد تخلیه آلودگی، ضد خوردگی، خطوط انتقال هوایی.

mjmirzaei@nri.ac.ir

بر عهده دارند، عایق‌ها پشتیبانی مکانیکی و عایق‌بندی الکتریکی را فراهم می‌کنند، و دکل‌ها به حمایت از خطوط، عایق‌ها و تجهیزات دیگر اختصاص دارند. نظر به این که خطوط انتقال هوایی در معرض شرایط طبیعی قرار دارند، لازم است توانایی مقابله با عوامل همچون باد، نور خورشید، باران، برف، یخ و آلودگی را داشته باشند. مشکلاتی نظیر یخ‌زدگی و کرونا در هادی‌ها، خوردگی هادی، آلودگی و یخ‌زدگی عایق‌ها و همچنین خوردگی دکل‌ها می‌توانند عملکرد خطوط انتقال را به شدت مختل کنند. این نواقص ممکن است منجر به شکست هادی‌ها، فروپاشی دکل‌ها، آسیب به پایه‌های آن‌ها و قطع گسترده برق

۱- مقدمه

خطوط انتقال هوایی از مزایای منحصر به فرد و غیرقابل جایگزینی برخوردار هستند [۱]. این مزایا شامل دامنه وسیع ولتاژهای قابل استفاده، هزینه ساخت پایین و سهولت در نگهداری می‌باشند. به همین دلایل، این خطوط به یکی از روش‌های اصلی در انتقال برق تبدیل شده‌اند. در خطوط انتقال برق، هادی‌ها، عایق‌ها و دکل‌ها از اجزای اصلی تجهیزات الکتریکی محسوب می‌شوند. هادی‌ها وظیفه انتقال جریان برق را

شوند که در نهایت باعث خسارات اقتصادی قابل توجهی خواهد شد [۲]. به عنوان نمونه، در ژانویه سال ۲۰۰۸، یک بحران ناشی از باران، برف و یخبندان در جنوب چین رخ داد که باعث شد خطوط انتقال هوایی به شدت با یخ پوشانده شوند. این اتفاق به سقوط ۱۳۲۵ دکل با ولتاژ ۲۲۰ کیلوولت و بالاتر و همچنین آسیب دیدن ۲۱۲۹ هادی منجر شد [۳] و خسارات اقتصادی مستقیم بیش از ۳/۵ میلیارد دلار بود [۴]. در فوریه ۲۰۲۱، طوفان زمستانی شدیدی ایالات متحده را درنوردید که منجر به یخزدگی گسترده در شبکه برق تگزاس و قطع برق برای بیش از ۴/۵ میلیون نفر شد. این رویداد اهمیت ویژه‌ای به رفع مشکلات در خطوط انتقال هوایی بخشید، چرا که پایداری این خطوط و کاهش زیان‌های اقتصادی وابسته به آن است. استفاده از پوشش‌ها برای بهبود عملکرد و افزایش پایداری تجهیزات الکتریکی در خطوط انتقال هوایی سابقه طولانی دارد. برای مثال، در سال ۱۹۲۷ در ایالات متحده، از وازلین برای اولین بار بر روی اتصالات هادی به منظور جلوگیری از خوردگی استفاده شد [۵]. از دهه ۱۹۷۰، پوشش‌های ضد تخلیه آلودگی RTV به طور گسترده برای بهبود عملکرد تخلیه آلودگی در عایق‌های شیشه‌ای و سرامیکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۶]. با پیشرفت‌های حاصل در علم مواد آلی و نانوفناوری، تولید پوشش‌های عملکردی با کارایی بالا به طور چشمگیری افزایش یافته است. این پوشش‌ها شامل ویژگی‌هایی نظیر فوق آبریزی، خودتمیزشوندگی، نیمه‌هادی و ضدخوردگی هستند. نمونه‌هایی از پوشش‌های عملکردی شناخته شده در جدول ۱ ارائه شده است.

این ویژگی‌ها نشانگر آن است که پوشش‌های عملکردی، قابلیت‌هایی منحصر به فرد مانند صرفه اقتصادی، بازدهی بالا، مصرف انرژی کمتر و وزن پایین را ارائه می‌دهند. از این رو، انتظار می‌رود که این پوشش‌ها به یک گزینه برتر در حل مشکلات خطوط انتقال تبدیل شوند. با این حال، تاکنون تنها تعداد محدودی از این پوشش‌ها به مرحله تجاری‌سازی رسیده‌اند. علت اصلی این محدودیت‌ها به مشکلاتی بازمی‌گردد که هنوز در پوشش‌های عملکردی فعلی وجود دارند؛ مسائلی شامل هزینه بالای تولید، ضعف در مقاومت سایشی و عمر مفید کوتاه که به طور جدی بر قابلیت اطمینان و کاربردی بودن آن‌ها تأثیر می‌گذارد و مانع از گسترش استفاده این فناوری شده است.

تحقیقات اخیر تلاش دارند تا این مشکلات را حل کرده و تمرکز خود را بر بهینه‌سازی روش‌های تولید پوشش و افزایش دوام آن قرار داده‌اند. این بررسی همچنین به طور مختصر عوامل اصلی مشکلات تجهیزات الکتریکی در خطوط انتقال، مکانیزم عملکرد پوشش‌های عملکردی، روش‌های تولید آن‌ها و محدودیت‌های مربوطه را تحلیل کرده و آن‌ها را در جدول ۱ دسته‌بندی می‌کند. علاوه بر این، مسائل کلیدی مرتبط با تحقیقات در حوزه پوشش‌های عملکردی برای خطوط انتقال خلاصه شده و مسیرهای احتمالی پژوهش‌های آینده نیز معرفی شده‌اند.

جدول ۱. پوشش‌های عملکردی برای خطوط انتقال هوایی.

پوشش‌های عملکردی	مشکلات	تجهیزات الکتریکی
پوشش‌های ابرآبریز		
پوشش الکترومکانیکی	یخ‌زدگی هادی	
پوشش‌های فوتوترمال		هادی
پوشش‌های TiO_2	کرونا هادی	
پوشش‌های ابرآبریز		
گریس‌های ضدخوردگی	خوردگی هادی	
پوشش‌های ابرآبریز		
پوشش‌های غیرخطی	آلودگی عایق	
پوشش‌های TiO_2		عایق
پوشش‌های نیمه‌رسانا		
پوشش‌های ابرآبریز	یخ‌زدگی عایق	
پوشش‌هایی با مواد تغییر فاز		
پوشش‌های ضدخوردگی	خوردگی دکل	دکل

۲- پوشش‌های هادی‌ها

۲-۱- پوشش‌هایی برای جلوگیری از یخ‌زدگی هادی‌ها

در شرایط جوی مناسب، امکان تشکیل یخ بر روی خطوط هوایی، شامل هادی‌ها و خطوط زمین، وجود دارد. وزن یخ تجمع‌یافته بر این خطوط به طور معمول حدود ۳۲۵ کیلوگرم بر متر است و در شرایط دشوارتر حتی بیش از این مقدار می‌شود. این وضعیت می‌تواند به افزایش بارهای مکانیکی وارد بر خطوط انتقال منجر شود. علاوه بر این، یخ‌زدگی با تغییر ویژگی‌های آیرودینامیکی

خطوط، آنها را در برابر نوسانات ناشی از باد آسیب‌پذیرتر می‌کند. این امر ممکن است در دوره یخ‌زدایی سبب حرکات ناگهانی خطوط شده و حتی به وقوع حوادث جدی نظیر قطعی گسترده برق، سقوط دکل‌ها یا تخریب خطوط انتقال منجر شود. از این رو، رفع چالش یخ‌زدگی برای عملکرد پایدار و مطمئن خطوط انتقال هوایی و کاهش زیان‌های اقتصادی اهمیتی ویژه دارد. روش‌های موجود برای مقابله با یخ‌زدگی در خطوط هوایی عمدتاً در دو دسته ضد یخ‌زدگی و یخ‌زدایی قرار می‌گیرند. استفاده از پوشش‌های ویژه مانند پوشش‌های فوق آبگریز، الکتروترمال و فوتوترمال برای پیشگیری از یخ‌زدگی هادی‌ها مزایایی نظیر مصرف انرژی پایین، وزن سبک و کارایی بالاتر نسبت به سایر فناوری‌های موجود را ارائه می‌دهد. این فناوری‌ها پتانسیل قابل توجهی برای کاربردهای گسترده‌تر دارند [۷].

۲-۱-۱- پوشش‌های فوق آبگریز

سطوح فوق آبگریز (SHS) با زاویه تماس استاتیک (SCA) بیش از ۱۵۰ درجه و زاویه لغزش کمتر از ۱۰ درجه مشخص می‌شوند. سه عامل اصلی مکانیزم ضد یخ‌زدگی این سطوح را توضیح می‌دهند: نخست، زاویه لغزش پایین این سطوح به قطرات آب امکان می‌دهد پیش از یخ زدن، از روی سطح جدا شوند. دوم، قطرات آب روی این سطوح به صورت مدل کاسی-باکستر قرار می‌گیرند، جایی که ساختار زبر سطح به عنوان محفظه‌ای برای به دام انداختن هوا عمل کرده و لایه‌ای عایق حرارتی ایجاد می‌کند. این لایه عایق باعث کاهش تبادل حرارت بین قطرات و سطح شده و فرآیند هسته‌زایی قطرات آب را به تأخیر می‌اندازد [۸].

سومین نکته این است که به واسطه چسبندگی بسیار پایین یخ به سطوح فوق آبگریز (معمولاً کمتر از ۱۰۰ کیلوپاسکال)، یخ می‌تواند به آسانی توسط نیروهای طبیعی از سطح جدا شود [۹]. از آنجا که خطوط هوایی اغلب از هادی‌های آلومینیومی ساخته شده‌اند، در اینجا تمرکز بر تحقیقات انجام‌شده پیرامون زیرلایه‌های آلومینیومی خواهد بود. فرآیند ساخت پوشش‌های فوق آبگریز روی این زیرلایه‌ها را می‌توان به دو روش کلی تقسیم کرد: یک مرحله‌ای و دومرحله‌ای. در روش یک‌مرحله‌ای،

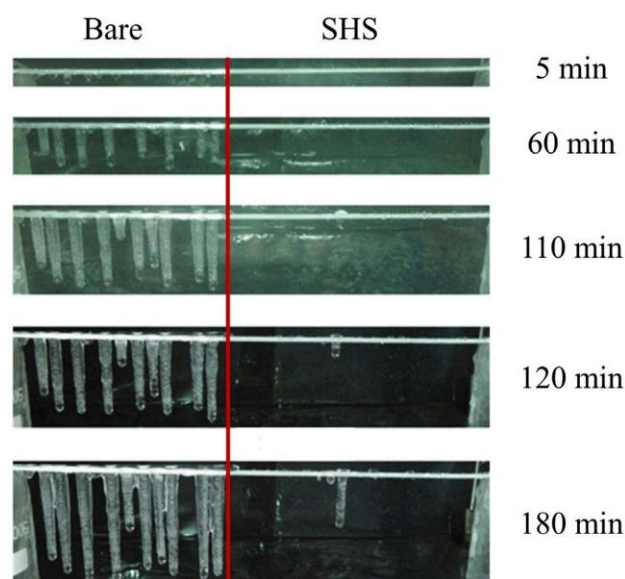
پوشش فوق آبگریز مستقیماً بر زیرلایه آلومینیومی ایجاد می‌شود و از روش‌هایی نظیر غوطه‌وری، اسپری یا روش قطره‌ای بهره می‌گیرد. برای نمونه، یانگ و همکاران موفق به توسعه یک پوشش فوق آبگریز ZnO/PDMS با زاویه تماس معادل ۱۵۹/۵ درجه و زاویه لغزش ۸/۳ درجه شدند. زمانی که سطح در دماهای بین ۵- تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد با زاویه شیب ۱۰ درجه قرار می‌گیرد، قطرات آب به‌طور کامل از سطح فوق آبگریز (SHS) سر می‌خورند، که بیانگر عملکرد فوق‌العاده در جلوگیری از یخ‌زدگی است. حتی پس از ده چرخه یخ‌زدایی/یخ‌زدگی، زاویه تماس همچنان بیش از ۱۵۰ درجه باقی می‌ماند و زاویه لغزش تغییر محسوسی نمی‌کند؛ بنابراین، دوام پوشش بسیار مطلوب بوده و ویژگی خودترمیمی نیز مشاهده شده است. در پژوهشی دیگر، تان و همکاران با استفاده از پلی‌وینیلیدین فلوراید (PVDF) و SiO₂ موفق به تهیه یک پوشش فوق آبگریز با روش غوطه‌وری یک‌مرحله‌ای شدند. در این پوشش، زاویه تماس برابر با ۱۵۹ درجه و زاویه لغزش تنها ۳ درجه بود. این پوشش توانست زمان یخ‌زدگی را تا چهار برابر افزایش داده و چسبندگی یخ به سطح آلومینیوم را ۴۰ درصد کاهش دهد. افزون بر این، پوشش مزبور مقاومت بالایی را در برابر شرایط جوی شدید، مقاومت در برابر خوردگی اسید و قلیایی و مقاومت در برابر دماهای بالا است. در روش دومرحله‌ای، دو مرحله اصلی پردازش و اصلاح سطوح آلومینیومی برای ایجاد ویژگی‌های فوق آبگریز وجود دارد. در مرحله اول، زیرلایه آلومینیومی با استفاده از روش‌هایی مانند حکاکی شیمیایی [۱۰]، اسپری مغناطیسی [۱۱]، آندایز کردن [۱۲]، یا لیزر فمتوثانیه [۱۳] پیش‌پردازش می‌شود تا ساختارهای میکرو-نانو آماده‌سازی شوند. در مرحله دوم، این زیرلایه‌ها با روش‌هایی نظیر غوطه‌وری، رسوب بخار شیمیایی یا رسوب بخار فیزیکی اصلاح می‌شوند تا سطحی با انرژی پایین و ویژگی‌های آبگریز ایجاد شود. برای نمونه، در یک تحقیق [۱۴]، زیرلایه‌های آلومینیومی با ترکیبی از CuCl₂ و HCl حکاکی شیمیایی شدند و سپس با سیلان اصلاح شدند. نتیجه این فرآیند منجر به تولید سطحی با ساختار میکرو-نانو شد که زاویه تماس آن 161.9 ± 0.5 درجه و زاویه لغزش آن 1 ± 0.6 اندازه‌گیری شده است. چنین سطحی توانست در آزمایش ضد یخ‌زدگی پس از ۵۰ دقیقه حدود ۵۳٪ از عملکرد

¹ Superhydrophobic surfaces

فوق‌آبگریز مبتنی بر ZnO بر روی یک ورق آلومینیومی ایجاد کردند. این روش طی ۱۵ دقیقه قادر به تولید ساختاری زبر با ابعاد میکرو-نانو شامل نانوکلاسترهای متراکم بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که تأخیر در یخ‌زدگی قطرات آب بر روی سطح فوق‌آبگریز حدود ۲ ساعت است؛ همچنین در دمای 10°C این تأخیر به تقریباً ۵ ساعت می‌رسد و چسبندگی یخ روی این سطح تنها $4/7 \pm 12$ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد. سطح SHS مبتنی بر ZnO دارای ویژگی‌های برتری در مقاومت در برابر یخ‌زدگی و ضدیخ‌زدگی است. کولینچ و همکاران [۱۷] بیان کردند که پایداری مکانیکی ساختارهای میکرو-نانو بر روی سطوح فوق‌آبگریز بسیار پایین است. با افزایش تعداد چرخه‌های یخ‌زدایی و یخ‌زدگی، این ساختارها به شدت آسیب دیده و منجر به کاهش قابل توجه خواص ضدیخ‌زدگی سطح SHS می‌شوند. بنابراین انجام تحقیقات گسترده‌تر بر استحکام پوشش‌های فوق‌آبگریز ضروری است. لو و همکاران [۱۰] با استفاده از حکاکی شیمیایی و عملیات آب داغ، یک ساختار سلسله‌مراتبی زبر میکرو-نانو را بر روی سطح آلومینیوم ایجاد کرده و آن را با پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) و 1H, 1H, 2H, 2H-هپتادکافلوروسکیل پوشش دادند. خواص SHS تحقق‌یافته شامل زاویه تماس 175° ، زاویه لغزش $1/5^{\circ}$ و چسبندگی یخ برابر با $25/3$ کیلوپاسکال بود. افزون بر این، میزان چسبندگی یخ پس از گذراندن ۱۰۰ چرخه یخ‌زدایی و یخ‌زدگی به $47/2$ کیلوپاسکال افزایش یافت.

سطح ضد یخ‌زدگی بررسی شده نشان‌دهنده دوام بسیار خوبی است که احتمالاً به انعطاف‌پذیری PDMS مربوط می‌شود. در یکی از تحقیقات، سطحی فوق‌آبگریز با خاصیت ضد یخ‌زدگی و دوام بالا، از طریق فرایند آندایز کردن و اصلاح سیلان روی ورق آلومینیومی ایجاد شد. نتایج نشان داد که پس از ۳۰ چرخه یخ‌زدگی و یخ‌زدایی، چسبندگی یخ کمتر از ۷۰ کیلوپاسکال و زاویه تماس آب بالای 150° درجه باقی ماند. کائو و همکاران [۷] نیز پوشش‌های فوق‌آبگریز ضد یخ‌زدگی (پوشش‌های F-SiO_2) را بر روی ورق‌های آلومینیومی و هادی‌ها با روش الگوی دوده و رسوب بخار شیمیایی توسعه دادند. تصاویر SEM مربوطه در شکل‌های ۲الف و ۲ب ارائه شده است. در آزمایش یخ‌زدگی قطرات در دمای 10°C - و رطوبت نسبی حدود ۸۵٪، زمان تأخیر یخ‌زدگی بر روی پوشش فوق‌آبگریز $9/75$ برابر بیشتر از

خود را حفظ کند. در تحقیقی دیگر توسط جین و همکاران، یک سطح فوق‌آبگریز با زاویه تماس 159° درجه و زاویه لغزش 6° درجه تهیه شد. این آزمایش در دمای 25°C - درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۵٪ انجام شد. نتایج نشان داد که وجود سطح زبر فوق‌آبگریز همراه با انرژی سطح پایین باعث کاهش قابل توجه تعداد و اندازه ساختارهای یخی روی هادی‌های پردازش‌شده در مقایسه با هادی‌های آلومینیومی معمولی شده است. در تحقیق دیگری که توسط زو و همکاران انجام شد، یک SHS بر سطح ورق‌های آلومینیومی با استفاده از اسپری مغناطیسی و اصلاح با سیلان ایجاد شد. این سطح شامل یک لایه نانو ساختاری از ZnO و یک لایه مولکولی هگزادسیل‌تری متوکسی سیلان (HDTMS) بود که انرژی سطح پایین آن ویژگی ضد یخ‌زدگی استثنایی‌ای نشان داد (شکل ۱).



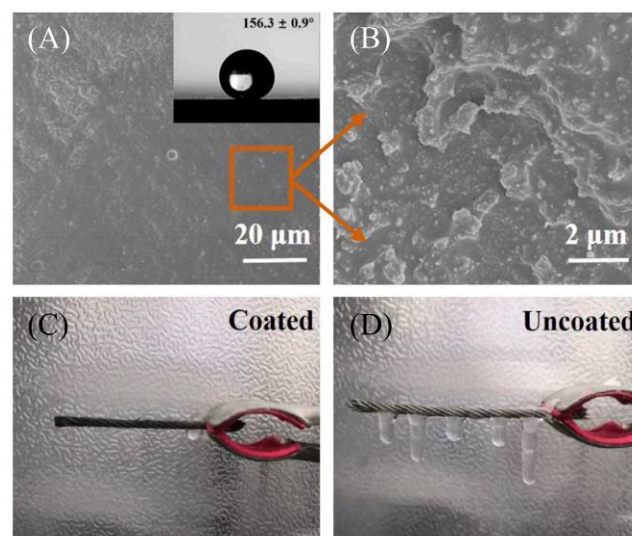
شکل ۱. فرایند یخ‌زدگی بر روی هادی در آزمایش شبیه‌سازی یخ‌زدگی (سمت چپ خط قرمز هادی بدون پوشش و سمت راست هادی فوق‌آبگریز تهیه شده) [۱۵]

در آزمایش یخ‌زدگی شفاف، طی ۶۰ دقیقه، تنها $24/65$ درصد از سطح فوق‌آبگریز (SHS) با یخ پوشیده شد. فنرو و همکاران [۱۶] از طریق حکاکی شیمیایی ورق آلومینیومی با FeCl_3 و اتصال مولکول‌های PTFE به سطح، یک سطح اومنیفوبیک تهیه کردند. در آزمایش یخ‌زدگی در دمای 5°C - و رطوبت نسبی 50 ± 5 درصد، زمان یخ‌زدگی قطرات آب بر روی سطح اومنیفوبیک ۲۰ برابر بیشتر از ورق آلومینیومی فاقد پوشش بود. لیو و همکاران با استفاده از اسپری مغناطیسی، یک سطح

۲-۱-۲-۱- سطوح متخلخل مملو از مایع لغزنده

کیم و همکاران [۱۸] با استفاده از نفوذ فیلم‌های پلی‌پیرول به ضخامت ۳ تا ۴ میکرومتر، سطح SLIPS را بر روی ورق‌های آلومینیومی ایجاد کردند. این فیلم‌ها از طریق رسوب‌گذاری الکتروشیمیایی اکسیداتیو تهیه شده و با یک روان‌کننده پرفلورینه با گرانبوی پایین ترکیب شدند. نتایج نشان داد که در دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد، چسبندگی یخ بر روی این ورق‌های درمان شده تنها به $15/6 \pm 3/6$ کیلوپاسکال رسید. لیو و همکاران [۲۱] لیو و همکاران با به‌کارگیری روش الکترواسپری و جداسازی فازی توانستند یک پوشش سیلیکون رابر میکروساختاری روی صفحات آلومینیومی ایجاد کنند و سپس با تزریق روان‌کننده پرفلورپلی‌اتر، SLIPS با زاویه تماس ظاهری برابر $162/6^\circ \pm 5/8$ و هیستریزس زاویه تماس نزدیک به صفر تولید کنند. در آزمایش‌های چرخه یخ‌زدگی/یخ‌زدایی آن‌ها مشاهده شد که چسبندگی یخ با از دست رفتن روان‌کننده به‌مرور زمان افزایش یافت. لیو و همکاران [۱۱] با استفاده از آندایزکردن نانوپودرهای به قطر ۸۸ نانومتر و عمق ۲۰ میکرومتر روی سطح آلومینیوم تولید کردند. سپس با تزریق روغن سیلیکونی با گرانبوی‌های مختلف، SLIPS ساختند. مقایسه‌ها نشان داد که چسبندگی یخ برای SLIPS تزریق شده با روغن سیلیکونی با ویسکوزیته ۱۰ میلی‌پاسکال ثانیه، تا ۹۹/۳٪ کاهش یافته و به ۲/۷ کیلوپاسکال رسید. همچنین، پس از انجام ۲۱ چرخه یخ‌زدگی/یخ‌زدایی، مشخص شد که SLIPS تزریق شده با روغن سیلیکونی دارای ویسکوزیته ۵۰ میلی‌پاسکال ثانیه دوام بالاتری داشته و چسبندگی یخ، تنها ۱۰٪ از مقدار اولیه ورق‌های آلومینیومی بدون پوشش باقی مانده است. در پروژه‌های دیگر، لیو و همکاران با استفاده از فلوروسیلان (FAS-17) که به درون منافذ تولیدشده توسط آندایز کردن تزریق شده بود، یک SLIPS ضد یخ‌زدگی با قابلیت خودترمیمی ساختند (شکل ۳). این سطح دارای زاویه تماس ظاهری معادل $165/9^\circ \pm 1/7$ و زاویه لغزش $0/6 \pm 0/3^\circ$ بود. در آزمایش یخ‌زدگی شفاف نیز مشخص شد که ورق‌های آلومینیومی SLIPS تا ۸۰ دقیقه در برابر تشکیل یخ مقاوم بودند. پس از آزمایش سایش به میزان ۷/۶۸ متر، زاویه تماس SCA اندکی کاهش یافت و به $156/3^\circ \pm 3/1$ رسید. اما جالب توجه این بود

سطح آلومینیوم بدون پوشش بود. همچنین چسبندگی یخ بر روی این سطح به میزان ۱۴/۸ کیلوپاسکال اندازه‌گیری شد. علاوه بر این، این پوشش پس از ۱۵۰ چرخه یخ‌زدگی و یخ‌زدایی همچنان عملکرد ضد یخ‌زدگی خود را حفظ کرد. در آزمایش یخ‌زدگی شبیه‌سازی شده برای هادی‌ها، هادی‌های پوشش‌دار و بدون پوشش ابتدا به مدت ۳۰ دقیقه در دمای 10°C - نگهداری شدند. سپس با ریختن قطرات آب در دمای 0°C ، زمان شروع یخ‌زدگی بررسی شد. نتایج نشان داد که هادی پوشش‌دار تا ۲۷۰ ثانیه شروع به یخ‌زدن نکرد. این دستاوردها در شکل‌های ۲ج و ۲د ارائه شده‌اند. با این حال، محدودیت‌هایی نظیر دوام پایین، پیچیدگی روش‌های ساخت و هزینه‌های بالا مانع از استفاده گسترده از این پوشش‌ها برای ضد یخ‌زدگی خطوط هوایی بوده است. به‌ویژه، لیو و همکاران [۱۲] دریافتند که یخ می‌تواند تحت تأثیر گشتاور ناشی از افزایش تنش رشته یا نصب دستگاه‌های ضد یخ‌زدگی و همچنین استفاده از یک پوشش هیدروفوبیک ساده (نه لزوماً فوق آبگریز) آزاد شود. این یافته می‌تواند راهنمایی مؤثر برای کاربرد پوشش‌های ضد یخ‌زدگی بر روی هادی‌ها ارائه کند.



شکل ۲. تصاویر SEM از (الف و ب) نمای کلی و نمای بزرگ‌شده جزئی پوشش F-SiO₂ (ج و د) آزمایش عملکرد ضد یخ‌زدگی هادی شبیه‌سازی شده [۷].

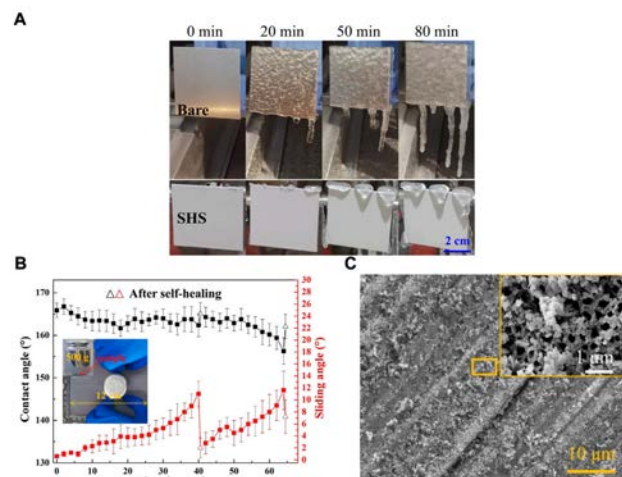
۲-۱-۲- سایر پوشش‌ها

علاوه بر پوشش‌های فوق آبگریز ضد یخ‌زدگی، راهکارهای مبتنی بر سطوح متخلخل با مایع لغزنده (SLIPS) [۱۸, ۱۹]، پوشش‌های فوتوترمال [۱۹] و پوشش‌های الکتروترمال [۲۰] نیز مزایای ویژه و منحصر به فردی را ارائه کرده‌اند.

در جدول ۳ اطلاعات مربوط به طول عمر و مقاومت به ضربه پوشش‌های ضدیخ‌زدگی از نوع فوق آبریز، سطوح متخلخل با مایع لغزنده، فوتوترمال و الکتروترمال در هادی‌های انتقال برق مقایسه شده است.

۲-۲- پوشش‌هایی برای جلوگیری از کرونا در هادی‌ها

برای خطوط انتقال که باید نیازهای توان مراکز بار را تأمین کنند، سطح ولتاژ به تدریج در حال افزایش است. هنگامی که شدت میدان الکتریکی در سطح هادی به حد معینی می‌رسد، محیط هوای اطراف هادی یونیزه شده و پدیده‌ای به نام تخلیه کرونا رخ می‌دهد. این پدیده اثرات منفی مختلفی به همراه دارد، از جمله اتلاف انرژی مرتبط با کرونا، ایجاد تداخل رادیویی، افزایش نویز صوتی، تولید اوزون و موارد دیگر. محاسبه و مدیریت این اتلاف‌ها بخش مهمی از طراحی بهینه خطوط انتقال هوایی محسوب می‌شود و در خطوط انتقال ولتاژ بالا و مسافت طولانی، به‌ویژه در مناطق مرتفع، نقش حیاتی ایفا می‌کند [۳۱]. در شرایط جوی خاص نظیر باران، برف یا مه، قطرات آب بر روی سطح هادی ظاهر می‌شوند. این قطرات تحت تأثیر میدان الکتریکی و نیروی گرانش، تغییر شکل داده و میدان الکتریکی روی سطح هادی را تحریف می‌کنند. این امر موجب کاهش ولتاژ شروع کرونا و افزایش اتلاف‌های مربوط به کرونا می‌شود [۳۲]. همچنین تفاوت‌هایی میان کرونا در مدارهای جریان متناوب (AC) و جریان مستقیم (DC) وجود دارد که ناشی از رفتار حرکتی بارهای فضایی است. حداکثر میزان تداخل رادیویی و نویز صوتی در خطوط AC معمولاً در شرایط جوی نامطلوب مشاهده می‌شود، درحالی‌که این مسائل در خطوط DC اغلب در شرایط جوی مطلوب رخ می‌دهند [۳۳]. علاوه بر این، در خطوط DC، ذرات معلق که بار مخالف دارند به سطح هادی می‌چسبند؛ این مسئله زبری سطح را افزایش داده و ولتاژ شروع کرونا را کاهش می‌دهد. برای مقابله با این مشکلات، همگن کردن یا کاهش شدت میدان الکتریکی روی سطح هادی امری ضروری است. روش‌هایی همچون افزایش قطر هادی، استفاده از هادی‌های دسته‌ای، افزایش فاصله فازها یا ارتفاع دکل می‌تواند به کاهش اتلاف‌های کرونا کمک کند؛ اما این راهکارها هزینه ساخت را به شدت افزایش می‌دهند. اخیراً



شکل ۳. (الف) تصاویر تشکیل یخ بر روی ورق آلومینیوم بدون پوشش و SHS تهیه شده، (ب) زاویه تماس و زاویه لغزش برای آب بر روی SHS پس از چرخه‌های سایش و درمان خودترمیمی، (ج) تصاویر SEM از SHS پس از سایش به مدت ۷/۶۸ متر. تصویر کوچک‌تر بزرگ‌نمایی بیشتری را نشان می‌دهد [۲۲].

که پس از ۳۰ دقیقه خودترمیمی در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد، این مقدار به 161 ± 2 بازگشت. داده‌های مرتبط با فرآیند خودترمیمی در تصاویر SEM ثبت شده و نشان دادند که ساختار منافذ ایجاد شده توسط آندایز کردن همچنان حفظ شده است [۲۲].

۲-۲-۱-۲- پوشش‌های فوتوترمال و الکتروترمال

جیانگ و همکاران [۱۹] با استفاده از روش اسپری، یک پوشش فوتوترمال و فوق آبریز SiC/CNTs با زاویه تماس ۱۶۱ درجه و زاویه لغزش ۲ درجه تهیه کردند. این پوشش تحت تابش نور نزدیک به مادون قرمز (808 نانومتر) توانست دمای سطح را در عرض ۱۰ ثانیه از 30°C به 120°C افزایش دهد، که امکان یخ‌زدایی سریع را فراهم می‌سازد. وانگ و همکاران [۲۰] روشی ترکیبی ضد یخ‌زدگی بر پایه اثر الکتروترمال و خواص فوق آبریز کامپوزیت‌های گرافن ارائه دادند. در این روش، پس از قطع منبع تغذیه DC، تنها مقدار کمی یخ روی سطح تشکیل می‌شود. اما با اعمال ولتاژ ۵۰ ولت، یخ در عرض ۷۰ ثانیه به سرعت از بین می‌رود. لیو و همکاران [۱۲] نیز با استفاده از روش ساده اسپری، پوشش‌های فوتوترمال، الکتروترمال و فوق آبریز ساخته شده از نانولوله‌های کربنی رسانا (ECNTs) و پلی‌اکریلات‌های اصلاح‌شده با فلور را برای یخ‌زدایی در طول روز معرفی کردند. در انتها، جدول ۲ عملکرد تعدادی از پوشش‌های کاربردی که با یخ‌زدایی هادی‌ها مرتبط هستند را مقایسه می‌کند.

جدول ۲. مقایسه عملکرد تحقیقات معمولی درباره پوشش‌های عملکردی یخ‌زدگی هادی‌ها

مرجع	دوام (نتیجه تست‌های یخ‌زدگی/ذوب‌کردن، تست سایش با کاغذ سنباده و غیره)	عملکرد ضد یخ‌زدگی (زمان تأخیر یخ‌زدگی، مساحت یخ‌زدگی، چسبندگی یخ و غیره)	قابلیت رطوبت‌پذیری (زاویه تماس ایستا (SCA) و زاویه لغزش (SA))	نوع پوشش
[۲۳]	پس از ۱۰ آزمایش یخ‌زدگی/ذوب‌کردن، SCA >150°	زمایش یخ‌زدگی در دمای -۱۰°C، زمان تأخیر یخ‌زدگی تقریباً ۱۳۸۰ ثانیه	SCA 159.5° SA 8.3°	پوشش‌های فوق‌هیدروفوبیک یک مرحله‌ای
[۲۴]	پس از ۱۸ آزمایش یخ‌زدگی/ذوب‌کردن، SCA 13.5°, 148°	آزمایش یخ‌زدگی ۶ ساعته، کاهش جرم یخ ۷۱.۴٪	SCA 159° SA 3°	پوشش‌های فوق‌هیدروفوبیک یک مرحله‌ای
[۱۴]	پس از ۵۰۰۰ قطره، ۵۰ میکرولیتر آب، آزمایش قطره آب، SCA 155.7 ± 2.3°	۵۰ دقیقه آزمایش یخ‌زدگی، ۵۳٪ سطح یخ‌زدگی غیرمنجمد	SA ~6.8°, SCA ~161.9°	پوشش‌های فوق‌هیدروفوبیک دو مرحله‌ای
[۲۵]	پس از ۱۰۰ آزمایش یخ‌زدگی/ذوب‌کردن، SCA SA <15°, >162°	آزمایش یخ‌زدگی در دمای -۱۰°C، زمان تأخیر یخ‌زدگی بیشتر از ۲۰۰۰ دقیقه	SA <1.5°, SCA ~171.8°	پوشش‌های فوق‌هیدروفوبیک دو مرحله‌ای
[۲۱]	پس از ۱۰۰ آزمایش یخ‌زدگی/ذوب‌کردن، نرخ حفظ روان‌کننده ~۳۷٪ پس از 12kPa, 7.68 m I, 1,000 cW سایش با کاغذ سنباده، SCA ~11.6°, SCA >156°	آزمایش چسبندگی یخ در دمای ۲۰°C - چسبندگی یخ ~۶۰ kPa	SCA ~162.6°	اسلیپ‌ها
[۲۲]	اما SLIPS‌های آماده می‌توانند خودترمیم شوند تحت تابش NIR دما از ۳۰°C به ۱۲۰°C در عرض ۱۰ ثانیه افزایش یافت	۸۰ دقیقه آزمایش یخ‌زدگی، اکثر سطح غیرمنجمد است	SA ~0.6°, SCA ~165.9°	اسلیپ‌ها
[۱۹]	پس از ۵۰۰g سایش با کاغذ سنباده، SCA SA <10°, >150°	آزمایش چسبندگی یخ در رطوبت ۳۰٪ و دمای ۳۰°C چسبندگی یخ ۲/۶۵ kPa	SA <2°, SCA 161°	پوشش فوتوترمال
[۲۰]		آزمایش یخ‌زدگی در دمای -۵°C، زمان تأخیر یخ‌زدگی ۳۳۵ ثانیه	SA 2°, SCA 167°	پوشش الکتروترمال

جدول ۳. مقایسه طول عمر و مقاومت به ضربه نانوپوشش‌های ضد یخ‌زدگی در هادی‌های انتقال برق

مراجع	مقاومت در برابر ضربه	طول عمر	نوع نانوپوشش
[۲۶]	معمولاً خوب است؛ با این حال، دوام مکانیکی می‌تواند در شرایط ساینده نگران‌کننده باشد	عمر مفید متغیر است؛ دوام به قرارگیری در معرض محیط و سایش مکانیکی بستگی دارد	پوشش‌های فوق‌آبگریز
[۲۷]	مقاومت در برابر ضربه اولیه بالا؛ عملکرد ممکن است با کاهش روان‌کننده کاهش یابد	عمر مفید متغیر است؛ کاهش روان‌کننده در طول زمان می‌تواند اثربخشی را کاهش دهد	سطوح متخلخل مملو از مایع لغزنده (SLIPS)
[۲۸]	مقاومت در برابر ضربه خوب؛ طراحی شده برای جذب نور خورشید و تبدیل آن به گرما، جلوگیری از تشکیل یخ	عمر مفید متغیر است؛ اثربخشی به شرایط محیطی و قرارگیری در معرض نور خورشید بستگی دارد	پوشش‌های فوتوترمال
[۲۷]	مقاومت در برابر ضربه خوب؛ از گرمایش الکتریکی برای جلوگیری از تجمع یخ استفاده می‌کند	عمر مفید متغیر است؛ به دوام اجزای الکتریکی و عوامل محیطی بستگی دارد	پوشش‌های الکتروترمال
[۲۸]	مقاومت در برابر ضربه خوب؛ عملکرد دوگانه ممکن است دوام را بهبود بخشد	عمر مفید متغیر است؛ ترکیب فوق‌هیدروفوبیک با اثرات فوتوترمال برای بهبود ضد یخ‌زدگی	پوشش‌های فوتوترمال فوق‌آبگریز
[۲۹]	مقاومت در برابر ضربه بهبود یافته به دلیل ویژگی خود-روان‌کنندگی	عمر مفید متغیر است؛ طراحی شده برای عملکرد ضد یخ‌زدگی بلندمدت با ویژگی‌های خود-روان‌کننده	پوشش‌های فوتوترمال خود-روان‌کننده
[۳۰]	مقاومت در برابر ضربه بهبود یافته؛ طراحی شده برای تحمل تنش‌های محیطی	عمر مفید متغیر است؛ برای افزایش دوام در جلوگیری از عوامل محیطی مانند کاهش باران طراحی شده است	پوشش‌های فوق‌آبگریز مقاوم

محققان پوشش‌های ضد کرونا را به‌عنوان راه‌حلی مؤثر ارائه داده‌اند که می‌تواند این مشکل را تا حد زیادی برطرف کند. پوشش‌های مورد بررسی [۳۴] شامل پوشش‌های مبتنی بر TiO_2 [۳۵] و پوشش‌های دی‌الکتریک با ویژگی بالا [۳۶] می‌باشند. استفاده از پوشش‌های آبریز و فوق آبریز بر روی هادی‌ها به جلوگیری از چسبیدن قطرات آب کمک می‌کند و تحریف میدان الکتریکی ناشی از این قطرات را کاهش می‌دهد. برای مثال، تحقیق ژو و لی نشان داده است که پوشش یک میله فولادی با ماده RTV باعث کاهش حدود ۶۰ درصدی اتلاف کرونا نسبت به میله معمولی شده است [۳۷]. همچنین، مطالعات دیگری نشان داده‌اند که افزایش ضخامت پوشش RTV روی کابل‌های آلومینیومی تقویت‌شده با فولاد (ACSR)، ولتاژ شروع کرونا در جریان مستقیم را نیز افزایش داده است [۳۸]. در پژوهش دیگری، تیم تحقیقاتی ژانگ با استفاده از یک پوشش فوق آبریز، تعداد قطرات آب روی سطح ACSR را به‌طور قابل توجهی کاهش داده‌اند، که منجر به کاهش نویز صوتی و افزایش ولتاژ شروع کرونا شده است. پوشش‌های مبتنی بر TiO_2 نیز عملکرد منحصر به فردی از خود نشان داده‌اند. این پوشش‌ها علاوه بر دارا بودن خواص فوق‌آب‌دوست القایی برای توزیع یکنواخت قطرات آب، دارای ویژگی‌های فوتوکاتالیستی برای تجزیه آلودگی هستند که زبری سطح را کاهش داده و میدان الکتریکی را یکنواخت‌تر می‌کند. تحقیقی نشان داده است که افزودن نانوذرات TiO_2 به پوشش رزین سیلیکونی-اکریلیک می‌تواند شدت میدان الکتریکی روی سطح هادی را کاهش داده و ولتاژ شروع کرونا را بالا ببرد. همچنین پوشش‌های صاف و متراکم ساخته‌شده از TiO_2 با روش اسپری پلاسما توانسته‌اند تحت تأثیر نور UV چگالی رسوبات نمکی روی سطح را کاهش دهند. نتایج بیانگر آن بود که تابش UV ظرفیت TiO_2 برای افزایش ولتاژ شروع کرونا و کاهش تخلیه کرونا را تقویت کرده است [۳۹].

ژو و همکاران [۳] با استفاده از روش اسپری پلاسما، پوشش‌های صاف و متراکم TiO_2 را بر روی هادی‌ها ایجاد کردند. آزمایش کرونا مثبت DC نشان داده است که تحت تأثیر کاتالیز نور فرابنفش یا حضور میدان الکتریکی DC (معمولاً حدود ۲۰ کیلوولت بر سانتی‌متر)، پوشش TiO_2 مقدار زیادی جفت الکترون-حفره تولید می‌کند، که می‌تواند به تجزیه آلاینده‌ها از

سطح خطوط انتقال DC کمک کند. در شکل ۴ مشخص شده که تابش UV موجب کاهش چگالی رسوب نمکی سطح (Sa) هادی‌های پوشیده‌شده با TiO_2 می‌شود. همچنین، جعبه مستطیلی در شکل ۴ بیانگر آن است که استفاده از این پوشش می‌تواند ولتاژ شروع کرونا را افزایش دهد. پوشش‌هایی با ویژگی دی‌الکتریک و هدایت الکتریکی بالا قادرند میدان الکتریکی روی سطح هادی را کاهش داده و مشکل تخلیه کرونا را بهبود بخشند. پوشش‌های با دی‌الکتریک بالا و هدایت بالا می‌توانند میدان الکتریکی را بر روی سطح هادی کاهش دهند و مشکل تخلیه کرونا را بهبود بخشند (شکل ۵). مگالا [۳۶] پوشش‌های ترکیبی پلی‌ایمید/نانولوله‌های کربنی چند جداره (PI/MWCNT) به ضخامت ۲ میلی‌متر را بر روی ACSR اعمال کرده است. نتایج آزمایش کرونا AC نشان داده که شدت میدان الکتریکی در سطح ACSR پوشیده شده با ۱۰ درصد وزنی MWCNT، نسبت به نمونه‌های بدون پوشش ۲۳٪ کاهش یافته است. همچنین، ولتاژ شروع کرونا AC به میزان ۲۵/۸۷٪ افزایش پیدا کرده، از دست دادن کرونا AC در شدت میدان ۲۵ کیلوولت بر سانتی‌متر، ۲۳/۵۳ درصد کاهش یافته و ولتاژ تداخل رادیویی (RIV) نیز به میزان ۱۸ دسی‌بل کاهش مشاهده شده است. در مجموع، روش‌های متنوعی برای استفاده از پوشش‌های عملکردی جهت حل مشکل کرونا در هادی‌ها پیشنهاد شده است. اما اینکه کدام راهکار بهینه‌ترین نتیجه را ارائه می‌دهد، نیازمند تحقیق بیشتری است. با این حال، تاکنون گزارشی مبنی بر استفاده گسترده از پوشش‌های ضد کرونا منتشر نشده است، زیرا این پوشش‌ها همچنان دارای برخی محدودیت‌هایی هستند که نمی‌توان آنها را نادیده گرفت. برای مثال، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که دوام پوشش‌های فوق آبریز تحت شرایط تخلیه کرونا با مشکلاتی روبه‌رو است. در میان آن‌ها، لیان و همکاران [۴۰] صفحات آلومینیومی را با پوششی فوق آبریز از ترکیب SiO_2 /اسید استتاریک پوشاندند؛ این پوشش زاویه تماس ۱۶۹ درجه و زاویه لغزش تنها ۳ درجه داشت. نمونه‌ها تحت بررسی‌های مختلف شامل پیری حرارتی، پیری ناشی از کرونا، تابش UV و مواجهه با شرایط محیطی قرار گرفتند.

نتایج نشان دادند که دماهای بالا و تخلیه کرونا آسیب جدی به خاصیت فوق آبریز وارد می‌کنند؛ همچنین تابش UV و

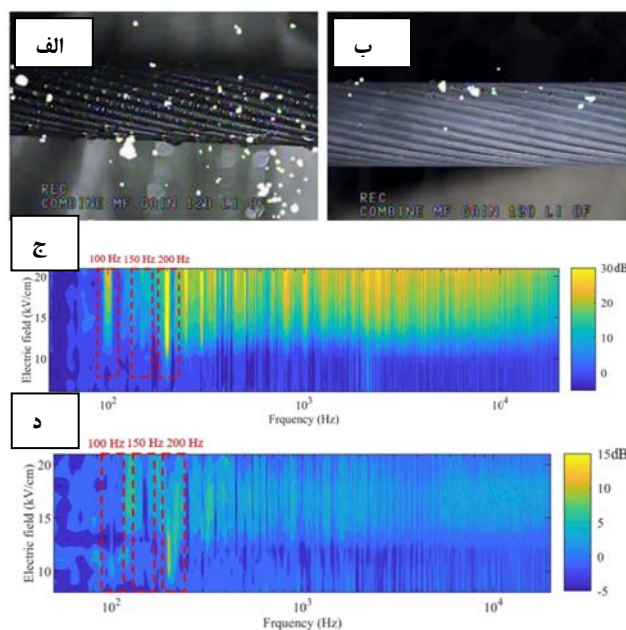
مختلف پوشش‌های نانو تخلیه‌کرونا، عمر مفید معمول آن‌ها، ویژگی‌های مقاومت در برابر ضربه و مراجع مرتبط را خلاصه می‌کند.

جدول ۴. مقایسه طول عمر و مقاومت به ضربه نانوپوشش‌های تخلیه‌کرونا در هادی‌های انتقال برق

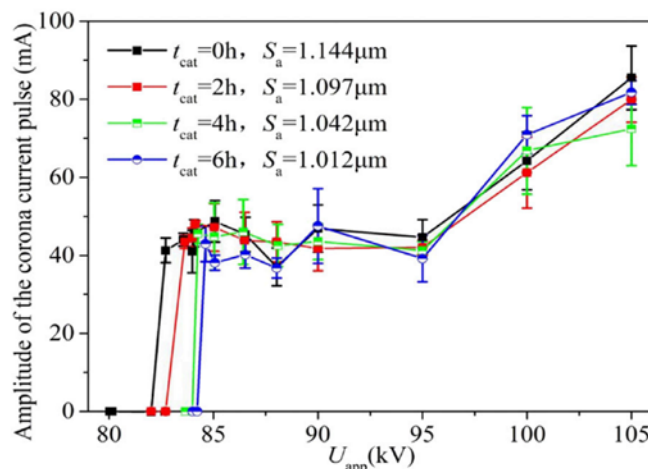
مرجع	مقاومت در برابر ضربه	عمر مفید	نوع نانوپوشش
[۴۲]	خواص مکانیکی بهبود یافته به دلیل تقویت با نانوذرات	عمر مفید متغیر است؛ ترکیبات بهینه شده نشان‌دهنده بهبود در قدرت میدان شکست و مقاومت در برابر کرونا هستند	نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/Si/Ti/B
[۴۳]	محافظت قوی در برابر تخلیه الکتریکی و افزایش دوام مکانیکی	طراحی شده برای حفاظت بلندمدت؛ عمر مفید خاص به شرایط کاربرد بستگی دارد	پوشش‌های ضد کرونا سیلیکون آلکاید
[۴۴]	بهبود استحکام مکانیکی و مقاومت در برابر شرایط سخت	به طور قابل توجهی مقاومت در برابر کرونا را افزایش می‌دهد؛ بهبود عمر مفید به عوامل محیطی بستگی دارد	نانوپوشش‌های مونت موریلونیت بر روی پلی‌ایمید
[۴۵]	خواص مکانیکی بهبود یافته و مقاومت در برابر تنش الکتریکی	عمر مفید با افزایش دوز نانو-SiO ₂ -افزایش می‌یابد؛ مدت زمان خاص متغیر است	فیلم‌های پلی‌ایمید اصلاح شده با نانو-SiO ₂

۲-۳- پوشش‌هایی برای جلوگیری از خوردگی هادی‌ها

هادی‌های آلومینیومی تقویت‌شده با فولاد(ACSR) از جمله رایج‌ترین انواع هادی‌های هوایی محسوب می‌شوند. با این وجود، در شرایط طبیعی سخت، خوردگی قابل توجهی ممکن است رخ دهد که منجر به کاهش چشمگیر عمر مفید این هادی‌ها می‌شود؛ به طوری که در برخی موارد عمر آنها به کمتر از پنج سال می‌رسد[۴۶]. ساختار ACSR، تماس مستقیم بین لایه آلومینیومی و هسته فولادی گالوانیزه رخ داده که این وضعیت باعث می‌شود این هادی‌ها به شدت در معرض خوردگی گالوانیکی قرار گیرند[۴۷]. این نوع خوردگی به عنوان شکل اصلی



شکل ۴. تصاویری که توسط دوربین UV از (الف) هادی‌های بدون پوشش، (ب) هادی‌های پوشش‌دار گرفته شده است. سطوح نویز اندازه‌گیری شده (dB بالاتر از پس‌زمینه) به عنوان تابعی از میدان الکتریکی و فرکانس با اسپری مداوم آب بر روی (ج) هادی‌های بدون پوشش، (د) هادی‌های پوشش‌دار [۴۱].



شکل ۵. دامنه پالس جریان کرونا از نتایج اندازه‌گیری جریان کرونا[۳۵].

قرارگیری در معرض محیط زیست موجب پیر شدن پوشش شده و زاویه لغزش را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد. در نتیجه، دوام پوشش فوق‌آبگریز SiO₂/اسید استتاریک نیاز به تقویت دارد، و اعمال عملی آن در مقیاس وسیع برای خطوط انتقال هوایی با محدودیت‌هایی همراه است.

پوشش‌های نانو ضد کرونا بر روی هادی‌های انتقال برق اعمال می‌شوند تا اثرات تخلیه کرونا را کاهش دهند و در نتیجه عمر مفید و استحکام مکانیکی آن‌ها را افزایش دهند. در جدول ۴ انواع

تخریب در ACSR شناخته شده است. افزون بر این، عوامل مکانیکی نظیر سایش نیز می‌توانند روند خوردگی در ACSR را سرعت بخشند. سایش‌های جزئی ناشی از لرزش‌های ناشی از وزش باد و نوسانات هادی، منجر به تغییر شکل پلاستیک، خوردگی سطحی، ترک خوردگی و در نهایت شکست خستگی می‌شود [۴۸].

برای خطوط انتقالی که در مناطق ساحلی مورد استفاده قرار می‌گیرند، اثرات ترکیبی ناشی از خوردگی به دلیل پاشش نمک و سایش جزئی، می‌تواند به طور قابل توجهی شدت خوردگی کابل‌های ACSR را افزایش دهد. برای مقابله با این موضوع، استراتژی‌های ضد خوردگی مختلفی برای خطوط هوایی مطرح است که شامل ایزولاسیون فیزیکی و جایگزینی مواد هادی می‌شود. ایزولاسیون فیزیکی به کارگیری روش‌هایی مانند استفاده از چربی ضد خوردگی، پوشش‌های RTV بر سطح خارجی خطوط و موارد مشابه را شامل می‌شود. کابل‌های ACSR که با گریس‌های ضد خوردگی پوشش داده شده‌اند، به شکل گسترده‌ای متداول هستند. استاندارد IEC 61394:2011 نیز ضوابط روشنی برای استفاده از گریس‌های ضد خوردگی در خطوط هوایی تعریف کرده است. براساس استاندارد IEC 61089:1991، بسته به میزان پوشش‌دهی گریس در کابل، خطوط به سه دسته تقسیم می‌شوند: خطوط رشته‌ای با ضد خوردگی سبک (گریس فقط بر هسته فولادی اعمال شده)، خطوط رشته‌ای با ضد خوردگی متوسط (گریس بر تمامی قسمت‌ها به جز لایه خارجی اعمال شده) و خطوط رشته‌ای با ضد خوردگی سنگین (گریس بر تمام قسمت‌ها از جمله لایه خارجی اعمال شده است). در خصوص جایگزینی مواد، این راهکار به تغییر جنس مواد هسته یا پوشش هسته سیم اشاره دارد. نمونه‌هایی از این جایگزینی شامل استفاده از کامپوزیت‌های هادی آلومینیوم با هسته کامپوزیتی (ACCC)، کابل‌های ACSR با هسته فولادی پوشش‌دار آلومینیوم (ACSR/AW) و سایر انواع خطوط مقاوم در برابر خوردگی است. در کابل ACCC، از هسته‌ای کامپوزیتی با ترکیب فیبر کربن/اپوکسی یک‌جهته استفاده شده که جایگزین سیم فولادی گالوانیزه در ACSR شده است. به همین دلیل، خوردگی گالوانیکی در کابل ACCC رخ نمی‌دهد، مگر آن که مانع کامپوزیتی الیاف شیشه‌ای آن آسیب جدی ببیند. حتی در صورتی

که چنین آسیبی وارد شود و خوردگی گالوانیکی ایجاد گردد، سرعت این نوع خوردگی در ACCC بسیار کمتر از کابل‌های ACSR خواهد بود [۴۹]. ACCC علاوه بر ویژگی‌های دمای بالای آن و افت کم (HTLS)، دارای هدایت الکتریکی بالا، ظرفیت باربری زیاد و وزن سبک است. با این وجود، این نوع هادی در تحمل بار یخ ضعف دارد و استفاده از آن در مناطقی با احتمال بالای آسیب یخی توصیه نمی‌شود [۵۰]. در مطالعه‌ای توسط لی و همکاران، مقاومت به خوردگی خط فولادی گالوانیزه معمولی با خطوط فولادی پوشش‌دار دارای آلیاژ Zn-5% Al-Re مقایسه شد. نتایج نشان داد که پس از ۱۰۰۰ ساعت قرار گرفتن در معرض شرایط خوردگی پاشش نمک خنثی، لایه گالوانیزه روی خط فولادی تقریباً کاملاً از بین رفت، در حالی که در نمونه‌های پوشش‌دار با آلیاژ Zn-5% Al-Re تنها لایه سطحی دچار خوردگی شد و لایه‌های داخلی نسبتاً دست نخورده باقی ماندند. اگرچه چربی ضد خوردگی در برخی موارد عملکرد مناسبی را از خود نشان داده است، اما مطالعات نیز بیانگر این موضوع هستند که در محیط‌های خاص، مانند خطوط انتقال نزدیک به کارخانه‌هایی که بخارهای اسیدی منتشر می‌کنند، این روش به تنهایی برای جلوگیری از خوردگی کافی نیست. علی‌رغم استفاده از گریس‌های ضد خوردگی، گزارش‌ها درباره توسعه و به‌کارگیری پوشش‌های ضد خوردگی دیگر بسیار محدود است. بنابراین، تمرکز بر توسعه خطوط مقاوم در برابر خوردگی همچنان یکی از اولویت‌های پژوهشی در زمینه هادی‌ها به شمار می‌رود [۵۱].

نانوپوشش‌های ضد خوردگی برای افزایش دوام و تاب‌آوری مکانیکی هادی‌های انتقال برق به کار می‌روند. جدول ۵ انواع مختلف نانوپوشش‌ها، عمر مفید معمول آن‌ها، ویژگی‌های مقاومت در برابر ضربه و مراجع مربوطه را خلاصه می‌کند.

۳- پوشش عایق‌ها

۳-۱- پوشش‌هایی برای جلوگیری از آلودگی عایق‌ها

به دلیل فعالیت‌های انسانی نظیر صنعت، کشاورزی، حمل‌ونقل و تأثیرات محیطی، مقادیر قابل توجهی از آلودگی‌های گازی، مایع و جامد در محیط کریدور خطوط انتقال پراکنده می‌شوند. این آلودگی‌ها می‌توانند روی خطوط انتقال هوایی رسوب کرده و با

جدول ۵. مقایسه طول عمر و مقاومت به ضربه نانوپوشش‌های ضد خوردگی در هادی‌های انتقال برق

نوع نانوپوشش	عمر مفید	مقاومت در برابر ضربه	مرجع
پوشش‌های مبتنی بر گرافن	مشخص نشده است؛ به دلیل خواص قوی گرافن، دوام استثنایی دارد	مقاومت بالا در برابر ضربه به دلیل استحکام مکانیکی برتر گرافن	[۵۲]
پوشش‌های اپوکسی با نانوذرات ZnO	مشخص نشده است؛ حفاظت از خوردگی بهبود یافته مشاهده شده است	خواص مکانیکی بهبود یافته، از جمله افزایش سختی و مقاومت در برابر خراش	[۵۳]
نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر پلیمر رسانا	مشخص نشده است؛ به دلیل خواص بهبود یافته مانع، حفاظت طولانی مدت ارائه می‌دهند	استحکام مکانیکی و انعطاف‌پذیری بهبود یافته، که به مقاومت بهتر در برابر ضربه کمک می‌کند	[۵۴]
نانوپوشش‌های دی‌اکسید سیلیکون (SiO ₂)	مشخص نشده است؛ ثبات و حفاظت بلندمدت را فراهم می‌کند	سختی و مقاومت در برابر سایش بالا، که منجر به مقاومت برتر در برابر ضربه می‌شود	[۵۵]
نانوپوشش‌های دی‌اکسید تیتانیوم (TiO ₂)	مشخص نشده است؛ به دلیل دوام و خواص خود-تمیزکنندگی شناخته شده است	استحکام مکانیکی بهبود یافته و مقاومت در برابر عوامل محیطی	[۵۶]

چسبیدن به سطح عایق‌ها، احتمال وقوع تخلیه الکتریکی را افزایش دهند. چنین تخلیه‌هایی تأثیر منفی بر عملکرد پایدار خطوط انتقال داشته و افت راندمان این خطوط را به دنبال دارد [۵۷]. وقوع مکرر تخلیه آلودگی حتی ممکن است باعث شود خطوط انتقال تحت ولتاژ پایین‌تر از حد استاندارد کار کنند، که به کاهش ظرفیت انتقال می‌انجامد. برای مقابله با این چالش‌ها، استفاده از عایق‌های سرامیکی و شیشه‌ای مجهز به پوشش‌های ضد تخلیه آلودگی مانند سیلیکون ولکانیزه در دمای اتاق (RTV) یا عایق‌های کامپوزیتی مبتنی بر سیلیکون ولکانیزه در دماهای بالا (HTV)، به عنوان رویکردهای مؤثر در بهبود عملکرد این عایق‌ها مطرح شده است. از زمان معرفی تجاری پوشش‌های RTV ضد تخلیه آلودگی از سال ۱۹۷۸، این نوع عایق‌ها به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال، بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که عمر مفید این پوشش‌ها قابل قبول نیست و مشکلاتی مانند چسبندگی ضعیف، کاهش خاصیت آبریزی و مقاومت کم در برابر شرایط جوی، ممکن است

عملکرد ضد تخلیه را به طور قابل توجهی کاهش دهد. از این رو، تمرکز تحقیقات فعلی بر افزایش عمر مفید پوشش‌های موجود و توسعه نسل جدیدی از پوشش‌های ضد تخلیه آلودگی است [۵۸]. فرآیند تخلیه آلودگی در عایق‌های سرامیکی و شیشه‌ای با سطوح آبدوست به این صورت است: لایه آلودگی مرطوب بر سطح عایق قرار می‌گیرد و با عبور جریان ناشی از آن، مناطق خشک کوچک در اثر گرما تشکیل می‌شوند. از آنجاکه رسانایی الکتریکی این مناطق خشک بسیار کمتر از نواحی آلودگی مرطوب است، زمانی که شدت میدان الکتریکی به آستانه مشخصی برسد، قوس الکتریکی محلی ایجاد می‌شود که به تدریج سطح عایق را پوشش داده و تخلیه کامل رخ می‌دهد. در سطوح آبریز عایق‌های پوشش‌دار با RTV یا کامپوزیتی، فرآیند تخلیه متفاوت است. سطح آبریز موجب تشکیل قطرات ریز آب می‌شود که تحت میدان الکتریکی تجمع یافته و به قطرات بزرگ‌تر تبدیل می‌شوند. با این روند و وقوع تخلیه‌های جزئی در انتهای قطرات آب، خاصیت آبریزی بصورت موقتی کاهش یافته و نواحی مرطوب پدیدار می‌شوند؛ در نهایت، این نواحی رشد پیدا کرده و موجب وقوع تخلیه کامل می‌شوند [۵۹]. اگرچه تفاوت‌هایی در فرآیندهای تخلیه بر سطوح آبدوست و آبریز وجود دارد، نتایج پژوهش‌ها حاکی از آن است که با کاهش میزان آلودگی سطح، جلوگیری از مرطوب شدن غیرضروری و همگن‌سازی میدان الکتریکی سطح، می‌توان عملکرد عایق‌های سرامیکی، شیشه‌ای و کامپوزیتی را در برابر تخلیه آلودگی ارتقا داد. همچنین برای مقایسه عملکرد انواع رایج پوشش‌های کاربردی مرتبط با یخ‌زدگی هادی‌ها، اطلاعات مربوط در جدول ۶ ارائه شده است.

۳-۱-۱- پوشش‌های فوق آبریز

پوشش عایق‌ها با مواد فوق آبریز می‌تواند از رطوبت‌گرفتگی سطح جلوگیری کرده و به کاهش تجمع آلودگی کمک کند، در نتیجه عملکرد پاکسازی آلودگی را بهبود می‌بخشد. این ویژگی به پوشش عایق‌ها با مواد فوق آبریز می‌تواند از رطوبت‌گرفتگی سطح جلوگیری کرده و به کاهش تجمع آلودگی کمک کند، در نتیجه عملکرد پاکسازی آلودگی را بهبود می‌بخشد. این ویژگی به دلیل زاویه تماس استاتیک بالاتر از ۱۵۰ درجه و زاویه لغزش کمتر از ۱۰ درجه در سطوح فوق آبریز است که چسبندگی

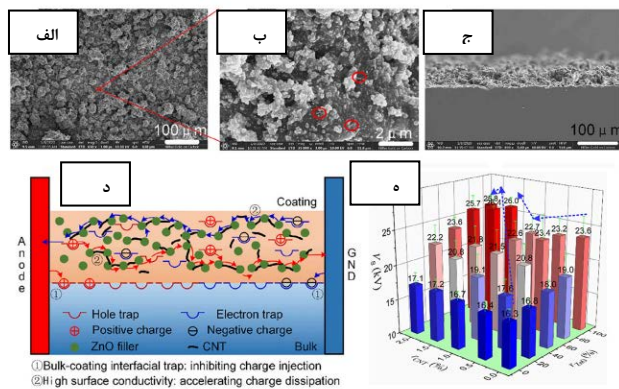
جدول ۶ مقایسه عملکرد تحقیقات معمولی درباره پوشش‌های عملکردی آلودگی عایق‌ها

مرجع	دوام (نتیجه تست سایش کاغذ سنباده، تست صفحه شیب‌دار و غیره)	عملکرد ضد آلودگی در جرقه‌زنی (عملکرد خودتمیزشوندگی، ولتاژ جرقه‌زنی، جریان ناشی و غیره)	آبگریزی (زاویه تماس استاتیک (SCA) و زاویه لغزش (SA))	نوع
[۶۰]	پس از سایش ۲۰۰ گرم، ۵ متر کاغذ سنباده، SCA ~ ۱۵۰°	شن و گرد و غبار به راحتی شسته می‌شوند	SCA > 155°، SA < 5°	پوشش‌های ابرآبگریز
[۶۱]	پس از سایش ۲۰۰ گرم ۸ متر کاغذ سنباده با سرعت ۱۵۰۰ دور در دقیقه، SCA < ۱۴۵°	ولتاژ جرقه‌زنی DC تا ۵۴٪ افزایش یافت	SCA 152	پوشش‌های ابرآبگریز
[۶۲]	-	جریان سطحی عایق پوشش داده شده بسیار کمتر از نمونه بدون پوشش است	SCA ~ 101°	پوشش‌های غیرخطی
[۶۳]	در تست صفحه شیب‌دار ۴٫۵ کیلوولت، پس از ۶ ساعت شکست رخ داد	ذرات NaCl، CuCl ₂ ، SiO ₂ و گرافیت با قطره ۵۰ میکرولیتری آب قابل حذف هستند	SA < 7°، SCA ~ 112° SA < 5°، SCA ~ 71° (برای قطرات روغن)	پوشش‌های لغزنده
[۶۴]	-	ولتاژ جرقه‌زنی AC تا ۱۲٪ افزایش یافته و جریان ناشی ۲۳٪ کاهش یافته است	آب‌دوستی فوق‌العاده القاشده با نور، تحت تابش UV، SCA < 10°	پوشش‌های TiO ₂

کردند که قابلیت خودتمیزکنندگی نیز داشت [۶۷]. وانگ و همکاران نیز لاستیک سیلیکونی با SCA حدود ۱۵۸/۵±۰/۵ درجه و زاویه لغزش ۹/۸±۰/۱ تولید کردند که عملکرد برتری در خودتمیزکنندگی نسبت به نمونه‌های صاف نشان داد [۶۹]. روش اچ شامل روش‌هایی از جمله درمان پلاسما، درمان لیزری و اچ شیمیایی برای ایجاد ساختارهای میکرو-نانو بر روی زیرلایه‌هاست که باعث ایجاد ویژگی فوق آبگریز می‌شود. وازیریناساب با روش درمان پلاسما در فشار اتمسفری، ساختار میکرو-نانو سلسله‌مراتبی بر روی لاستیک سیلیکونی ولکانیزه ایجاد کردند که SCA آن بیش از ۱۶۰ درجه بود و قابلیت خودتمیزکنندگی هم در شرایط مرطوب و هم خشک تأیید شد [۷۰]. پاتیل و همکاران نیز با استفاده از لیزر نانوسکوپی توانستند ساختاری با بیشترین SCA معادل ۱۵۹±۱ درجه ایجاد کنند که ویژگی خودتمیزکنندگی قوی‌ای داشت. استفاده از پوشش‌های فوق آبگریز نسبت به دو روش قبلی ساده‌تر

قطرات آب را کاهش داده و مانع از خیس شدن سطح می‌شود. در حالت زاویه‌دار بودن عایق، قطرات آب به‌طور طبیعی بر روی سطح فوق آبگریز می‌غلطند و در این فرآیند، ذرات آلودگی یا همراه قطرات آب حرکت می‌کنند یا به آن‌ها می‌چسبند و سپس با قطرات از سطح جدا می‌شوند [۶۵]. این فرآیند به عنوان "خودتمیزکنندگی" شناخته می‌شود. بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده توسط قائم و همکاران [۶۶]، سه روش اصلی برای تولید عایق‌های فوق آبگریز عبارتند از: روش قالب‌گیری تکراری [۶۷]، روش اچ [۶۸] و استفاده از پوشش‌های فوق آبگریز [۶۱]. در روش قالب‌گیری تکراری، از پلاستیسیته لاستیک سیلیکونی (سیلیکون رابر) ولکانیزه در دمای بالا و قالب‌هایی با ساختار میکرو-نانو برای ایجاد ولکانیزاسیون تحت فشار و سپس جدا کردن قالب استفاده می‌شود تا ماده‌ای با ویژگی‌های فوق آبگریز شکل بگیرد. برای مثال، مگسودی و همکاران لاستیک سیلیکونی با SCA بیش از ۱۶۰ درجه و هیستریزس زاویه تماس زیر ۳ درجه تولید

پوشش ZnO/MWCNT/PDMS نه تنها خواص فوق آبریزی و قابلیت خودتمیزکنندگی دارد، بلکه همچنین از استحکام تخلیه سطحی بالا تحت شرایط DC، مقاومت در برابر سایش، پایداری در برابر UV و خواص ضدیخ نیز برخوردار است و به عنوان یک پوشش چندمنظوره واقعی محسوب می‌شود. با این وجود، علی‌رغم عملکرد فوق‌العاده پوشش‌های فوق آبریز در شرایط آزمایشگاهی، ضعف در دوام آن‌ها همچنان چالشی جدی برای استفاده عملی و گسترده به شمار می‌رود. نتایج تحقیقات دسانتوس با نظارت دو ساله بر روی رشته‌های عایق شیشه‌ای دارای نانوپوشش‌دار فوق آبریز و رشته‌های عایق شیشه‌ای دارای پوشش RTV در منطقه‌ای به شدت آلوده (مارسی، فرانسه) نشان داد که خاصیت فوق آبریزی نانوپوشش‌ها پس از مدت کوتاهی روند کاهش یافته و به تدریج کاملاً تخریب می‌شود. برعکس، رشته‌های عایق شیشه‌ای دارای پوشش RTV در طول دوره نظارتی با جریان نشتی کمتر و عملکرد ضد آلودگی بهتر نسبت به نانوپوشش‌ها عمل کردند. بنابراین، پوشش RTV در شرایط فعلی گزینه‌ای پایدارتر با قابلیت عملکرد بهتر برای استفاده عملی به نظر می‌رسد. برای تقویت دوام پوشش‌های فوق آبریز، تحقیقات بیشتری نیاز خواهد بود [۷۲].



شکل ۶ تصاویر SEM از پوشش ZnO/MWCNT/PDMS تهیه شده با بزرگ‌نمایی (الف) $\times 650$ و (ب) $\times 35000$ ، دایره قرمز MWCNT است، (ج) تصویر SEM مقطع عرضی از نمونه پوشش‌دار (د) نمودار شماتیک توصیف‌کننده تأثیر تله‌های بین‌سطحی عمیق و هدایت سطحی بهبود یافته بر تجمع بار سطحی (ه) ولتاژهای تخلیه پوشش فیلم با غلظت‌های سیستماتیک متغیر از پرکننده‌های ZnO و MWCNT [۶۱].

۳-۱-۲- سایر پوشش‌ها

علاوه بر پوشش‌های فوق آبریز، انواع دیگری از پوشش‌ها نظیر

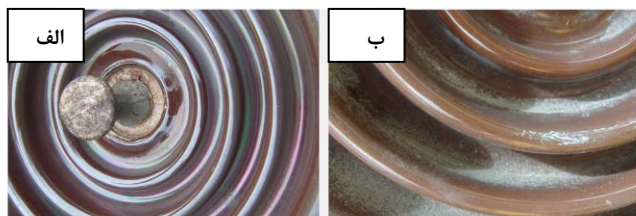
است [۶۸]. برای مثال، پنگ و همکاران یک نوع پوشش $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ اپوکسی با SCA بیش از ۱۵۵ درجه و زاویه لغزش زیر ۵ درجه برای عایق‌های کامپوزیتی تولید کردند که حتی پس از ۵۰ چرخه‌ی سایشی، خاصیت فوق آبریز خود را حفظ کرد. این پوشش همچنین توانایی چشمگیری در کاهش چسبندگی گرد و غبار نشان داده است. در نهایت، برای عایق‌های DC که در سیستم‌های برق با ولتاژ بالای مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرند، مشکل تجمع بار سطحی اهمیت پیدا می‌کند؛ زیرا وجود تنش DC شدید می‌تواند باعث تحریف میدان الکتریکی سطح شده و احتمال تخلیه الکتریکی را افزایش دهد. بنابراین، طراحی پوشش‌های عایقی ضدآلودگی برای این سیستم‌ها باید این چالش را نیز در نظر بگیرد [۷۱]. ژو و همکاران پوشش‌های چندمنظوره ZnO/MWCNT/PDMS را به صورت مستقیم روی عایق‌های کامپوزیتی DC اسپری کردند. تصاویر SEM در شکل‌های الف-ج نشان می‌دهند که این پوشش دارای یک سطح یکنواخت، زبر و متراکم با ساختار میکرو-نانو است و زاویه تماس آب آن ۱۵۲ درجه بوده، که خاصیت فوق آبریزی را به همراه دارد [۶۱]. به‌علاوه، همانطور که در شکل ۶ مشخص است، ژو و همکاران یک مدل فیزیکی برای پوشش چندمنظوره ZnO/MWCNT/PDMS طراحی کردند. با دسترس‌پذیری هدایت غیرخطی ZnO و MWCNT به‌عنوان یک هادی الکتریکی موثر، قادرند کانال‌های رسانا در پوشش ایجاد کنند. تحت میدان الکتریکی DC، این کانال‌ها به تسریع دفع بار سطحی کمک کرده و به افزایش ولتاژ تخلیه منجر می‌شوند. علاوه بر این، حضور نانوپرکننده‌ها تله‌های عمیقی را بین مواد پرکننده و ماتریس شکل می‌دهد که قادر به، به دام انداختن بارهای فضایی هستند و میدان الکتریکی بین‌سطوح را یکنواخت‌تر می‌کنند. نتایج آزمایش تخلیه DC، نمایش داده شده در شکل ۶ه، نشان دادند که ولتاژ تخلیه آلودگی DC با افزودن ZnO و MWCNT به تدریج افزایش پیدا کرده است. در بهترین حالت، ولتاژ تخلیه آلودگی DC عایق پوشش‌دار ۵۴ درصد افزایش یافت. همچنین، آزمون‌های خودتمیزکنندگی ثابت کردند که قطرات آب به سادگی روی سطح فوق آبریز این پوشش با زاویه لغزش حدوداً ۵ درجه غلتیده و آلودگی و ذرات خاک را از بین می‌برند. نتیجه‌گیری کلی نشان داد که

خود را متوقف کرد، اما همچنان مقاومت بالایی در برابر خوردگی الکتریکی نشان داد.

۳-۱-۲-۳- پوشش‌های TiO_2

در بخش دیگری از پژوهش‌ها، ژوانگ و همکاران [۷۳] با استفاده از فناوری سل-ژل، پوشش‌های TiO_2 را بر روی عایق‌های سرامیکی اعمال کردند. آزمایش‌ها در شرایط رسوب آلودگی طبیعی نشان داد که این پوشش‌ها قابلیت خودتمیزکنندگی بهتری در محیط‌های آلوده دارند، چراکه رادیکال‌های آزاد ایجاد شده طی فرآیند فوتوکاتالیستی TiO_2 توانایی تجزیه آلودگی‌های سطحی را دارند. کستانو و همکاران [۶۴] نیز ویژگی‌های الکتریکی و خودتمیزکنندگی این پوشش‌ها را به‌طور دقیق ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که ولتاژ تخلیه AC عایق‌های پوشش‌دار با TiO_2 به میزان ۱۲/۸٪ افزایش یافته و جریان نشتی آن‌ها ۲۳/۸٪ کاهش یافته است. همچنین، این عایق‌ها پس از پنج ماه قرارگیری در محیط بالسیلاس^۲ تمیز باقی ماندند، در حالی که در همان شرایط، جلبک‌ها در قسمت پایین عایق‌های فاقد پوشش رشد کرده بودند (شکل ۷). با این حال، باید توجه داشت اگر آلودگی‌ها عمدتاً شامل ذرات غیرآلی ناشی از فعالیت کارخانه‌های سیمان باشند، اثر خودتمیزکنندگی پوشش TiO_2 چندان بارز نخواهد بود.

قابل ذکر است که مکانیزم خودتمیزشوندگی پوشش TiO_2 با پوشش فوق آبریز در بخش ۳-۱-۱ تفاوت دارد. ابتدا اینکه پوشش TiO_2 از خاصیت فوتوکاتالیستی برخوردار است که توان تجزیه آلودگی‌های آلی چسبیده به سطح عایق را دارد. دوم، پوشش TiO_2 دارای خاصیت فوق آبدوستی القایی است و زاویه



شکل ۷. تصاویر (الف) عایق‌های پوشش‌دار با پوشش TiO_2 و (ب) عایق‌های بدون پوشش TiO_2 که در سرویس در باسیلاس به مدت ۵ ماه آزمایش شده‌اند [۶۴].

پوشش‌های غیرخطی، سطوح متخلخل تزریق شده با مایع لغزنده (SLIPS) و پوشش‌های TiO_2 نیز به منظور بهبود فرآیند تخلیه آلودگی در عایق‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۳-۱-۲-۱- پوشش‌های غیرخطی

در پژوهشی توسط ابراهیم و همکاران [۶۲] از نانوذرات کربن سیاه برای اصلاح خواص I-V پوشش‌های RTV بهره برده شد و در نتیجه، پوشش‌های RTV غیرخطی تولید گردید. نتایج آزمایش‌های تخلیه AC نشان داد که این نوع پوشش‌ها قادرند میدان الکتریکی سطح را به‌طور مؤثری همگن‌سازی کرده و تعداد قوس‌های ناشی از نوار خشک را کاهش دهند. علاوه بر این، استفاده از نانوکربن سیاه باعث ایجاد مسیرهای رسانا در پوشش شده و جریان سطحی را افزایش می‌دهد که این ویژگی به تسریع فرآیند خشک شدن لایه آلودگی مرطوب کمک می‌کند. مقایسه انجام‌شده با عایق‌های شیشه‌ای و سرامیکی فاقد پوشش نشان می‌دهد که عایق‌های دارای پوشش‌های غیرخطی در شرایط مرطوب و آلوده عملکرد تخلیه AC بهتری از خود نشان می‌دهند.

۳-۱-۲-۲- سطوح متخلخل تزریق شده با مایع لغزنده

در پژوهشی که توسط اولاد و همکاران انجام شد [۶۳] سطوحی متخلخل با پوشش مملو از مایعات لغزنده (SLIPS) بر روی زیرلایه‌های سرامیکی تولید گردید. این کار با تزریق یک روان‌کننده پرفلورینه به نام Krytox 103 درون نوار تفلون کشیده‌شده با ۲۰۰٪ کشش محقق شد. نتایج نشان داد که SLIPS ایجاد شده دارای خصوصیات ضدچسبندگی کامل است؛ به طوری که زاویه‌های لغزش برای آب و روغن هر دو کمتر از ۷ درجه و هیستریزس زاویه تماس کمتر از ۵ درجه بود. در بررسی خودتمیزکنندگی، میزان چسبندگی ذرات آلودگی به این سطوح بسیار کم بود. هر دو نوع ذرات آلودگی محلول در آب مانند $CuCl_2$ و $NaCl$ و نامحلول (مانند SiO_2 و گرافیت) به راحتی با غلتیدن قطرات آب از سطح SLIPS جدا شدند. همچنین، در آزمون صفحه مایل تحت تنش الکتریکی ۴/۵ کیلوولت، مشاهده شد که SLIPS پس از شش ساعت عملکرد

² Balsillas

¹ Slippery Liquid-Infused Porous Surface

جدول ۷. مقایسه طول عمر و مقاومت به ضربه نانوپوشش های ضد آلودگی در عایق های شبکه انتقال برق

مرجع	نوع نانوپوشش	عمر مفید	مقاومت در برابر ضربه
[۷۵]	پوشش های فوق آبریز	عمر مفید متغیر است؛ دوام به قرارگیری در معرض محیط و سایش مکانیکی بستگی دارد	معمولاً خوب است؛ با این حال، دوام مکانیکی می تواند در شرایط ساینده نگران کننده باشد
[۶۳]	سطوح متخلخل مملو از مایع لغزنده (SLIPS)	عمر مفید متغیر است؛ کاهش روان کننده در طول زمان می تواند اثربخشی را کاهش دهد	مقاومت در برابر ضربه اولیه بالا؛ عملکرد ممکن است با کاهش روان کننده کاهش یابد
[۷۶]	پوشش های فوق آبریز بازسازی شونده	طراحی شده برای حفاظت بلندمدت؛ عمر مفید خاص به شرایط کاربرد بستگی دارد	محافظت قوی در برابر عوامل محیطی، که دوام مکانیکی را افزایش می دهد
[۷۷]	پوشش های فوق آبریز مقاوم	عمر مفید متغیر است؛ برای افزایش دوام در جلوگیری از عوامل محیطی مانند کاهش باران طراحی شده است؛ عمر مفید متغیر است؛	مقاومت در برابر ضربه بهبود یافته؛ طراحی شده برای تحمل تنش های محیطی
[۷۸]	سطوح لغزنده الهام گرفته از طبیعت	طراحی شده برای عملکرد ضد آلودگی بلندمدت با ویژگی های خود-روان کننده	مقاومت در برابر ضربه بهبود یافته به دلیل ویژگی خود-روان کنندگی
[۷۹]	پوشش های فوق آبریز برای عایق های چینی	عمر مفید متغیر است؛ برای عایق های چینی به منظور ضد آلودگی اعمال می شود	مقاومت در برابر ضربه خوب؛ طراحی شده برای تحمل تنش های محیطی
[۸۰]	سطوح مملو از مایع لغزنده	عمر مفید متغیر است؛ اثربخشی به شرایط محیطی و نگهداری بستگی دارد	مقاومت در برابر ضربه خوب؛ از روان کننده های پیش-مملو برای جلوگیری از آلودگی استفاده می کند

طراحی خاص عایق ها و فشار الکتریکی بالای آن ها، اغلب روش های مرسوم ضد یخ زدگی و یخ زدایی که برای هادی ها مناسب هستند، در اینجا قابل استفاده نیستند. تغییراتی مانند آرایش V شکل عایق ها یا استفاده از ترکیب زیرپوش های بزرگ و کوچک، می توانند تا حدی عملکرد عایق در برابر یخ زدگی را بهبود بخشند. با این حال، این روش ها فقط نقش کاهشی داشته و راه حلی اساسی برای مشکل یخ زدگی محسوب نمی شوند. استفاده

تماس سطح تحت تابش UV به سرعت به کمتر از ۱۰ درجه کاهش می یابد. این ویژگی موجب تشکیل یک لایه آب پیوسته روی سطح عایق پوشش دار می شود، به طوری که قطرات آب به سختی بر روی سطح تجمع می کنند و به سادگی از روی پوشش جاری می شوند. نتیجه این فرآیند کاهش میزان آب جمع شده بر سطح عایق است. علاوه بر این، به دلیل کاهش مقدار آب و افزایش سطح موثر فیلم آبی، در شرایط مشابه، ناحیه خشک به سرعت تشکیل شده و اندازه آن بزرگ تر خواهد بود. این ویژگی به سرکوب وقوع و پیشرفت تخلیه جزئی کمک کرده و به کاهش احتمال تخلیه آلودگی منجر می شود [۷۴]. عملکرد عایق در برابر تخلیه آلودگی با ترکیب اثرات خودتمیزشوندگی فوتوکاتالیستی و خاصیت فوق آبدوستی القایی پوشش های TiO_2 بهبود یافته است. در نهایت، مقایسه عملکرد پوشش های کاربردی مرتبط با آلودگی عایق ها در جدول ۷ ارائه شده است. نانوپوشش های ضد آلودگی برای بهبود عملکرد و طول عمر عایق های انتقال برق ضروری هستند. جدول ۷ انواع مختلف نانوپوشش ها، عمر مفید معمول آن ها، ویژگی های مقاومت در برابر ضربه و مراجع مربوطه را خلاصه می کند.

۳-۲- پوشش هایی برای جلوگیری از یخ زدگی عایق ها

یخ زدگی دو عامل اصلی دارد که عملکرد الکتریکی عایق را تحت تأثیر قرار می دهد. نخست، گرمای حاصل از جریان نشتی (گرمای ژول) که با ذوب یخ و برف در برخی نواحی، سطح عایق را مرطوب و آلوده کرده و منجر به کاهش مقاومت سطحی می شود. دوم، تغییر شکل عایق به دلیل یخ زدگی، به ویژه زمانی که یخ های آویزان روی زیرپوش ها تشکیل می شوند و فاصله خزشی سریع کاهش می یابد. در شرایط ترکیبی آلودگی و یخ زدگی، خطر تخلیه الکتریکی عایق ها به طور قابل توجهی افزایش پیدا می کند. فرزانه و همکاران [۸۱] با کمی سازی شدت یخ زدگی (خفیف، متوسط و شدید)، فرآیند تخلیه الکتریکی ناشی از یخ زدگی را در هر سطح یخ زدگی بررسی کرده اند و این پدیده را با حوادث مشابه در مناطق گوناگون مقایسه نموده اند. این تخلیه بسیار پیچیده بوده و عواملی مانند هدایت الکتریکی آب، شکل عایق، میزان و نحوه توزیع یخ بر روی عایق ها، بیشترین اثر را در این فرآیند دارند. به دلیل

از پوشش‌های عملکردی، مانند پوشش‌های نیمه‌هادی و فوق آبریز (فوق آبریز) روی عایق‌ها، مزایایی منحصر به فرد ارائه می‌دهند و به عنوان راهکاری مؤثر برای مقابله با چالش یخ‌زدگی مطرح شده‌اند.

۳-۲-۱- پوشش‌های نیمه‌هادی

استفاده از پوشش‌های نیمه‌هادی به منظور جلوگیری از یخ‌زدگی، بر کاهش مقاومت سطحی عایق‌ها تمرکز دارد. این روش با اضافه کردن پرکننده‌های رسانا نظیر کربن سیاه، ZnO و الیاف کربن به پوشش‌ها و بهره‌گیری از گرمای ژول ناشی از جریان ناشی برای ذوب یا پیشگیری از تجمع یخ انجام می‌شود. ضخامت پوشش‌های نیمه‌هادی که برای جلوگیری از یخ‌زدگی و کاهش مقاومت سطحی عایق‌ها استفاده می‌شوند، به چندین عامل بستگی دارد. این عوامل شامل نوع پرکننده‌های رسانا، خواص مکانیکی و الکتریکی پوشش، شرایط محیطی (مانند دما و رطوبت) و میزان جریان ناشی مورد انتظار است. اما به طور کلی:

- برای پوشش‌های حاوی پرکننده‌های رسانا مانند کربن سیاه یا ZnO، ضخامت معمولاً در حدود ۱۰۰ تا ۵۰۰ میکرون (۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر) است. این ضخامت برای اطمینان از انتقال مؤثر گرمای ژول کافی است، بدون اینکه منجر به افزایش بیش از حد وزن یا کاهش انعطاف‌پذیری شود.
- در صورتی که از الیاف کربن یا مواد مشابه استفاده شود که به رسانایی بیشتر و توزیع یکنواخت گرما کمک می‌کنند، ضخامت ممکن است کمی بیشتر باشد، مثلاً در حدود ۳۰۰ تا ۸۰۰ میکرون.

ضخامت باید به گونه‌ای باشد که ضمن حفظ خواص رسانایی، به ساختار عایق آسیب نرساند و پوشش دچار ترک‌خوردگی یا جدایش نشود.

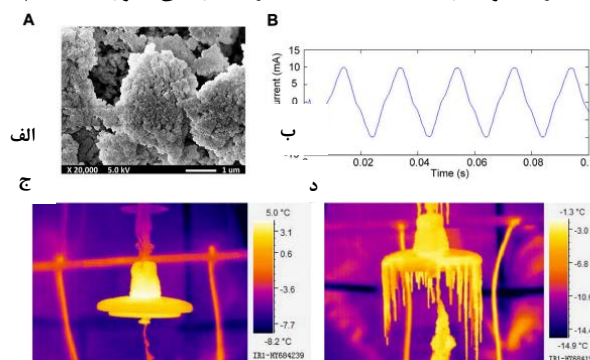
در این راستا، لیا و همکاران پوشش‌های RTV نیمه‌هادی را با استفاده از کربن سیاه بر روی عایق‌های سرامیکی اعمال کرده و تأثیر آن را در کاهش یخ‌زدگی بررسی کردند. نتایج نشان دادند که در مقایسه با عایق‌های معمولی، عایق‌های دارای این پوشش نه تنها از تشکیل یخ معلق جلوگیری می‌کنند، بلکه تجمع یخ را تا

۵۰٪ کاهش داده و ولتاژ تخلیه یخ‌زده را به شکل چشمگیری بهبود می‌بخشند [۸۲]. در مطالعه‌ای دیگر، تأثیر پوشش‌های RTV با هدایت الکتریکی مختلف بر عملکرد ضد یخ‌زدگی تحلیل شد. نتایج حاکی از آن بود که گرمای ناشی از جریان ناشی در مناطق خشک به شکل‌گیری ناپایداری در ریشه یخ کمک کرده و آن را در مقابل اثرات نیروهای طبیعی آسیب‌پذیرتر می‌کند. بر اساس این تحقیق، جریان ناشی عایق XP-70 با پوشش RTV نیمه‌هادی بین ۵ تا ۲۰ میلی‌آمپر بوده و اثر ضد یخ‌زدگی با تغییر هدایت الکتریکی پوشش قابل تنظیم است. افزایش هدایت پوشش، تولید گرمای بیشتر و در نتیجه عملکرد بهتر ضد یخ‌زدگی را سبب می‌شود [۸۳]. وی و همکاران رویکردی متفاوت را اتخاذ کردند و پوشش نیمه‌هادی را تنها در بخش پایینی عایق به کار بردند تا از اتلاف انرژی ناشی از جریان ناشی مداوم جلوگیری شود. این راهکار تنها زمانی مؤثر است که فیلم آب یا لایه یخی اتصال رسانایی روی عایق ایجاد کنند؛ در غیر این صورت اتلاف انرژی اندک است. اما این روش تنها برای لعاب مؤثر بوده و بر یخ نرم تأثیر چندانی ندارد. همچنین، نسبت به هدایت الکتریکی فیلم آب و لایه یخ حساس است [۸۴]. برای بهبود این محدودیت‌ها، وی و همکاران روش پوششی جدیدی ارائه دادند. آزمایش‌ها نشان دادند که مقاومت سطحی پوشش باید کمتر از ۰/۳ مگا اهم باشد و بهترین نواحی برای اعمال پوشش، سطح پایینی عایق و لبه خارجی سطح بالایی با ابعادی در حدود ۵ تا ۸ سانتی‌متر است [۸۴]. یان و همکاران نیز تلاش‌هایی در جهت توسعه خواص ضد یخ‌زدگی داشتند. آن‌ها با استفاده از کربن، نانو سیلیکا و PDMS پوشش‌هایی نیمه‌هادی و فوق آبریز ایجاد کردند. آزمایش‌های انجام‌شده در دمای ۶- درجه سانتی‌گراد و ولتاژ ۱۲ کیلوولت AC نشان دادند که این نوع پوشش جریان ناشی متوسطی معادل ۹/۸ میلی‌آمپر فراهم می‌کند. همچنین، دمای سطح متوسط عایق پوشش‌دار تا ۳ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و میزان یخ به طور قابل توجهی کمتر از عایق‌های بدون پوشش بود (شکل ۸ الف-د) [۸۵].

اگرچه استفاده از پوشش‌های نیمه‌هادی توانسته است بهبود قابل ملاحظه‌ای در افزایش ولتاژ تخلیه یخ‌زده (تا ۵۰٪) به همراه داشته باشد، اما دو چالش اصلی همچنان وجود دارد: یکی میزان بالای اتلاف انرژی ناشی از جریان ناشی و دیگری پیری زودرس

پوشش نانوسیلیکون/فلوروسیلیکون/اپوکسی را با روش اسپری مستقیم بر روی عایق‌های شیشه‌ای ارائه کردند. این پوشش دارای SCA معادل $161/1^\circ$ و زاویه لغزش کمتر از 1° بود و توانست در آزمایش شبیه‌سازی یخ‌زدگی لعابی، ولتاژ تخلیه یخ‌زده AC را نسبت به عایق اصلی تا ۲۷ درصد افزایش دهد. از سوی دیگر امیلیانکو و همکاران [۸۹] با استفاده از درمان لیزری نانوسکوپ برای ایجاد زبری در سطح سیلیکون رابر و سپس استفاده از لایه مولکول‌های فلوروسیلان، یک سطح فوق آبگریز با SCA برابر با 170° ایجاد کردند. این سطح در آزمایش انباشت یخ در محیط باز به طور موثر از تجمع یخ جلوگیری کرد، به خصوص در دمای -17° درجه سانتی‌گراد که کاهش چشمگیری در انباشت برف نسبت به سیلیکون رابر بدون پوشش مشاهده شد (شکل ۹ الف-د). سان و همکاران [۹۰] از روش سل-ژل همراه با تیمار پلاسما برای ایجاد سطح فوق آبگریز روی سیلیکون رابر استفاده کردند. این سطح که دارای SCA برابر با $160/15^\circ$ و زاویه لغزش $1/8^\circ$ بود، زمان یخ‌زدگی قطرات آب را در دمای -30° درجه سانتی‌گراد تا شش برابر بیشتر از نمونه‌های بدون پوشش به تأخیر انداخت. هونگ و همکاران [۹۱] نیز با بهره‌گیری از درمان لیزری فمتوثانیه و اصلاح PDMS، سرامیک‌های آلومینا فوق آبگریزی ایجاد کردند که دارای SCA برابر با $176/39^\circ$ و زاویه لغزش 1° بودند. این پوشش توانست زمان جامد شدن را نسبت به سرامیک‌های بدون پوشش تا ۱۸۹ ثانیه به تأخیر بیندازد. با این وجود، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که فوق‌آبگریزی نقش اساسی داشته اما استفاده از سطوح آبگریز می‌تواند چالش‌هایی نیز ایجاد کند. جیانگ و همکاران [۹۲] بیان کرده‌اند که پوشش‌های RTV تنها در شرایط یخ‌زدگی کوتاه‌مدت عملکرد موثری دارند. در این شرایط، به دلیل ویژگی آبگریزی پوشش RTV، فرآیند تشکیل یخ به تأخیر می‌افتد، اما یخ‌زدگی همچنان رخ می‌دهد و به شکل دانه‌ای با ایجاد حفره‌های ریز در لایه یخی ظاهر می‌شود. در مقابل، در یخ‌زدگی شدید، به علت وجود تعداد زیادی حفره میان سطح پوشش RTV و یخ، احتمال وقوع تخلیه جزئی و ذوب لایه یخ افزایش می‌یابد که این موضوع باعث ایجاد جریان نشتی بالا می‌شود. علاوه بر آن، تخلیه جزئی می‌تواند به ساختار پوشش RTV نیز آسیب وارد کند. به همین دلایل، عایق‌های دارای پوشش RTV در شرایط یخ‌زدگی شدید

پوشش تحت شرایط عملیاتی طولانی‌مدت. اگرچه رویکردهای جزئی برای کاهش اتلاف انرژی مؤثر بوده‌اند، اما مطالعات محدودی درباره دوام و عملکرد طولانی‌مدت این پوشش‌ها صورت گرفته و نیازمند تحقیقات بیشتری در این حوزه هستیم.

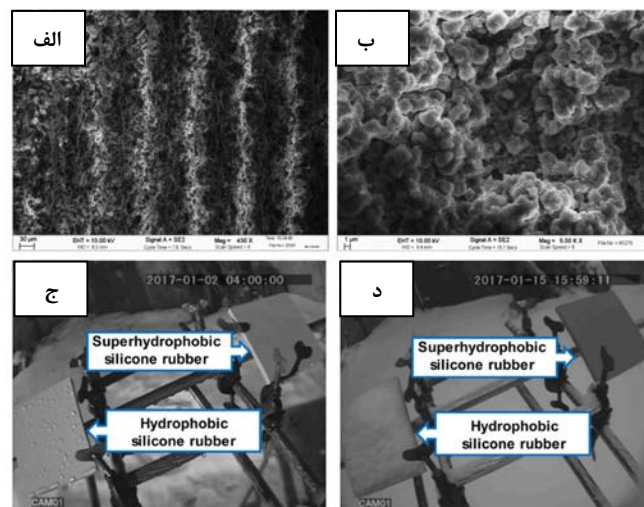


شکل ۸. (الف) تصویر SEM از پوشش کربن/نانو سیلیکا/PDMS (ب) شکل موج‌های جریان نشتی معمولی عایق‌ها با پوشش کربن/نانو سیلیکا/PDMS. تصاویر حرارتی مادون قرمز از عایق‌های آزمایش شده پس از ۱/۵ ساعت یخ‌زدگی برای (ج) عایق با پوشش کربن/نانو سیلیکا/PDMS؛ (د) عایق شیشه‌ای بدون پوشش [۸۵].

۳-۲-۲- پوشش‌های فوق آبگریز

مکانیزم ضد یخ‌زدگی سطوح فوق آبگریز به طور مختصر در بخش ۱-۲-۱ ارائه شده است. در همین راستا، استفاده از پوشش‌های فوق آبگریز برای جلوگیری از یخ‌زدگی روی عایق‌ها نیز مناسب ارزیابی شده است. لی و همکاران [۸۶] از ساختار زیر میکرو-نانو SiO_2 که با روش سل-ژل تهیه شده و توسط فلوروسیلان برای کاهش انرژی سطح اصلاح شده بود، استفاده کردند تا پوشش‌های فوق آبگریزی با SCA معادل $163/6^\circ$ و زاویه لغزش $1/4^\circ$ را بر روی عایق‌های شیشه‌ای اعمال کنند. عملکرد برتر ضد یخ‌زدگی و ضد مه این پوشش‌ها در آزمایشات انباشت برف در فضای باز و بررسی‌های انجام‌شده روی دکل‌ها به وضوح اثبات شد. گو و همکاران [۸۷] نوع دیگری از پوشش فوق آبگریز شامل $SiO_2/CaCO_3$ /فلوروسیلیکون/اپوکسی را با بهره‌گیری از پرکننده نانوذره و روش اچ آب داغ ساختند. این پوشش که دارای SCA برابر با $166/4^\circ$ و زاویه لغزش کمتر از 1° بود، در آزمایش یخ‌زدگی لعابی عملکرد موفقی ارائه داد؛ چراکه قطرات آب روی آن سر خورده و مانع تجمع یخ شدند، به طوری که تجمع یخ نسبت به عایق‌های فاقد پوشش به طور قابل توجهی کاهش یافت. در مطالعه دیگری، زو و همکاران [۸۸]

عملکرد و لنتاژی پایین‌تری در برابر تخلیه یخ‌زده از خود نشان می‌دهند.



شکل ۹. تصاویر SEM از سطح بافت‌دار لیزری سیلیکون رابر در (الف) ۳۰ میکرومتر و (ب) ۱ میکرومتر. رفتار سیلیکون رابر آبگریز و سیلیکون رابر فوق آبگریز در (ج) حین باران و (د) در حین برف [۸۹].

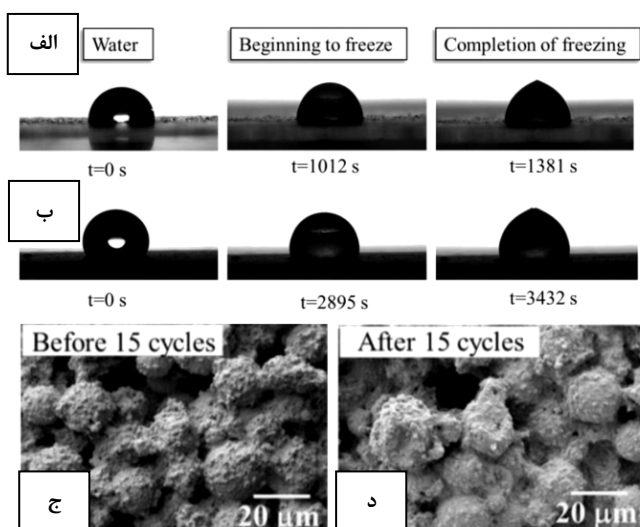
۳-۲-۳- سایر پوشش‌ها

علاوه بر پوشش‌های نیمه‌هادی و فوق آبگریز، پوشش‌های ضد یخ‌زدگی عایق‌ها با استفاده از مواد تغییر فاز و سطوح متخلخل پر شده با مایعات لغزنده [۹۳] نیز توسعه یافته‌اند.

۳-۲-۳-۱- پوشش‌های با مواد تغییر فاز

هو و همکاران [۹۴] پوشش‌های ضد یخ‌زدگی MPCM/RTV را با ترکیب سیلیکون رابر ولکانیزه در دمای محیط (RTV) و میکروکپسول‌های تغییر فاز (MPCM) تولید کردند. در این فرآیند، میکروکپسول‌ها با پوسته‌ای از جنس SiO_2 و هسته‌ای شامل n-تترادکان به‌روش پلیمریزاسیون درجا ساخته شدند، که دمای انجماد $2/3^\circ\text{C}$ و گرمای نهان $130/8 \text{ J/g}$ داشتند. این پوشش در دمای 10°C قادر بود سطح خود را به مدت تقریباً ۶ دقیقه بالای 0°C حفظ کند. یوان و همکاران [۹۵] پوشش‌های ضد یخ‌زدگی دیگری تحت عنوان MPCM/PRTV را ارائه دادند که با اصلاح سیلیکون رابر دائمی (PRTV) و استفاده از میکروکپسول‌های تغییر فاز (MPCM) ساخته شده بود. این میکروکپسول‌ها از رزین MUF به‌عنوان پوسته و n-تترادکان به‌عنوان هسته استفاده کردند. حضور MPCM باعث زبری سطح

پوشش شد و ویژگی فوق آبگریزی با زاویه تماس 164° و زاویه لغزش 6° ایجاد کرد. در آزمایش یخ‌زدگی در دمای 5°C زمان یخ‌زدگی قطرات آب بر روی این پوشش $1/48$ برابر بیشتر از پوشش PRTV بود. تصاویر مقایسه‌ای فرآیند یخ‌زدگی در شکل‌های ۱۰الف و ۱۰ب ارائه شده‌اند. علاوه بر این، چسبندگی یخ بر این پوشش تا حدود ۱۵٪ کاهش یافت و حتی پس از ۱۵ چرخه متوالی یخ‌زدگی/یخ‌زدایی، زاویه تماس سطح آن همچنان بالاتر از 160° باقی ماند. تصاویر SEM نیز (شکل‌های ۱۰ج و ۱۰د) نشان می‌دهند که پوشش بدون ترک‌خوردگی باقی مانده و ساختار MPCM حفظ شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که این پوشش از دوام بالایی برخوردار است.



شکل ۱۰. زمان یخ‌زدگی قطره آب بر روی (الف) پوشش‌های PRTV و (ب) پوشش‌های MPCM/PRTV. تصاویر SEM از پوشش MPCM/PRTV (ج) قبل از ۱۵ چرخه یخ‌زدگی/ذوب و (د) بعد از آن [۹۵].

۳-۲-۳-۲- سطوح متخلخل ترزریق شده با مایع لغزنده

ژو و همکاران [۹۳] پوششی از نوع SLIPS را با ترکیبی از سیلیکون روغنی و پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) بر روی یک عایق شیشه‌ای با زاویه تماس سکون برابر با 115° ایجاد کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که چسبندگی یخ به این پوشش تنها حدود ۵۰ کیلوپاسکال است. همچنین، یخ بر روی این عایق فقط می‌تواند لایه‌ای ناپایدار تشکیل دهد که به راحتی تحت تأثیر نیروهای طبیعی جدا می‌شود.

نانوپوشش‌های ضد یخ‌زدگی برای حفظ قابلیت اطمینان عایق‌های انتقال برق در اقلیم‌های سرد ضروری هستند. جدول ۸

انواع مختلف نانوپوشش‌های ضد یخ‌زدگی، عمر مفید معمول آن‌ها، ویژگی‌های مقاومت در برابر ضربه و مراجع مربوطه را خلاصه می‌کند.

جدول ۸. مقایسه طول عمر و مقاومت به ضربه نانوپوشش‌های ضد یخ‌زدگی در عایق‌های شبکه انتقال برق

نوع نانوپوشش	عمر مفید	مقاومت در برابر ضربه	مراجع
پوشش‌های فوق آبگریز	عمر مفید متغیر است؛ دوام به قرارگیری در معرض محیط و سایش مکانیکی بستگی دارد	معمولاً خوب است؛ با این حال، دوام مکانیکی می‌تواند در شرایط ساینده نگران‌کننده باشد	[۲۶]
پوشش‌های نیمه‌رسانا	عمر مفید متغیر است؛ اثربخشی به شرایط محیطی و خواص مواد بستگی دارد	مقاومت در برابر ضربه خوب؛ طراحی شده برای تحمل تنش‌های محیطی	[۹۱]
پوشش‌های با مواد تغییر فاز	عمر مفید متغیر است؛ طراحی شده برای عملکرد ضد یخ‌زدگی بلندمدت با مواد تغییر فاز	مقاومت در برابر ضربه بهبود یافته به دلیل خواص تغییر فاز	[۹۶]
سطوح متخلخل با مایع لغزنده	عمر مفید متغیر است؛ کاهش روان‌کننده در طول زمان می‌تواند اثربخشی را کاهش دهد	مقاومت در برابر ضربه اولیه بالا؛ عملکرد ممکن است با کاهش روان‌کننده کاهش یابد	[۹۷]
پوشش‌های فوق آبگریز / PDMS / نانوسیلیکای اصلاح شده	عمر مفید متغیر است؛ حفاظت قابل توجهی در برابر آلودگی فراهم می‌کند.	دوام بالا و مقاومت در برابر ضربات مکانیکی	[۹۸]
پوشش‌های فوق آبگریز پلیمری	عمر مفید متغیر است؛ اثربخشی به شرایط محیطی و نگهداری بستگی دارد	مقاومت در برابر ضربه خوب؛ از مواد پلیمری برای جلوگیری از آلودگی استفاده می‌کند	[۹۹]

۴- پوشش دکل‌ها

دکل‌های خطوط انتقال اغلب از فولاد گالوانیزه ساخته می‌شوند. شرایط محیطی نظیر رطوبت، نمک و گازهای اسیدی می‌توانند به سرعت لایه گالوانیزه را تخریب کرده و موجب زنگ‌زدگی و خوردگی شوند. به همین دلیل، استفاده از پوشش‌های ضد خوردگی برای حفاظت این دکل‌ها ضروری است. استاندارد ISO

9223:2012 خوردگی جوی را به شش دسته تقسیم‌بندی کرده است: C1 تا C5 و CX. از این دسته‌ها، محیط‌های C3 شامل جوهای شهری و صنعتی با آلودگی متوسط دی‌اکسید گوگرد و مناطق ساحلی با شوری کم است. دسته C4 محیط‌هایی با آلودگی بیشتر مانند مناطق صنعتی و ساحلی با شوری متوسط را در بر می‌گیرد، در حالی که C5 مناطق صنعتی با جوهای پرتنش و مناطق ساحلی و فراساحلی با شوری و رطوبت بالا را توصیف می‌کند. برای دکل‌هایی که در محیط‌های C3 تا C5 قرار دارند، سیستم پوشش سه‌لایه‌ای شامل پرایمر، میان‌لایه و پوشش نهایی پیشنهاد می‌شود. با وجود لایه فلزی روی سطح دکل، استاندارد ISO 12944-5:2018 توصیه می‌کند از پرایمرهای اپوکسی به جای پرایمرهای الکییدی استفاده شود.

معمولاً پرایمرهای غنی از روی [۱۰۰] و فسفات روی [۱۰۱] کاربرد بیشتری دارند. لایه میانی اپوکسی حاوی اکسید آهن میکا رایج‌ترین انتخاب برای این منظور است [۱۰۲]، در حالی که پوشش‌های نهایی اکریلیک پرکاربردترین گزینه هستند [۱۰۳]. پوشش‌های اپوکسی برای این مرحله مناسب نمی‌باشند. نکته قابل توجه این است که هنگام اجرای پوشش ضد خوردگی، نباید رنگ روی عایق ریخته شود.

تحقیقات وانگ و همکاران نشان داده است که چنانچه پوشش ضد خوردگی حاوی پرایمر اپوکسی غنی از روی، میان‌لایه اکسید آهن میکا اپوکسی و پوشش نهایی اکریلات روی عایق کامپوزیتی ریخته شود، عملکرد الکتریکی آن کاهش می‌یابد. آزمایش‌ها بیانگر کاهش آبگریزی و توانایی بازایی آن در عایق‌های کامپوزیتی هستند. هر چه سطح پوشش گسترده‌تر باشد، ولتاژ تخلیه آلودگی کاهش بیشتری می‌یابد. در سال‌های اخیر، پژوهشگران انواع جدیدی از پوشش‌ها و روش‌های آبکاری ضد خوردگی را توسعه داده‌اند [۱۰۴]. به عنوان نمونه، پاپولا و همکاران حمام آبکاری روی-ایتريا را ایجاد کرده‌اند که افزودن اکسید ایتريوم به فرآیند آبکاری موجب بهبود مقاومت در برابر خوردگی و سایش فولاد گالوانیزه در محلول NaCl می‌شود [۱۰۵]. همچنین، فان و همکاران کپسول‌های رسانای CeO_2 -پلی‌انیلین را تولید کرده‌اند که با پخش در رزین اپوکسی، پوششی ضد خوردگی با مقاومت بالا ارائه می‌دهد. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که این پوشش‌ها دارای مدول امپدانس بیش از ده برابر

جدول ۹. مقایسه طول عمر و مقاومت به ضربه نانوپوشش های ضد خوردگی در دکل های انتقال برق

مراجع	مقاومت در برابر ضربه	عمر مفید	نوع نانوپوشش
[۱۰۸]	مقاومت بالا در برابر ضربه به دلیل پیوندهای شیمیایی قوی در مقیاس نانو	عمر مواد را به طور قابل توجهی با جلوگیری از آسیب های محیطی، خراش ها و خوردگی افزایش می دهند.	نانوپوشش های ضد خوردگی
[۱۰۹]	مقاومت بالا در برابر ضربه به دلیل پیوندهای شیمیایی قوی در مقیاس نانو	دوام و ارزش اقتصادی محصولات را با جلوگیری از آسیب های محیطی و خراش ها افزایش می دهند.	نانوپوشش های مقاوم در برابر خراش و سایش
[۱۱۰]	مقاومت بالا در برابر ضربه به دلیل پیوندهای شیمیایی قوی در مقیاس نانو	عمر مواد را با جلوگیری از آسیب های محیطی و کمرنگ شدن رنگ افزایش می دهند.	نانوپوشش های محافظ UV
[۱۱۱]	مقاومت بالا در برابر ضربه به دلیل پیوندهای شیمیایی قوی در مقیاس نانو	عمر مواد را به طور قابل توجهی با جلوگیری از آسیب های محیطی، خراش ها و خوردگی افزایش می دهند.	نانوپوشش های ضد خوردگی

بالتر از نمونه های معمولی مشابه هستند [۱۰۶]. علاوه بر این، لو و همکاران پوشش های فوق آبریز Zn/PMHS را با استفاده از روش های اصلاح سطح تهیه کرده اند که توانایی حفظ خواص خود در محلول NaCl ۳/۵٪ را دارند و زمان حفاظت کاتدی را افزایش می دهند [۱۰]. همچنین، نایاک و همکاران از نانوکامپوزیت های Pin/f-MWCNT برای تولید پوشش های اپوکسی مقاوم به خوردگی بهره برده اند که قابلیت محافظت عالی در برابر خوردگی را نشان داده اند [۱۰۷]. وانگ و همکاران [۶۹] نیز یک پوشش ضد خوردگی خودترمیمی مبتنی بر CeO_2 -پلی اورتان با استفاده از نور نزدیک مادون قرمز طراحی کرده اند که عملکرد ضد خوردگی خود را بدون افت ویژگی های مکانیکی حفظ می کند. علاوه بر مشکلات خوردگی، دکل ها با مسئله یخ زدگی نیز مواجه هستند. با این وجود، سازوکار پوشش های ضد یخ زدگی برای هادی ها پیشتر بررسی شده و شباهت زیادی به توسعه چین پوشش هایی بر فولاد گالوانیزه دارد؛ بنابراین توضیح مکرر آن ضرورتی ندارد. در جدول ۹ برخی از این پوشش ها و عملکرد دوام و عمر آن ها مورد مقایسه قرار گرفته است.

۵- نتیجه گیری و چشم انداز

این مقاله به بررسی وضعیت کنونی و مکانیسم عملکرد پوشش های کاربردی در خطوط انتقال هوایی می پردازد. پوشش هایی با ویژگی هایی چون آبریزی، خودتمیز شوندگی، خواص فوتوکاتالیستی، نیمه رسانایی و مقاومت در برابر خوردگی، به عنوان راه حل هایی کارآمد برای مشکلاتی مانند یخ زدگی هادی ها، بروز کرونا، خوردگی، آلودگی و یخ زدگی عایق ها و همچنین خوردگی دکل ها شناخته شده اند. این نوع پوشش ها هزینه کم، عملکرد بالا، صرفه جویی در مصرف انرژی و وزن سبک را همزمان ارائه داده و قابلیت استفاده در مقیاس وسیع را دارند. با این حال، چالش های اساسی همچنان پابرجا هستند که نیازمند پژوهش و توسعه بیشترند. سه مسئله اصلی در بررسی پوشش های کاربردی برای خطوط انتقال هوایی به شرح زیر مطرح است:

(۱) ارزیابی قابلیت روش های اعمال پوشش های کاربردی بر تجهیزات الکتریکی: در مراحل اولیه آزمایش پوشش های کاربردی

اغلب از موادی مانند ورق های آلومینیومی، شیشه ای یا سرامیکی برای شبیه سازی تجهیزات الکتریکی استفاده می شود. اما به دلیل پیچیدگی هندسی، مساحت سطح بزرگ و شرایط محیطی خاص تجهیزات واقعی، ضروری است که آزمایش ها به طور مستقیم بر روی هادی ها، عایق ها و دکل های عملیاتی انجام شوند. برای مثال، فرایند اصلاح سطح با استفاده از سیلان برای افزایش خاصیت آبریزی با چالش هایی همچون پیچیدگی روش، زمان بر بودن و هزینه بالا مواجه است. این پرسش وجود دارد که آیا این روش ها برای هزاران کیلومتر کابل ACSR قابل اجرا هستند یا خیر. همین طور، در مورد عایق های شیشه ای واقعی که ساختار سطحی متفاوتی نسبت به ورق های شیشه ای صاف دارند، نیاز به آزمون هایی برای اطمینان از یکنواختی پوشش وجود دارد.

(۲) تقویت پژوهش در زمینه دوام پوشش ها: دوام یک عنصر کلیدی برای تعیین قابلیت استفاده گسترده از یک پوشش است.

- روش اعمال پوشش: کیفیت و یکنواختی پوشش اعمال شده در محیط آزمایشگاهی ممکن است بالاتر از محیط صنعتی باشد، زیرا در آزمایشگاه کنترل دقیق تری وجود دارد.
 - نوع آزمایش‌ها: تست‌های تسریع شده (مانند آزمایش مقاومت به خوردگی با اسپری نمک یا تست UV) نمی‌توانند به طور کامل شرایط واقعی و طولانی مدت را شبیه‌سازی کنند.
 - اثرات ناشی از زمان: در آزمایش‌ها، نتایج در بازه زمانی کوتاه‌تر پیش‌بینی می‌شود، اما در عمل، فرآیندهایی مانند خستگی مکانیکی یا تخریب شیمیایی ممکن است طولانی مدت اثرگذار باشند.
- ۵) محدوده قابل انتظار اختلاف نتایج آزمایشگاهی و عملی نیز در پارامترهای زیر خلاصه می‌شود:
- طول عمر: اختلاف بین پیش‌بینی طول عمر آزمایشگاهی و عملی معمولاً بین ۱۰ تا ۳۰ درصد است. در موارد خاص، این اختلاف می‌تواند به دلیل شرایط پیش‌بینی نشده محیطی تا ۵۰ درصد نیز برسد.
 - مقاومت مکانیکی و ضربه: مقاومت در برابر ضربه در محیط واقعی ممکن است تا ۱۵ تا ۲۵ درصد کمتر از نتایج آزمایشگاهی باشد، به ویژه اگر شرایط واقعی شامل ضربه‌های مکرر یا شدیدتر باشد.
 - مقاومت شیمیایی و خوردگی: عملکرد پوشش‌ها در برابر خوردگی می‌تواند بین ۱۰ تا ۲۰ درصد در محیط واقعی کمتر باشد، به ویژه در مناطق با آلودگی بالا یا تماس مداوم با مواد خورنده

مراجع

1. B. Li, Y. Li, J. He, Y. Zheng, *Protection technologies of Ultra-High-Voltage AC transmission systems*. Academic Press, 2020.
2. M. Farzaneh, F. Jakl, *Coatings for Protecting Overhead Power Network Equipment in Winter Conditions: Working Group B.44, 2*. Cigré, 2015.

محیط عملیاتی خطوط انتقال هوایی ترکیبی از چالش‌های متعددی مانند یخ‌زدگی، یخ‌زدایی، تابش UV، خوردگی ناشی از اسپری نمک، تخلیه کرونا و اصطکاک مکانیکی است. خواص فوق‌ابگریزی پوشش‌ها به شدت به ساختار میکرو-نانو و ویژگی‌های شیمیایی سطح وابسته است. با این وجود، این ویژگی‌ها بر اثر عواملی مانند سایش مکانیکی و تخلیه کرونا ممکن است کاهش یابد یا حتی به طور غیرقابل بازگشتی آسیب ببیند. بنابراین، طراحی پوشش‌ها باید بر افزایش دوام آنها متمرکز باشد و لازم است نظارت بلندمدت بر عملکرد آنها در شرایط عملیاتی واقعی صورت گیرد.

۳) تأکید بر توسعه پوشش‌های ترکیبی: خطوط انتقال هوایی با مجموعه‌ای از مشکلات پیچیده مواجه‌اند؛ نظیر یخ‌زدگی و تخلیه کرونا که ممکن است همزمان رخ دهند. یک پوشش عملکردی واحد اغلب نمی‌تواند پاسخگوی تمام نیازها باشد. با پیشرفت دانش در حوزه مکانیزم‌های مشکلات خطوط انتقال، امکان شناسایی ارتباطات میان این مشکلات فراهم می‌شود و می‌توان پوشش‌هایی ترکیبی برای رفع همزمان چندین مسئله توسعه داد. در مجموع، با پیشرفت روش‌های تولید، افزایش دوام پوشش‌ها و تحقیقات عمقی در خصوص مکانیزم مشکلات مرتبط با خطوط انتقال، انتظار می‌رود پوشش‌های عملکردی به عنوان گزینه‌ای ایده‌آل برای حل این مشکلات مطرح شوند.

۴) نتایج آزمایشگاهی به عنوان یک معیار اولیه قابل اعتماد هستند، اما برای پیش‌بینی دقیق عملکرد در محیط واقعی، بهتر است از مدل‌سازی‌های مبتنی بر داده‌های محیطی واقعی و تست‌های میدانی استفاده شود. ترکیب داده‌های آزمایشگاهی با نتایج میدانی و استفاده از شبیه‌سازی‌های طولانی مدت (مانند تست‌های شتاب‌داده‌شده) می‌تواند اعتماد به پیش‌بینی‌ها را افزایش دهد. اختلاف بین پارامترهای آزمایشگاهی و محیطی در شرایط زیر خلاصه می‌شود:

- شرایط محیطی متفاوت: در محیط آزمایشگاهی، شرایط محیطی مانند دما، رطوبت، آلودگی، و ضربه به‌طور مصنوعی و کنترل شده اعمال می‌شود. در محیط واقعی، این شرایط می‌توانند ناپایدار و پیچیده‌تر باشند (مانند تغییرات آب‌وهوایی ناگهانی یا آلودگی صنعتی شدید).

17. S. Kulinich, S. Farhadi, K. Nose, X. Du, *Langmuir*, 27, 25-29, (2011).
18. P. Kim, T.-S. Wong, J. Alvarenga, M. J. Kreder, W. E. Adorno-Martinez, J. Aizenberg, *ACS nano*, 6, 6569-6577, (2012).
19. G. Jiang, L. Chen, S. Zhang, and H. Huang, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 10, 36505-36511, (2018).
20. P. Wang *et al.*, *Compos. Sci. Technol.*, 198, 108307, (2020).
21. Q. Liu, Y. Yang, M. Huang, Y. Zhou, Y. Liu, X. Liang, *Appl. Surf. Sci.*, 346, 68-76, (2015).
22. G. Liu *et al.*, *Surf. Interfaces.*, 28, 101588, (2022).
23. C. Yang, F. Wang, W. Li, J. Ou, C. Li, A. Amirfazli, *Appl. Phys. A*, 122, 1-10, (2016).
24. X. Tan *et al.*, *J. Mater. Res.*, 36, 637-645, (2021).
25. L. B. Boinovich, A. M. Emelyanenko, K. A. Emelyanenko, E. B. Modin, *ACS nano*, 13, 4335-4346, (2019).
26. B. Li *et al.*, *Coatings*, 13, 301, (2023).
27. X. Liu, H. Chen, Z. Zhao, Y. Yan, D. Zhang, *Surf. Coat. Technol.*, 374, 889-896, (2019).
28. M. Mao, J. Wei, B. Li, L. Li, X. Huang, J. Zhang, *Nat. Commun.*, 15, 9610, (2024).
29. L. Zhou *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 14, 8537-8548, (2022).
30. J. Wei, J. Zhang, X. Cao, J. Huo, X. Huang, J. Zhang, *Nat. Commun.*, 14, 2862, (2023).
31. P. S. Maruvada, *Corona performance of high-voltage transmission lines*. Research Studies Press Baldock, UK, 2000.
32. M. Pfeiffer and C. M. Franck, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 30, 2284-2292, (2015).
3. Q. Zhao, Z. Liu, P. Yu, L. Chen, F. Guan, "Review of transmission line icing and anti-icing technologies," in *The proceedings of the 16th Annual Conference of China Electrotechnical Society: Volume II*, 2022: Springer, pp. 1224-1232 .
4. M. Farzaneh, C. Volat, A. Leblond, "Anti-icing and de-icing techniques for overhead lines," in *Atmospheric icing of power networks*: Springer, 2008, pp. 229-268.
5. X. Xu, "The development and analysis of shot peening process to improve the aluminum conductor steel reinforced corrosion resistance," Jinan: University of ShanDong, 2015 .
6. G. G. Karady, M. Shah, R. Brown, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 10, 1965-1971, (1995).
7. Y. Cao *et al.*, *Surf. Interfaces.*, 32, 102100, (2022).
8. P. Tourkine, M. Le Merrer, D. Quéré, *Langmuir*, 25, 7214-7216, (2009).
9. L. B. Boinovich, A. M. Emelyanenko, *Mendeleev Commun*, 1, 3-10, (2013).
10. T. N. Lo, J. Lee, H. S. Hwang, I. Park, *ACS Appl. Nano Mater.*, 4, 7493-7501, (2021).
11. G. Liu, Y. Yuan, Z. Jiang, J. Youdong, W. Liang, *Mater. Res. Express*, 7, 026401, (2020.)
12. G. Liu, Y. Yuan, R. Liao, Q. Yu, L. Wang, in *2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE)*, 2021: IEEE, pp. 1-4 .
13. A. Volpe, C. Gaudioso, L. Di Venere, F. Licciulli, F. Giordano, A. Ancona, *Coatings*, 10, 587, (2020).
14. R. Liao, Z. Zuo, C. Guo, Y. Yuan, A. Zhuang, *Appl. Surf. Sci.*, 317, 701-709, (2014).
15. H.-y. Jin, S.-c. Nie, Z.-w. Li, C. Tong, K.-j. Wang, *Chin. J. Chem. Phys.*, 31, 216-222, (2018).
16. M. Fenero, M. Knez, I. Saric, M. Petravic, H. Grande, J. Palenzuela, *Langmuir*, 36, 10916-10922, (2020).

47. E. Håkansson, P. Predecki, M. S. Kumosa, *IEEE Trans. Reliab.*, 64, 928-934, (2015).
48. X. Ma, L. Gao, J. Zhang, and L.-C. Zhang, *Metals*, 7, 373, (2017).
49. B. Zhang, X. Yang, W. Yang, B. Liu, W. Ai, J. Ma, "The study on the applicability of aluminum conductor carbon core in the high incidence area of galloping for transmission lines," in *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2016: IEEE, pp. 1-4 .
50. C. Ujah, A. Popoola, and O. Popoola, *J. Mater. Sci.*, 1-18, (2022).
51. Q. Li *et al.*, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 27, 257-269, (2020).
52. S. B. Ulaeto, J. K. Pancrecius, K. K. Ajekwene, G. M. Mathew, T. Rajan, "Advanced nanocoatings for anticorrosion," in *Corrosion Protection at the Nanoscale*: Elsevier, 2020, pp. 499-510.
53. R. Şomoghi *et al.*, *Polymers*, 16, 2054, (2024).
54. S. P. Biswal and S. Acharya, "Conducting polymer-based nano composites for anti corrosion coatings—a mini-review," 2024.
55. A. Thakur, S. Kaya, and A. Kumar, *Curr. Nanosci.*, 18, 203-216, (2022).
56. A. A. Farag, *Corrosion Reviews*, 38, 67-86, (2020).
57. Z. Yuan, Y. Tu, R. Li, F. Zhang, B. Gong, C. Wang, *CSEE J. Power Energy Syst.*, 8, 910-921, (2020).
58. J.-M. George *et al.*, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 21, 2594-2601, (2014).
59. D. Pylarinos, K. Siderakis, E. Thalassinakis, *IEEE Electr. Insul. Mag.*, 31, 23-29, (2015).
60. W. Peng, X. Gou, H. Qin, M. Zhao, X. Zhao, Z. Guo, *Appl. Surf. Sci.*, 466, 126-132, (2019).
61. M.-X. Zhu *et al.*, *J. Chem. Eng.*, 404, 126476, (2021).
33. N. Hylten-Cavallius, S. Annestrand, H. Witt, and V. Madzarevic, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, 83, 500-508, (1964).
34. X. Zhang, C. Lian, C. Emersic, I. Cotton, in *2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2019: IEEE, pp. 87-90 .
35. P. Xu, Y. Ma, J. Zhu, L. Zhao, B. Shen, and X. Bian, *High Vol.*, 7, 147-157, (2022).
36. V. Megala, C. P. Sugumaran, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 48, 1122-1129, (2020).
37. Z. Lin, X. Jian, W. Yuanyi, C. Qingmin, D. Jianfu, W. Qingjun, 2013.
38. Y. Yong, Z. Chuyan, W. Liming, *The Institution of Engineering and Technology*, vol. 10, p. 7, 2016.
39. X. Bian *et al.*, *J. Eng.*, 2019, 3046-3050, (2019).
40. C. Lian, X. Zhang, C. Emersic, R. Lowndes, and I. Cotton, in *2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, 2019: IEEE, pp. 238-241 .
41. X. Zhang *et al.*, *High Volt.*, 692-704, (2022).
42. B. Wang *et al.*, *Polymer Composites*.
43. A. S. Reznik, I. O. Ivanov, T. M. Shikova, A. M. Andreev, E. R. Mananov, "The effect of discharge activity on the performance of corona-protective semiconducting coatings of the stator bar insulation," in *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, 2021: IEEE, pp. 1228-1231 .
44. M. Ren *et al.*, *Mater. Adv.*, 3, 3853-3861, (2022).
45. H. Chen, L. Li, W. Zhao, X.-R. Zhang, L. Weng, *Polymers*, 14, 5469, (2022).
46. B. Li, L. Liu, P. Dang, G. Wang, L. Tang, T. Li, "Study on corrosion test of corrosion-proof steel core of high-anticorrosive conductor," in *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2020: IEEE, pp. 1-4 .

78. G. Wang *et al.*, *Adv. Mater.*, 2311489, (2024).
79. I. Ramalla, R. K. Gupta, K. Bansal, *Int. J. Eng. Technol*, 4, 509, (2015).
80. A. Lafuma, D. Quéré, *Europhysics Letters*, 96, 56001, (2011).
81. M. Farzaneh *et al.*, "Systems for prediction and monitoring of ice shedding, anti-icing and de-icing for power line conductors and ground wires," 2010.
82. W. Liao *et al.*, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 14, 1446-1454, (2007).
83. Y. Qin, Z. Xu, Z. Jia, Z. Guan, L. Wang, R. Zhang, "An application of RTV with different conductivities in anti-icing," in *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2009: IEEE, pp. 41-44 .
84. X. Wei, Z. Jia, Z. Sun, M. Farzaneh, Z. Guan, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 31, 1413-1421, (2016).
85. X. Yan, J. Li, L. Li, Z. Huang, J. Hu, M. Lu, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 23, 2165-2173, (2016).
86. X. Li, B. Yang, Y. Zhang, G. Gu, M. Li, L. Mao, *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, 69, 441-447, (2014).
87. C. Guo, R. Liao, Y. Yuan, Z. Zuo, A. Zhuang, *J. Nanomater.*, 2015, 404071, (2015).
88. Z. Zuo, R. Liao, C. Guo, X. Zhao, "Fabrication and anti-icing property of superhydrophobic coatings on insulator," in *2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2015: IEEE, pp. 161-164 .
89. A. M. Emelyanenko, L. B. Boinovich, A. A. Bezdomnikov, E. V. Chulkova, K. A. Emelyanenko, *ACS Appl. Mater. interfaces*, 9, 24210-24219, (2017).
90. J. Sun, D. He, Q. Li, H. Zhang, H. Liu, *AIP Adv.*, 10, (2020).
91. Z. Hong *et al.*, *Ceram. Int.*, 48, 10236-10243, (2022).
62. M. E. Ibrahim, N. A. Sabiha, M. A. Izzularab, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 21, 2156-2163, (2014).
63. A. Olad, F. Maryami, A. Mirmohseni, A. A. Shayegani-Akmal, *Prog. Org. Coat.*, 151, 106082, (2021).
64. J. G. Castaño, E. Velilla, L. Correa, M. Gómez, F. Echeverría, *Electr. Power Syst. Res.*, 116, 182-186, (2014).
65. B. Bhushan, Y. C. Jung, K. Koch, *Langmuir*, 25, 3240-3248, (2009).
66. R. A. Ghunem *et al.*, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 29, 1392-1399, (2022).
67. K. Maghsoudi, G. Momen, R. Jafari, M. Farzaneh, *Appl. Surf. Sci.*, 458, 619-628, (2018).
68. D. Patil, S. Aravindan, R. Sarathi, P. V. Rao, *Surf. Eng.*, 37, 308-317, (2021).
69. H. Wang, J. Xu, X. Du, Z. Du, X. Cheng, H. Wang, *Compos. B Eng.*, 225, 109273, (2021).
70. E. Vazirinasab, R. Jafari, G. Momen, *Surf. Coat. Technol.*, 375, 100-111, (2019).
71. W. Peng, X. Gou, H. Qin, M. Zhao, X. Zhao, Z. Guo, *Chem. Eng. J.*, 352, 774-781, (2018).
72. H. de Santos, M. Á. Sanz-Bobi, *Electr. Power Syst. Res.*, 191, 06863, (2021).
73. J. Zhuang, *Fuzhou: University of Fuzhou*, 2010.
74. J. Zhuang *et al.*, *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, 7, E46-E53, (2010).
75. G. Momen, M. Farzaneh, A. Nekahi, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 24, 3630-3646, (2017).
76. H. Khademsameni, R. Jafari, A. Allahdini, G. Momen, *Materials*, 17, 1622, (2024).
77. D. Tripathi, P. Ray, A. V. Singh, V. Kishore, S. L. Singh, *Coatings*, 13, 1095, (2023).

106. W. Fan, H. Wang, C. Wang, Z. Liu, Y. Zhu, K. Li, *Appl. Surf. Sci.*, 521, 146417, (2020).
107. S. R. Nayak, K. N. S. Mohana, M. B. Hegde, K. Rajitha, A. M. Madhusudhana, S. R. Naik, *J. Alloys Compd.*, 856, 158057, (2021).
108. L. Ning, Y. Chen, K. Yang, X.-m. Wang, S. Zhang, *Corros. Sci. Prot. Technol.*, 31, 149-154, (2018).
109. X. Li, Z. Zhang, B. Du, W. Li, S. Suo, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 546, 2020.
110. S. Yan, X. Chen, A. Zhang, J. Tang, *Coatings*, (2024).
111. Y. Li, "Screening of Anticorrosion Primer and Coating System for Corroded Transmission Towers," (2013).
92. X. Jiang, J. Ma, Z. Zhang, J. Hu, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 17, 351-359, (2010).
93. L. Zhu, J. Xue, Y. Wang, Q. Chen, J. Ding, Q. Wang, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 5, 4053-4062, (2013).
94. Q. Hu *et al.*, *J. Energy Storage*, 41, 102842, (2021).
95. Y. Yuan, H. Xiang, G. Liu, R. Liao, *Surf. Interfaces.*, 27, 101516, (2021).
96. R. Chatterjee, D. Beysens, S. Anand, *Adv. Mater.* 31, 807812, (2019).
97. M. Zhang, Q. Liu, J. Liu, J. Yu, J. Wang, *MRS Commun.*, 9, 92-98, (2019).
98. J. Li, Y. Zhao, J. Hu, L. Shu, X. Shi, *J. Adhe. Sci. Technol.*, 26, 665-679, (2012).
99. K. Maghsoudi, E. Vazirinasab, G. Momen, R. Jafari, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 59, 9343-93, (2023).
100. S. Shreepathi, P. Bajaj, B. Mallik, *Electroch. Acta*, 55, 5129-5134, (2010).
101. E. Alibakhshi, E. Ghasemi, M. Mahdavian, *Prog. Org. Coat.*, 77, 7, 1155-1162, (2014).
102. S. Arman, B. Ramezanzadeh, S. Farghadani, M. Mehdipour, A. Rajabi, *Corros. Sci.*, 77, 118-127, (2013).
103. L. G. Ecco, M. Fedel, F. Deflorian, J. Becker, B. B. Iversen, A. Mamakhel, *Prog. Org. Coat.*, 96, 19-25, (2016).
104. L. Wang, L. Liu, X. Fu, H. Mei, Z. Guan, "Influences of transmission tower anticorrosive coatings on electrical performance of composite insulator," in *2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2016: IEEE, pp. 834-836.
105. A. Popoola, V. S. Aigbodion, O. Fayomi, *Surf. Coat. Technol.*, 306, 448-454, (2016).



Nanocoatings in overhead power transmission lines: conductors, insulators, and towers

Majid Mirzaee*, Abbass Feizinia, Yaser Ghorbani Amir

Non metallic group, Niroom Research Institute (NRI), Tehran, Iran

Abstract: Overhead transmission lines are the primary method of electricity transmission. Conductors, insulators, and towers are the main electrical equipment of these lines. Since these lines operate in a natural environment, issues such as icing, corona discharge, pollution deposition, and corrosion arise. These problems can lead to incidents that result in significant economic losses. To solve these problems, functional coatings with superhydrophobic, semiconducting, anti-corrosion, and other properties can be applied to electrical equipment, which offer low cost and high efficiency advantages. For this reason, functional coatings have become a hot research topic in the field of external insulation in recent years. Given the various problems faced by electrical equipment in overhead transmission lines, there is a need for distinct solutions. Therefore, this review classifies the coatings based on usage scenarios and functions. In each section, it first briefly states the causes of the problems with electrical equipment, then introduces the mechanism of using this type of functional coating to solve the problem, summarizes the development and application status of this type of coating, compiles the limitations of these coatings, and finally presents a summary of key issues in the research of functional coatings while looking at future research directions.

Keywords: Functional coating, Superhydrophobic, Anti-icing, Anti-corona, Anti-pollution, Anti-corrosion, Overhead transmission lines.

بررسی نانو ساختارهای کربن نیتریدی به عنوان حامل داروی آناگرلید با استفاده از نظریه تابعی چگالی

ایوب احمدی، محبوبه صالح پور*، زهره سعادت

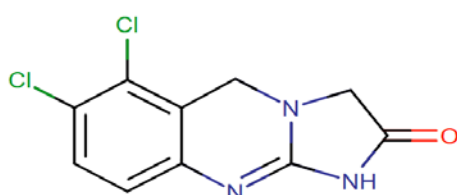
گروه شیمی، واحد امیدیه، دانشگاه آزاد اسلامی، امیدیه، ایران

چکیده: هدف این پژوهش بررسی برهم کنش های داروی آناگرلید (AG) و نانوساختارهای نیترید کربن گرافیتی $g-C_3N_4$ با استفاده از نظریه تابعی چگالی است. تمام محاسبات با استفاده از تابع B3LYP همراه با سری پایه $6-311+G(d,p)$ در محیط گوسین ۰۹ اجرا شدند. بهینه سازی ساختاری بر روی تمام صورت بندی های اولیه $g-C_3N_4:AG$ اجرا شد و انرژی های جذب (E_{ads}) نیز برای آنها محاسبه گردید. در نهایت، سه پیکربندی پایدار برای کمپلکس $g-C_3N_4:AG$ به دست آمد که تمام شیوه های ارتعاشی در هر سه کمپلکس مقادیر مثبت داشتند. مقادیر E_{ads} برای کمپلکس های ۱ تا ۳ به ترتیب $-۰/۱۶$ kcal.mol⁻¹، $-۳/۷$ و $-۲۵/۵$ هستند. سطح انرژی HOMO، LUMO و اختلاف انرژی بین آنها (E_g) برای ساختارهای مورد بررسی نشان داد که به طور کلی جذب AG روی سطح $g-C_3N_4$ باعث ناپایداری نسبتاً زیاد سطح انرژی HOMO و پایداری کم سطح انرژی LUMO می شود. محاسبات NBO نشان داد که مقدار بار جزئی اتم های ساختارهای مورد بررسی بعد از تشکیل کمپلکس ها تغییر محسوسی نشان نمی دهند و انتقال بار ناچیزی بین نانوساختار و دارو اتفاق می افتد. زمان مورد نیاز برای رهاسازی AG از $g-C_3N_4$ در کمپلکس های ۱ تا ۳ به ترتیب حدود $۲/۰ \times 10^{-5}$ s، $۴/۰ \times 10^{-14}$ s و ۸۳ s است. از این رو، به نظر می رسد با در نظر گرفتن انرژی جذب و خواص الکترونی، کمپلکس $g-C_3N_4:AG-3$ گزینه مناسبی برای حمل داروی AG است.

واژه های کلیدی: آناگرلید، نظریه تابعی چگالی، نیترید کربن گرافیتی، نانو حامل، تحویل دارو.

ma.salehpour@iau.ac.ir

پلاکت ها در خون مشخص می شود، استفاده می شود. ساختار آناگرلید شامل یک حلقه ایمیدازول، یک حلقه پیریمیدین و یک گروه فنیل است (شکل ۱). این ساختار منحصر به فرد به آناگرلید اجازه می دهد تا به گیرنده های خاص در مغز استخوان متصل شده و فرآیند تولید ترومبوسیت ها را مهار کند [۱].



شکل ۱. ساختار مولکولی داروی آناگرلید

۱- مقدمه

آناگرلید (AG) یک مشتق خوراکی ایمیدازوکینازولین توصیه شده در سراسر جهان است که استفاده از آن در بخش پزشکی با تایید دولت ایالات متحده در سال ۱۹۹۷ آغاز شد. AG با فرمول مولکولی $C_{10}H_7Cl_2N_3O$ را می توان عامل ضد پلاکت در خون شناسی و مهارکننده های PDE-3 نامید که برای درمان ترومبوسیتمی اساسی^۲ یا اولیه، بیماری که با افزایش تعداد

¹ Anagrelide

² Essential thrombocythemia

تحويل کارآمد آنارگرید به سلول‌های هدف برای به حداکثر رساندن اثر درمانی آن در عین به حداقل رساندن عوارض جانبی بالقوه بسیار مهم است [۲]. برای کاهش عوارض جانبی آنارگرید، می‌توان از راهکارهای مختلفی مانند تنظیم مقدار مصرف دارو، مصرف دارو با غذا، نوشیدن مایعات فراوان و استفاده از داروهای ضد تهوع بهره برد. استفاده از نانوحامل‌ها نیز می‌تواند به کاهش عوارض جانبی و افزایش اثربخشی داروی آنارگرید کمک کند.

نانوفناوری به‌عنوان یکی از نوظهورترین و پویاترین شاخه‌های علم و فناوری، دنیایی از امکانات جدید را در زمینه‌های مختلف علمی و صنعتی پیش روی ما می‌گشاید [۳]. انواع مختلفی از نانومواد برای تشخیص و درمان بیماری‌ها، به ویژه سرطان، توسعه یافته‌اند [۴]. نانومواد مزومتخلخل مانند چارچوب‌های فلزی-آلی و نانوذرات سیلیکا به‌عنوان حامل‌های دارو در درمان سرطان و بسیاری از اهداف زیست‌پزشکی دیگر مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵-۶]. در سال‌های اخیر، نانومواد کربنی، به‌عنوان حامل دارو، به دلیل عملکرد سطح منحصر به فرد برای تصویربرداری تشخیصی، توانایی هدف‌گیری سلول‌های سرطانی و سمیت سلولی پایین، پتانسیل کارآمدی را در درمان سرطان نشان داده‌اند [۷]. در میان تمام آلوتروپ‌های نیتريد کربن، نیتريد کربن گرافیتی ($g-C_3N_4$)، یک پلیمر دو بعدی مزدوج، ارزان قیمت، فراوان در زمین و بدون فلز، توجه محققان را به خود جلب کرده است [۸]. این نانوساختار خواص ویژه‌ای مانند پایداری بالا، خاصیت کاتالیزوری، پهنای باند 2.7 eV ، بازدهی بالا در نقش نیمه‌رسانا، حسگر و دیگر کاربردهای تجزیه نشان می‌دهد [۹-۱۲]. نانولایه‌های فوق‌نازک $g-C_3N_4$ در مقایسه با فرم توده $g-C_3N_4$ زیست‌سازگاری بالا، حلالیت بهتر در آب، سمیت کمتر و بازده فلوئورسانس نوری قابل توجهی را نشان داده‌اند [۱۳]. این خواص منحصر به فرد $g-C_3N_4$ آن را قادر می‌سازد تا داروها را در حفره‌های نانوساختارها قرار داده و یک کمپلکس تشکیل دهد. محققان زیادی تلاش کرده‌اند تا چنین ترکیباتی از مولکول‌ها را با برهم‌کنش‌های ضعیف بین دهنده و پذیرنده سنتز کنند تا به نتایج کارآمدتری دست یابند [۱۴].

درک چگونگی تعامل نانوساختارهای نیتريد کربن با آنارگرید در

سطح مولکولی می‌تواند بینش ارزشمندی را در مورد بهینه‌سازی سیستم‌های دارورسانی برای بهبود نتایج درمان ارائه دهد. بررسی مکانیسم‌های اتصال ویژه بین نانوساختارهای نیتريد کربن و آنارگرید، تأثیر پیکربندی‌های مختلف نانوساختار نیتريد کربن بر جذب و آزادسازی آنارگرید و تأثیر عوامل محیطی بر پایداری و کارایی کمپلکس‌های کربن نیتريد- آنارگرید از جنبه‌های مهم و ارزشمند این مطالعه است. هدف اصلی این تحقیق بررسی امکان‌سنجی و اثربخشی استفاده از نانوساختارهای نیتريد کربن به‌عنوان حامل برای دارورسانی آنارگرید از طریق شبیه‌سازی DFT است. هدف این مطالعه با روشن کردن برهمکنش‌های مولکولی بین نانوساختارهای نیتريد کربن و آنارگرید، ارائه بینش‌های ارزشمندی در مورد بهینه‌سازی سیستم‌های تحويل دارو برای افزایش نتایج درمانی در درمان ترومبوسیتمی اساسی است.

۲- روش انجام محاسبات

تمام محاسبات براساس نظریه تابعی چگالی و با استفاده از تابع B3LYP همراه با سری پایه $6-311+G(d,p)$ در محیط گوسین ۰۹ اجرا شد [۱۵]. از آنجا که تابع B3LYP برهم‌کنش‌های ضعیف مانند نیروهای وان‌دروالس را به‌خوبی نشان نمی‌دهد، از تصحیح DFT-D3 برای بهبود عملکرد تابعی مورد استفاده قرار گرفت. ساختار نانوصفحه و AG با استفاده از نرم‌افزار Gauss View رسم شدند [۱۶]. به‌طوری که ساختار نهایی نانوصفحه دارای فرمول مولکولی $C_{18}N_{27}H_9$ شد. برای اطمینان از این که ساختارهای بهینه شده نقاط کمینه روی سطح انرژی پتانسیل هستند و با نقطه زینی^۲ یا حالت گذار مواجه نیستیم محاسبات فرکانس ارتعاشی نیز انجام شد. همچنین، با اجرای محاسبات فرکانس ارتعاشی، تصحیحات انرژی نقطه صفر (ZPE) و پارامترهایی هم‌چون تغییرات انتالپی (ΔH) و تغییرات انرژی آزاد گیبس (ΔG) به‌دست آمد. تغییرات انتالپی بر اثر جذب AG روی سطح $g-C_3N_4$ در دمای 298 K و فشار 1 اتمسفر با استفاده از معادله^۱ محاسبه شد:

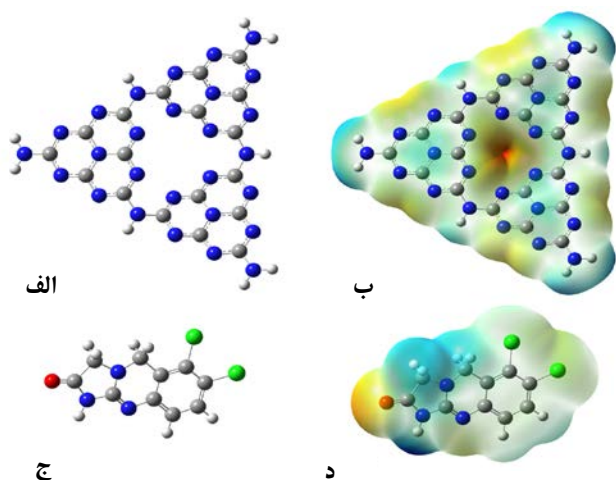
$$\Delta H = H_{g-C_3N_4:AG} - H_{g-C_3N_4} - H_{AG} \quad (1)$$

² Saddle point

³ Zero Point Energy

¹ Graphitic carbon nitride

متخلخل نسبتاً بزرگ در مرکز این ساختار شده است. اتم‌های کربن و نیتروژن هگزاگون‌ها از طریق پیوندهای کووالانسی به هم متصل می‌شوند. طول پیوندهای C-N به طور متوسط حدود $1/34 \text{ \AA}$ است. بالاترین اوربیتال مولکول اشغال شده (HOMO) و پایین‌ترین اوربیتال مولکولی اشغال نشده (LUMO) نانو ساختار به ترتیب دارای انرژی $-6/49 \text{ eV}$ و $-2/61 \text{ eV}$ هستند که منجر به شکافت انرژی (Eg) به میزان $3/87 \text{ eV}$ خواهد شد و آن را در دسته مواد نیمه‌رسانا قرار می‌دهد. نقشه MEP سطح مولکولی را با رنگ‌های مختلفی نشان می‌دهد که هر کدام از آن‌ها بیانگر مقدار خاصی از پتانسیل هستند. ناحیه‌های غنی از الکترون مولکول با رنگ قرمز و ناحیه‌هایی که کمبود الکترون دارند با رنگ آبی نشان داده می‌شوند. پتانسیل‌های حد واسط نیز به ترتیب با رنگ‌های زرد و سبز مشخص می‌شوند. از شکل ۲ب مشخص می‌شود که تجمع چگالی الکترونی به طور ویژه در مرکز ساختار $g-C_3N_4$ است و این ناحیه برای برهم‌کنش با مولکول‌های الکترون‌دوست مستعد است.



شکل ۲. (الف) و (ب) ساختار بهینه شده و پتانسیل‌های الکتروستاتیکی مربوط به سطح مولکولی $g-C_3N_4$ و (ج) و (د) AG که با استفاده از تابعی B3LYP و مجموعه پایه 6-311+G(d,p) محاسبه شده‌اند. راهنمای رنگ‌های نقشه MEP برحسب واحدهای اتمی (a.u.): آبی، مثبت‌تر از $+0/10$ ؛ سبز، بین $+0/10$ و 0 ؛ زرد، بین 0 و $-0/10$ ؛ قرمز، منفی‌تر از $-0/10$.

در مورد داروی AG (شکل ۲ج و ۲د) مشخص است که گروه کربونیل حلقه ایمیدازول، نیتروژن حلقه پیریمیدین و اتم‌های کلر متصل به حلقه بنزن آماده حمله به مراکز الکترون‌دوست مولکول‌های دیگر هستند، در حالیکه هیدروژن‌های حلقه

در معادله ۱، $H_{g-C_3N_4}$ ، $H_{g-C_3N_4:AG}$ و H_{AG} به ترتیب نشان از تغییرات انتالپی کمپلکس $g-C_3N_4:AG$ ، نانوصفحه $g-C_3N_4$ و مولکول AG هستند که از محاسبات فرکانس ارتعاشی به دست آمده‌اند. تغییرات انرژی آزاد گیبس (ΔG) ناشی از تشکیل کمپلکس و انرژی جذب (E_{ads}) AG روی نانوصفحه نیز با استفاده از داده‌های متناظر در شرایط مشابه دما و فشار محاسبه می‌شوند. هم‌چنین، اثرات حلال ضمنی از طریق میدان واکنش خود سازگار (SCRF) و با به‌کارگیری مدل پیوستار قطبش‌پذیر^۲ (PCM) با در نظر گرفتن ثابت دی‌الکتریک آب ($\epsilon = 78/36$) تعیین می‌شوند. برای این که فرایند انتقال بار بین نانو ساختار و مولکول آناگرلید را دقیق‌تر بررسی کنیم و درک بهتری از توزیع بار و انرژی‌های پایدارکننده کمپلکس $g-C_3N_4:AG$ داشته باشیم، محاسبات اوربیتال پیوندی طبیعی (NBO) را انجام خواهیم داد. به‌علاوه، نرم‌افزار [17]Gauss Sum برای به دست آوردن نمودار چگالی حالات (DOS) استفاده شد. شکافت انرژی (E_g) بین بالاترین اوربیتال مولکول اشغال شده (HOMO) و پایین‌ترین اوربیتال مولکولی اشغال نشده (LUMO) نانوصفحه قبل و بعد از تشکیل کمپلکس با AG با استفاده از معادله ۲ بدست می‌آید:

$$E_g = E_{LUMO} - E_{HOMO} \quad (2)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ویژگی‌های ساختاری و الکترونی $g-C_3N_4$ و AG

ساختار بهینه شده و نقشه پتانسیل الکتروستاتیک مولکولی (MEP) مولکول‌های $g-C_3N_4$ و AG در شکل ۲ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۲الف مشاهده می‌شود می‌توان گفت که $g-C_3N_4$ از ۹ حلقه شش ضلعی تشکیل شده که هر ۳ حلقه به یکدیگر جوش خورده‌اند و ساختاری مسطح و صفحه مانند را تشکیل داده‌اند. نحوه قرارگیری شبکه‌های شش ضلعی در ساختار $g-C_3N_4$ باعث پدیدار شدن یک فضای

¹ Self-consistent reaction field

² Polarizable continuum model

³ Natural bond orbital

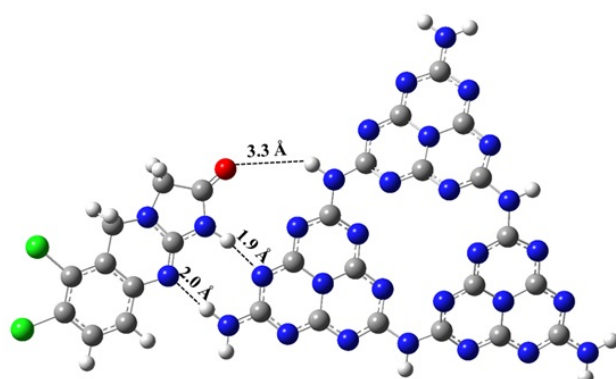
⁴ Density of States

نهایت، سه پیکربندی پایدار برای کمپلکس $g-C_3N_4:AG$ بدست آمد که همراه با نمودار DOS مربوط به آن‌ها در شکل ۳ با شماره‌های ۱ تا ۳ مشخص شده‌اند. برای اطمینان از این که $g-C_3N_4$ ساختارهای بهینه شده متناظر با کمینه‌های واقعی روی سطح انرژی پتانسیل هستند و همچنین برای محاسبه انرژی نقطه صفر (EZPE)، محاسبات فرکانس ارتعاشی نیز با استفاده از تابعی B3LYP و مجموعه پایه 6-311+G(d,p) اجرا شدند. نتیجه نشان داد که تمام شیوه‌های ارتعاشی در هر سه کمپلکس مقادیر مثبت دارند. بنابراین، کمپلکسی که منفی‌ترین مقدار انرژی را داشت به- عنوان پایدارترین ساختار در نظر گرفته می‌شود. هر چند، در ادامه به بررسی ویژگی‌های ساختاری و الکترونی هر سه کمپلکس

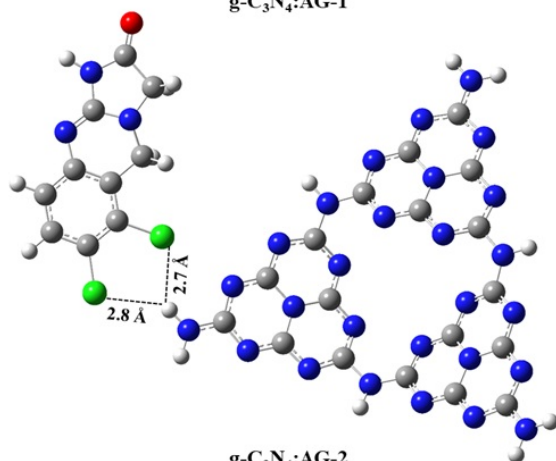
ایمیدازول دارای بار الکتریکی مثبت بود و احتمالاً درگیر واکنش- های هسته‌دوست خواهند شد.

۳-۲- ویژگی‌های ساختاری و الکترونی کمپلکس‌های $g-C_3N_4:AG$

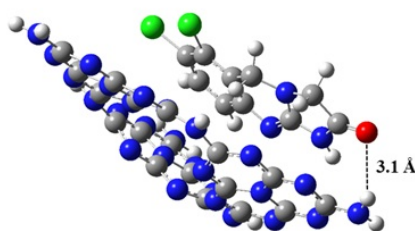
به منظور شناسایی پایدارترین پیکربندی کمپلکس $g-C_3N_4:AG$ ، از نقشه پتانسیل الکتروستاتیک مولکولی دارو و نانوساختار استفاده کردیم. به این ترتیب که، تمام جهت‌گیری‌های ممکن برای قرار گرفتن AG روی سطح $g-C_3N_4$ بررسی شد. بهینه‌سازی ساختاری بر روی تمام صورت‌بندی‌های اولیه $g-C_3N_4:AG$ اجرا شد و انرژی‌های جذب (E_{ads}) نیز برای آنها محاسبه گردید. در



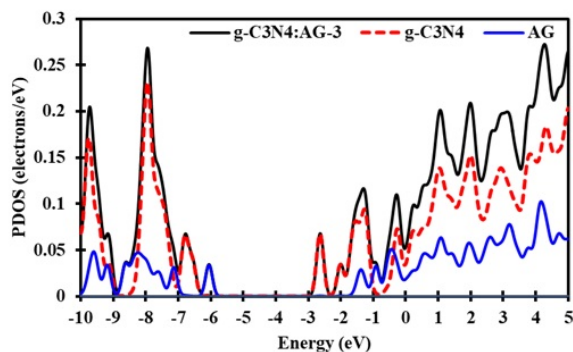
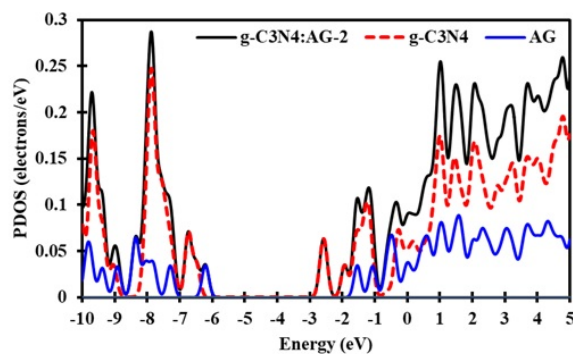
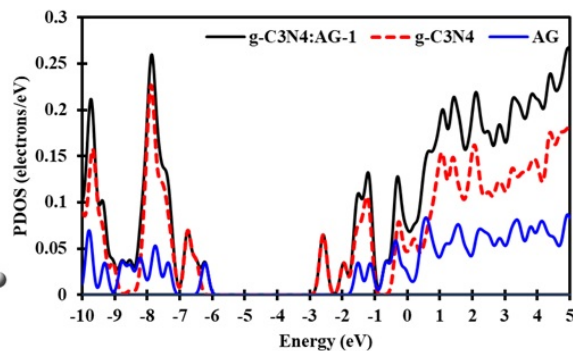
$g-C_3N_4:AG-1$



$g-C_3N_4:AG-2$



$g-C_3N_4:AG-3$



شکل ۳. ساختار کمپلکس‌های $g-C_3N_4:AG$ و نمودار چگالی حالات (PDOS) که با استفاده از تابعی B3LYP و مجموعه پایه 6-311+G(d,p) به دست آمده است.

سطح انرژی HOMO, LUMO و اختلاف انرژی بین آنها (E_g) برای ساختارهای مورد بررسی نشان می‌دهد که به‌طور کلی جذب AG روی سطح $g-C_3N_4$ باعث ناپایداری سطح انرژی HOMO و پایداری سطح انرژی LUMO می‌شود. اما، در همه موارد تغییرات HOMO به مراتب محسوس‌تر از LUMO است.

در مورد کمپلکس اول برهم‌کنش بین $g-C_3N_4$ و AG باعث می‌شود که HOMO و LUMO به ترتیب به اندازه 0.27 eV و 0.1 eV تغییر کنند؛ بنابراین E_g به میزان $7/1\%$ کاهش می‌یابد. همچنین تشکیل کمپلکس دوم منجر به کاهش $7/4\%$ در مقدار E_g می‌شود. بیشترین مقدار کاهش E_g نانوساختار پس از برهم‌کنش با AG در کمپلکس سوم دیده می‌شود ($12/1\%$) که ناشی از ناپایداری 0.42 eV سطح انرژی HOMO و پایداری 0.04 eV سطح انرژی LUMO است. این امر نشان می‌دهد که خواص الکترونی $g-C_3N_4$ نسبت به مولکول AG حساس است. نمودار PDOS (شکل ۳) محاسبه شده برای کمپلکس‌های مختلف $g-C_3N_4:AG$ نشان می‌دهد که AG مسئول تعیین سطح انرژی HOMO در کمپلکس است، در حالی که $g-C_3N_4$ در تعیین انرژی LUMO نقش دارد. نحوه توزیع اوربیتال‌های HOMO و LUMO در ساختارهای $g-C_3N_4:AG$ در شکل ۴ آورده شده است که نشان از همخوانی با نمودار PDOS دارد. مقدار عددی بارهای اتمی مولکول‌های $g-C_3N_4$ و AG قبل و بعد از تشکیل کمپلکس $g-C_3N_4:AG$ با آنالیز NBO محاسبه شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار بار جزئی اتم‌های ساختارهای مورد بررسی بعد از تشکیل کمپلکس‌ها تغییر محسوسی نشان نمی‌دهند و انتقال بار ناچیزی بین نانوساختار و دارو اتفاق می‌افتد.

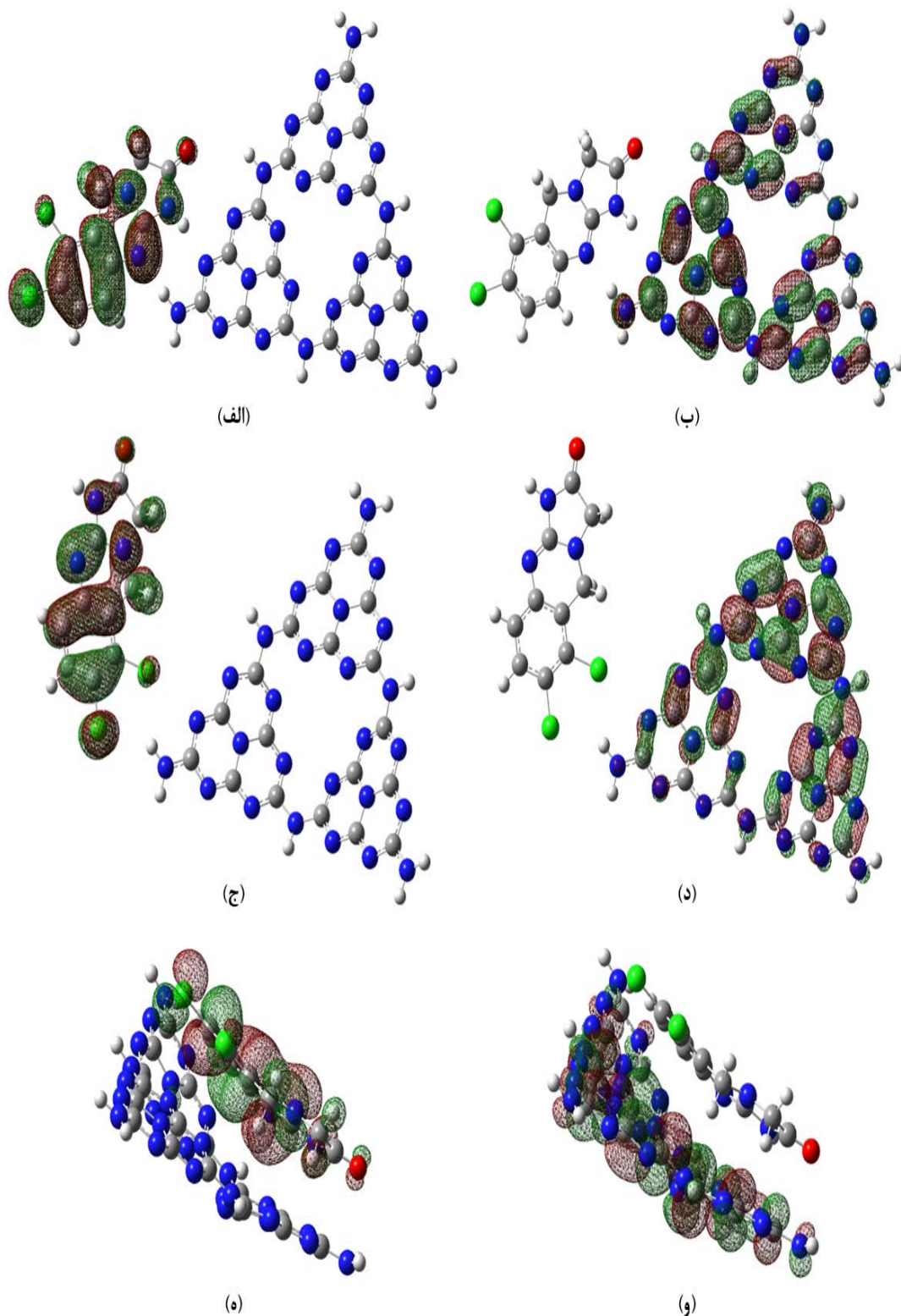
زمان بازیابی در برهم‌کنش نانوحامل-دارو به زمانی گفته می‌شود که دارو پس از رها شدن از نانوحامل، به حالت فعال و مؤثر خود باز می‌گردد. این زمان به عوامل مختلفی از جمله نوع دارو، نوع نانوحامل، روش بارگذاری دارو و محیط اطراف بستگی دارد. نقش حیاتی این پارامتر در رهاسازی دارو در محل و زمان مناسب است. اگر برهم‌کنش بین دارو و نانوحامل بسیار قوی باشد (مثلاً پیوندهای کووالانسی قوی)، رهاسازی دارو به سختی انجام می‌شود. این امر می‌تواند منجر به زمان بازیابی طولانی و یا حتی عدم رهاسازی دارو در محل مورد نظر شود. در این حالت، دارو

پرداخته شد. جدول ۱ مقادیر ΔG ، ΔH و E_{ads} پیکربندی‌های $g-C_3N_4:AG$ را در 298 K و 1 atm برحسب 1 kcal.mol⁻¹ نشان می‌دهد. مقادیر E_{ads} برای کمپلکس‌های ۱ تا ۳ به ترتیب $16/0$ ، $3/7$ ، و $25/5$ kcal.mol⁻¹ هستند. اعداد محاسبه شده حاکی از این هستند که قوی‌ترین برهم‌کنش‌های بین $g-C_3N_4$ و AG مربوط به کمپلکس $g-C_3N_4:AG-3$ می‌باشد. ضعیف‌ترین برهم‌کنش نانوساختار-دارو نیز در کمپلکس $g-C_3N_4:AG-2$ دیده می‌شود. برهم‌کنش بین یک نانوحامل و دارو نباید آنقدر قوی باشد که امکان رهاسازی دارو در هنگام رسیدن به سلول-های هدف وجود نداشته باشد؛ از سوی دیگر، انرژی جذب ضعیف نیز منجر به رهاسازی دارو در محیط نامطلوب می‌شود. شکل هندسی مولکول‌های AG و $g-C_3N_4$ پس از برهم‌کنش تغییرات ناچیزی دارد که این امر نشان می‌دهد که علی‌رغم برهم‌کنش-های نسبتاً قوی طول پیوندها و زوایای پیوندی تقریباً ثابت می‌مانند.

همچنین ΔG برای کمپلکس $g-C_3N_4:AG-2$ در شرایط استاندارد، مثبت به‌دست آمده است که نشان‌دهنده غیر خودبه‌خودی بودن فرایند جذب در شرایط استاندارد است. با توجه به رابطه ترمودینامیکی $\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ$ ، در صورتی که تغییر آنتالپی و تغییر آنتروپی نیز مثبت باشد، افزایش دما می‌تواند منجر به کاهش ΔG° و حتی تغییر علامت آن به منفی (خودبه‌خودی شدن فرایند) شود. در کاربردهای دارویی، افزایش دما ممکن است به دلیل محدودیت‌های فیزیولوژیکی (مانند دمای بدن انسان) چالش‌برانگیز باشد، اما در شرایط آزمایشگاهی یا سامانه‌های رهایش داروی خارج از بدن، کنترل دما می‌تواند یک راهکار مؤثر باشد. همچنین، بهینه‌سازی پارامترهایی مانند pH یا غلظت کمپلکس نیز می‌تواند به خودبه‌خودی شدن فرایند کمک کند.

جدول ۱. پارامترهای ترمودینامیکی (ΔG ، ΔH) و انرژی جذب AG بر سطح $g-C_3N_4$ که برای سه پیکربندی متفاوت در 298 K و 1 atm محاسبه شده‌اند.

کمپلکس	ΔH	ΔG	E_{ads}
$g-C_3N_4:AG-1$	-۱۶/۶	-۵/۶	-۱۶/۰
$g-C_3N_4:AG-2$	-۴/۹	۴/۲	-۳/۷
$g-C_3N_4:AG-3$	-۲۶/۱	-۱۱/۳	-۲۵/۵



شکل ۴. نمای اوربیتال‌های HOMO و LUMO در کمپلکس‌های $g-C_3N_4:AG$ که با استفاده از تابع B3LYP و مجموعه پایه 6-311+G(d,p) به دست آمده است.

برهم‌کنش‌های واندروالس ضعیف)، دارو قبل از رسیدن به محل هدف از نانوحامل جدا می‌شود. این امر منجر به کاهش غلظت دارو در محل هدف و کاهش اثر درمانی می‌شود. در این حالت، زمان بازبایی کوتاه است، اما دارو در مکان و زمان نامناسب رها

ممکن است به طور کامل از نانوحامل جدا نشود و در نتیجه اثر درمانی خود را از دست بدهد. این موضوع می‌تواند به دلیل انرژی جذب بسیار بالا باشد که جدا شدن دارو را بسیار دشوار می‌کند. اگر برهم‌کنش بین دارو و نانوحامل بسیار ضعیف باشد (مثلاً

گرفتن انرژی جذب و خواص الکترونی کمپلکس سوم یعنی $g-C_3N_4:AG-3$ گزینه مناسبی برای حمل داروی AG است.

۴- نتیجه گیری

تجزیه و تحلیل اوربیتال‌های مولکولی مرزی نشان داد که HOMO و LUMO نانوساختار به ترتیب دارای انرژی برابر با $eV -6/49$ و $eV -2/61$ هستند که منجر به شکاف انرژی (E_g) به میزان $eV 3/87$ خواهد شد. به منظور شناسایی پایدارترین پیکربندی کمپلکس $g-C_3N_4:AG$ ، از نقشه پتانسیل الکتروستاتیک مولکولی دارو و نانوساختار استفاده شد. به این ترتیب که، تمام جهت‌گیری‌های ممکن برای قرار گرفتن AG روی سطح $g-C_3N_4$ بررسی شد. بهینه‌سازی ساختاری بر روی تمام صورت‌بندی‌های اولیه کمپلکس اجرا شد و انرژی‌های جذب (E_{ads}) نیز برای آنها محاسبه گردید. در نهایت، سه پیکربندی پایدار برای کمپلکس $g-C_3N_4:AG$ به دست آمد که تمام شیوه‌های ارتعاشی در هر سه کمپلکس مقادیر مثبت داشتند. مقادیر انرژی‌های جذب برای کمپلکس‌های ۱ تا ۳ به ترتیب برابر با $16/0$ ، $3/7$ ، و $25/5$ $kJ.mol^{-1}$ بدست آمد. سطح انرژی HOMO، LUMO و اختلاف انرژی بین آنها (E_g) برای ساختارهای مورد بررسی نشان داد که به طور کلی جذب AG روی سطح $g-C_3N_4$ باعث ناپایداری نسبتاً زیاد سطح انرژی HOMO و پایداری کم سطح انرژی LUMO می‌شود. در مورد کمپلکس اول E_g به میزان ۷/۱٪ کاهش می‌یابد. تشکیل کمپلکس دوم منجر به کاهش ۷/۴٪ در مقدار E_g می‌شود. همچنین بیشترین مقدار کاهش E_g نانوساختار پس از برهم‌کنش با AG در کمپلکس سوم دیده می‌شود (۱۲/۱٪). این امر نشان می‌دهد که خواص الکترونی $g-C_3N_4$ نسبت به مولکول AG حساس است. نمودار PDOS کمپلکس‌های $g-C_3N_4:AG$ نشان می‌دهد که AG مسئول تعیین سطح انرژی HOMO در کمپلکس است، در حالی که $g-C_3N_4$ در تعیین انرژی LUMO نقش دارد. محاسبات NBO نشان داد که مقدار بار جزئی اتم‌های

می‌شود. انرژی جذب پایین عامل اصلی این مشکل است. تعیین انرژی جذب بهینه دارو بر روی سطح نانوساختار برای رهاسازی در زمان و مکان مناسب، بسیار پیچیده و وابسته به عوامل متعددی است. هیچ مقدار دقیقی وجود ندارد که برای همه داروها و نانوحامل‌ها یکسان باشد. این انرژی باید به گونه‌ای باشد که به اندازه کافی قوی باشد تا دارو را تا رسیدن به محل هدف بر روی نانوحامل نگه دارد و از رهاسازی زودرس جلوگیری کند. از طرف دیگر این انرژی باید به اندازه کافی ضعیف باشد تا رهاسازی دارو در محل هدف به راحتی و در زمان مناسب انجام شود. این تعادل ظریف معمولاً با استفاده از روش‌های مختلف مهندسی سطح نانوحامل، مانند اصلاح سطح با پلیمرهای حساس به pH یا دما، یا استفاده از لیگاندهای هدفمند، به دست می‌آید. به عبارت دیگر، هدف این است که انرژی جذب در محدوده‌ای باشد که رهاسازی دارو را در پاسخ به محرک‌های خاص مثل pH اسیدی تومور، یا دما فعال کند. برای تعیین انرژی جذب بهینه، از روش‌های مختلفی مانند شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی، طیف‌سنجی و کروماتوگرافی استفاده می‌شود. این روش‌ها به محققان کمک می‌کنند تا برهم‌کنش‌های بین دارو و نانوحامل را در سطح مولکولی بررسی کرده و انرژی‌های جذب را محاسبه کنند. در نهایت، انتخاب انرژی جذب بهینه به نوع دارو، نانوحامل، و کاربرد مورد نظر بستگی دارد و نیازمند بهینه‌سازی دقیق و آزمایش‌های تجربی است. یافتن این نقطه تعادل، کلید موفقیت در طراحی سیستم‌های دارورسانی هدفمند با استفاده از نانوحامل‌ها است. در محاسبات DFT زمان‌بازیابی با استفاده از معادله ۳ که به عنوان نظریه حالت گذار شناخته می‌شود به دست می‌آید:

$$\tau = \nu_0^{-1} \exp\left(-E_{ads}/kT\right) \quad (3)$$

در معادله فوق k ثابت بولتزمن است که مقدار آن برابر با $1.38 \times 10^{-23} \text{ kcal.mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ است و ν_0 فرکانس تلاش است. معادله ۳ بیان می‌کند که انرژی‌های جذب منفی‌تر منجر به زمان‌بازیابی طولانی‌تر می‌شود. با در نظر گرفتن ν_0 برابر با مقدار 10^{16} s^{-1} در دمای بدن، زمان مورد نیاز برای رهاسازی AG از $g-C_3N_4$ در کمپلکس‌های ۱ تا ۳ به ترتیب حدود 10^{-5} s ، $2/0 \times 10^{-4} \text{ s}$ و $4/0 \times 10^{-14} \text{ s}$ است. از این رو، به نظر می‌رسد با در نظر

9. X. Wang, K. Maeda, A. Thomas, K. Takanabe, G. Xin, J.M. Carlsson, et al., *Nat. Mater.* 8(1), 76 (2009).
10. E.Z. Lee, Y.S. Jun, W.H. Hong, A. Thomas, M.M. Jin, *Angew. Chem. Int. Ed.* 122(50), 9900 (2010).
11. C. Cheng, Y. Huang, J. Wang, B. Zheng, H. Yuan, D. Xiao, *Anal. Chem.* 85(5), 2601 (2013).
12. X. Wang, X. Chen, A. Thomas, X. Fu, M. Antonietti, *Adv. Mater.* 21(16), 1609 (2009).
13. X. Zhang, X. Xie, H. Wang, J. Zhang, B. Pan, Y. Xie, *J. Am. Chem. Soc.* 135(1), 18 (2013).
14. Z. Miao, G. Wu, Q. Wang, J. Yang, Z. Wang, P. Yan, P. Sun, Y. Lei, Z. Mo, H. Xu, *Materials Reports: Energy.* 3(4), 100235 (2023).
15. M. Caricato, M.J. Frisch, J. Hiscocks, M.J. Frisch, *Gaussian 09: I/Ops Reference*, Gaussian, (2009).
16. R. Dennington, T. Keith, J. Millam, *GaussView*, version 5. (2009).
17. N.M. O'boyle, A.L. Tenderholt, K.M. Langner, *J. Comput. Chem.* 29(5), 839 (2008).

ساختارهای مورد بررسی بعد از تشکیل کمپلکس‌ها تغییر محسوسی نشان نمی‌دهند و انتقال بار ناچیزی بین نانوساختار و دارو اتفاق می‌افتد. زمان مورد نیاز برای رهاسازی AG از $g-C_3N_4$ در کمپلکس‌های ۱ تا ۳ به ترتیب حدود $2/0 \times 10^{-5}$ s، $4/0 \times 10^{-14}$ s و ۸۳ s است. از این رو، به نظر می‌رسد با در نظر گرفتن انرژی جذب و خواص الکترونی کمپلکس $g-C_3N_4:AG-3$ گزینه مناسبی برای حمل داروی AG است.

مراجع

1. M.G. Mazzucconi, R. Redi, S. Bernasconi, L. Bizzoni, F. Dragoni, R. Latagliata, C. Santoro, F. Mandelli, *Haematologica.* 89(11), 1306 (2004).
2. K. Toivanen, L. De Sutter, A. Wozniak, K. Wyns, N. Merikoski, S. Salmikangas, J. Duan, M. Maksimow, M. Lahtinen, T. Böhlting, P. Schöffski, *Drug Deliv.* 32(1), 2463433 (2025).
3. M. Nishat, M.R. Hossain, M.M. Hasan, M.K. Hossain, M.A. Hossain, F. Ahmed, J. *Biomol. Struct. Dyn.* 41(8), 3413 (2023).
4. O.O. Ltaief, I.B. Amor, H. Hemmami, W. Hamza, S. Zeghoud, A.B. Amor, M. Benzina, A.A. Alhamad, *Ann. med. surg.* 86(8), 4541 (2024).
5. R. Fatima, P. Katiyar, K. Kushwaha, *Frontiers in Nanotechnol.* 7, 1564188 (2025).
6. H.D. Lawson, S.P. Walton, C. Chan, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 13(6), 7004 (2021).
7. A.N. Al-Thani, A.G. Jan, M. Abbas, M. Geetha, K.K. Sadasivuni, *Life Sci.* 122899 (2024).
8. A. Wang, C. Wang, L. Fu, W. Wong-Ng, Y. Lan, *Nanomicro Lett.* 9, 1 (2017).



Investigating carbon nitride nanostructures as anagrelide drug carrier using density functional theory

Ayob Ahmadi, Mahboobeh Salehpour *, Zohreh Saadati

Department of Chemistry, Omidiyeh Branch, Islamic Azad University, Omidiyeh, Iran.

Abstract: The objective of this study was to investigate the interactions between the drug anagrelide and carbon nitride nanostructures $g\text{-C}_3\text{N}_4$ using density functional theory. All calculations were performed using the B3LYP functional with the 6-311+G(d,p) basis set in the Gaussian 09 software. Structural optimization was carried out on all initial $g\text{-C}_3\text{N}_4\text{:AG}$ conformations and the adsorption energies (E_{ads}) were calculated. Finally, three stable configurations of the $g\text{-C}_3\text{N}_4\text{:AG}$ complex were obtained, with all vibrational modes exhibiting positive frequencies in each complex. The E_{ads} values for complexes 1 to 3 are -0.16, -3.7 and -25.5 kcal.mol⁻¹, respectively. The HOMO and LUMO energy levels, as well as the energy gap (E_g) of the studied structures, indicated that adsorption of AG on the $g\text{-C}_3\text{N}_4$ surface causes relatively high instability of the HOMO energy level and low stability of the LUMO energy level. NBO calculations showed that the partial charge of the atoms of the studied structures does not change significantly after the formation of the complexes and that there is negligible charge transfer between the nanostructure and the drug. The time required for the release of AG from $g\text{-C}_3\text{N}_4$ in complexes 1 to 3 is about 0.2×10^{-5} s, 0.4×10^{-14} s and 83 s, respectively. Therefore, considering the adsorption energy and electronic properties, the $g\text{-C}_3\text{N}_4\text{:AG-3}$ complex appears to be a promising candidate for AG drug delivery.

Keywords: Anagrelide, Density functional theory, Graphitic carbon nitride, Nanocarrier, Drug delivery.

نانوسیالات در عایق ترانسفورماتور: سنتز، عملکرد و چشم اندازهای آینده

مجید میرزایی*، مجید رضائی آبادچی، علیمراد رشیدی

گروه مواد غیرفلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

چکیده: با افزایش سطح ولتاژ در انتقال برق، نیاز به اطمینان از عملکرد عایقی ترانسفورماتورها به طور چشم گیری افزایش یافته است. روغن معدنی و کاغذ اجزای اصلی عایقی در ترانسفورماتورهای پر شده با روغن هستند. با توجه به افزایش نیاز به توسعه عایق های برتر، محققان متعددی مطالعاتی آزمایشی برای اثبات اثربخشی و توانمندی روغن ترانسفورماتورها انجام داده اند. برای ارتقاء سطح عایقی ترانسفورماتورهای با ولتاژ فوق العاده بالا و کاهش وزن و ابعاد آنها، افزایش هدایت عایقی روغن ترانسفورماتورها و سلولز آغشته به آن ضروری است. اخیراً، پروژه های نوآورانه در زمینه به کارگیری نانوفناوری در عایق های مایع ترانسفورماتورها اجرا شده که نتایج آن نشان دهنده بهبود چشمگیر در ویژگی های عایقی روغن ترانسفورماتورها بوده است. حوزه نانو سیالات مبتنی بر روغن ترانسفورماتور توجه زیادی را از هر دو جنبه نظری و کاربردی جلب کرده است. نانو سیالات می توانند به عنوان جایگزینی بالقوه برای روغن های معدنی در آینده نزدیک مورد استفاده قرار گیرند. این مقاله به بررسی مجموعه ای از پژوهش های انجام شده در این زمینه می پردازد که به سه بخش تقسیم می شود. بخش اول معطوف به تهیه نانو سیال است که شامل انواع مختلف نانو مواد و روش های سنتزی جهت تولید نانو سیالات پایدار و معلق می شود. در بخش دوم، عملکرد نانو سیالات با تمرکز بر ویژگی های حرارتی، الکتریکی و فیزیکوشیمیایی روغن ترانسفورماتور به طور دقیق بررسی و مقایسه می شود و در بخش سوم به مزایا و محدودیت های نانو سیالات پرداخته می شود. اهمیت این مقاله در گردآوری مطالعات پیشین، دسته بندی طبیعت تحقیقاتی و پیش بینی روندهای آینده نهفته است. همچنین چند توصیه برای تحقیقات و کاربردهای آتی نانو سیالات ارائه می شود.

واژگان کلیدی: ترانسفورماتور، روغن، نانوسیال، نانومواد.

mjmirzaei@nri.ac.ir

۱- مقدمه

در سامانه های الکتریکی شده است تا آنها بتوانند در شرایط سخت و غیرقابل پیش بینی دوام بیاورند. ترانسفورماتورها که وظیفه انتقال انرژی و تغییر سطوح ولتاژ را بر عهده دارند، از جمله مهم ترین اجزای شبکه الکتریکی هستند و خرابی آنها می تواند پیامدهای جدی به همراه داشته باشد. بسیاری از ترانسفورماتورهای فعال در نقاط مختلف جهان به پایان عمر پیش بینی شده خود نزدیک می شوند؛ از این رو، تمرکز محققان بر روی افزایش امنیت عملکردی این تجهیزات قرار گرفته است [۱].

برق به عنوان یک نیاز اساسی برای جامعه انسانی تلقی می شود و به طور کلی، زیرساخت اصلی برای رشد اقتصادی و رفاه اجتماعی محسوب می گردد. شبکه های هوشمند، کلان شهرها را به هم پیوند می دهند و پیشرفت های اجتماعی را با سامانه های اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی در راستای رشد جمعیت ترکیب می کنند. به همین دلیل، توسعه شبکه های ولتاژ بالا باعث افزایش تقاضا برای بهبود عملکرد و قابلیت اطمینان اجزای عایق



Transformer

- Mineral oils
- Silicone oil
- Vegetable oil
- Synthetic ester oil



Capacitor

- Synthetic hydrocarbons
- Vegetable oil
- Organic ester
- Ether



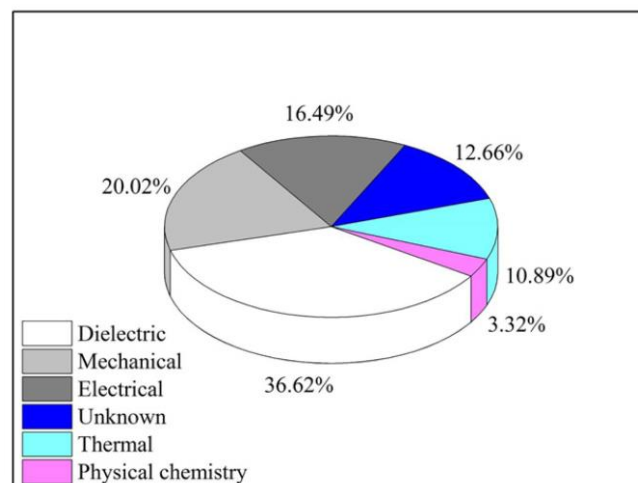
Miscellaneous (CB, Bushing, OLTC etc)

- Paraffin based high density hydrocarbons
- Mineral oil
- Synthetic ester
- Alkylbenzenes

شکل ۲. دسته‌بندی عایق مایع بر اساس کاربرد. انتخاب عایق مایع باید تحت تأثیر محدودیت‌های کاربرد و جنبه‌های تجاری قرار گیرد [۳]

ولتاژ نیز رو به افزایش است که نه تنها به افزایش وزن و حجم تجهیزات قدرت منجر می‌شود بلکه قابلیت اطمینان و امنیت آن‌ها را کاهش می‌دهد. سامانه‌های عایق روغن-کاغذ از ابزارهای معمول در دستگاه‌های الکتریکی به شمار می‌آیند، اما این سامانه‌ها با مشکلات پیری جدی، به خصوص پیری حرارتی ناشی از تنش‌های شدید حرارتی، الکتریکی و مکانیکی روبرو هستند [۴]. از دیرباز، روغن معدنی به دلیل ویژگی‌های حرارتی و عایقی خود به‌عنوان ماده‌ای برای عایق و خنک‌کننده در ترانسفورماتورها مورد استفاده قرار گرفته است. با این حال، روغن معدنی دارای ضعف افزایش خطر آتش‌سوزی یا انفجار در دستگاه‌های قدرت است و به دلیل وجود هیدروکربن‌های آروماتیک چند حلقه‌ای که با معیارهای ایمنی و آتش‌سوزی سازگار نیستند. روغن معدنی که یک محصول فرعی از فرآورده‌های نفتی است، منبعی غیرپایدار و مضر برای محیط زیست محسوب می‌شود. روغن گیاهی که یک دی‌الکتریک مایع سازگار با محیط زیست است، به عنوان جایگزینی جذاب برای روغن معدنی قدیمی در تجهیزات الکتریکی مطرح شده است. با این وجود، برای پاسخ به تقاضای روزافزون برای ولتاژ بالا و اندازه‌های کوچکتر تجهیزات الکتریکی، توسعه روغن ترانسفورماتور با ویژگی‌های دی‌الکتریک و حرارتی برتر ضروری است [۵]. مفهوم نانو سیال^۴ (NF) اولین بار توسط چوی و همکاران در سال ۱۹۹۵ استفاده شد [۶]. نانو سیال به‌عنوان مایعی با ذرات نانو تعریف می‌شود که به طور همگن در چند درصد وزنی پراکنده (معلق)

مطالعات نشان داده‌اند که طول عمر ترانسفورماتورها به شدت به کیفیت سامانه عایق آن‌ها بستگی دارد و واحدهایی که به دلیل عایق ضعیف دچار مشکل می‌شوند، میانگین عمری حدود ۱۷/۸ سال دارند که تقریباً نصف عمر پیش‌بینی شده آن‌ها است [۲]. عمر و قابلیت اطمینان ترانسفورماتورها عمدتاً به کیفیت و ویژگی‌های مواد عایق وابسته است. شکل ۱ منابع اصلی خرابی ترانسفورماتورها را بر اساس ۹۶۴ مورد خرابی مهم نشان می‌دهد. بررسی‌های انجام‌شده در سال ۲۰۱۵ توسط شورای سامانه‌های الکتریکی بزرگ (CIGRE) نشانگر این است که اصلی‌ترین علت خرابی، نقص در سامانه عایق است.



شکل ۱. مهم‌ترین دلایل خرابی ترانسفورماتور [۳].

سامانه عایق کاغذ/ روغن معدنی^۲ (MO) به عنوان ماده اصلی در تجهیزات ولتاژ بالا مانند کابل‌ها، ترانسفورماتورها، خازن‌ها و دیگر تجهیزات، به دلیل مقاومت مکانیکی بالا و ویژگی‌های دی‌الکتریک برتر بسیار مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲). با این حال، نیاز به اندازه کوچکتر، ظرفیت بالاتر و قابلیت اطمینان بیشتر از سوی صنعت برق، ویژگی‌های الکتریکی این سامانه عایقی معمولی را به چالش کشیده است.

در سامانه‌های عایق مبتنی بر MO/کاغذ، تفاوت در نفوذپذیری بین مایع (۲/۲) و جامد (بین ۳/۶ تا ۴/۵) همچنان چالشی اساسی تلقی می‌شود که می‌تواند طراحی فشرده تجهیزات ولتاژ بالا^۳ (HV) را محدود کند، زیرا عایق مایع تحت فشار بیشتری قرار دارد. با افزایش سریع زیرساخت‌های برق، ظرفیت انتقال و سطح

¹ Council on Large Electric Systems

² Mineral oil

³ High voltage

⁴ Nanofluid

خواص حرارتی، الکتریکی و شیمیایی روغن‌های عایق ناشی از افزودن نانوذرات است. برخی از این تاثیرات در جدول ۲ آمده است.

به طور کلی نانوسیالات می‌توانند عمر ترانسفورماتورها را افزایش دهند، اما میزان اثرگذاری آنها به نوع نانوذرات، درصد وزنی، سازگاری با روغن عایق و شرایط عملیاتی بستگی دارد. استفاده از نانوسیالات باید همراه با آزمایش‌های پایلوت و بررسی پایداری بلندمدت انجام شود.

جدول ۱. طول عمر تقریبی ترانسفورماتورها بر اساس نوع عایق بدون در نظر گرفتن نانوسیال

نوع عایق	طول عمر تقریبی (سال)
روغنی (روغن معدنی)	۳۰ تا ۵۰
استری (روغن طبیعی)	۲۰ تا ۴۰
خشک (رزینی - کلاس F)	۲۰ تا ۳۰
خشک (کلاس H - نوارهای Nomex)	۲۵ تا ۴۰
گازی (SF6)	۳۰ تا ۵۰

جدول ۲. تأثیر نانوسیالات بر افزایش عمر ترانسفورماتورها

عامل بهبود یافته	نقش در افزایش عمر
افزایش هدایت حرارتی	کاهش دمای کاری و جلوگیری از تخریب زود هنگام عایق
کاهش تخریب سلولز کاغذ عایقی	جلوگیری از کاهش استقامت دی‌الکتریک عایق
بهبود استقامت دی‌الکتریک روغن	کاهش خطر تخلیه جزئی و شکست عایقی
افزایش پایداری شیمیایی	کاهش اکسیداسیون و تشکیل لجن در روغن
کاهش نرخ تشکیل گازهای تخریبی	کاهش آسیب به سامانه و افزایش قابلیت اطمینان

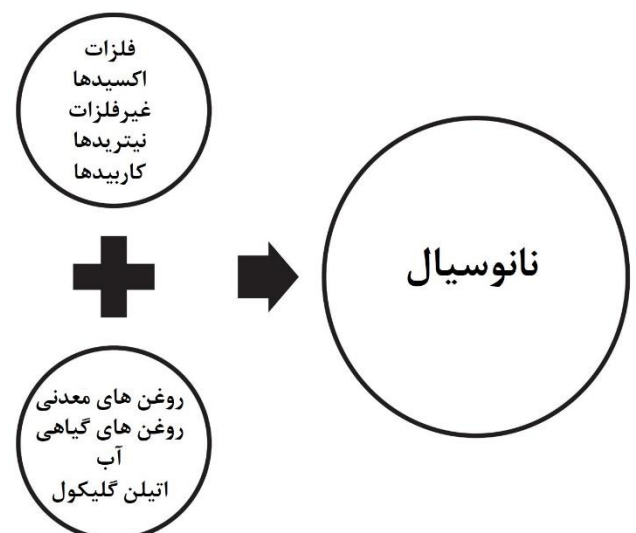
۲- مفاهیم نانو سیال

درک و دانش در زمینه انتقال حرارت در طراحی و تولید فرآیندهای متنوع صنعتی، تجاری و خانگی، مانند تولید و تبدیل انرژی، پردازش شیمیایی، تهویه مطبوع، صنعت نفت و گاز و خنک‌سازی دستگاه‌های الکتریکی، اهمیت زیادی دارد [۹، ۱۰].

هستند. در تحقیقات مربوط به عایق مایع ولتاژ بالا، اصطلاحات نانوسیال برای اشاره به ترکیبات روغن معدنی و نانوذرات برای اهداف خنک‌سازی و عایق‌سازی استفاده می‌شود. این نانوسیالات با داشتن هدایت حرارتی بهبود یافته نسبت به مایعات سنتی، جایگزین مناسبی برای تقویت عملکرد تجهیزات حرارتی به شمار می‌روند. با این حال، افزایش گرانش ناشی از افزودن نانوذرات می‌تواند نقصی در کاربرد نانوسیالات باشد. این مواد در زمینه‌های مختلفی مانند دستگاه‌های انرژی خورشیدی، سینک‌های حرارتی میکروکانال، رادیاتورهای خودرو و در پزشکی استفاده می‌شوند. کاربرد نانوفناوری در مهندسی ولتاژ بالا، عمدتاً بر تولید و شناسایی مواد نانودی‌الکتریک تمرکز دارد. از دهه ۱۹۹۰ تاکنون، نانودی‌الکتریک توجه گسترده‌ای به خود جلب کرده است و تحقیقات نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات می‌تواند عمر عایق پلیمرهای جامد را افزایش دهد. این روش ممکن است برای عایق‌های مایع دی‌الکتریک نیز به کار رود تا ویژگی‌های حرارتی و عایق آن‌ها را بهبود ببخشد. پیش‌تر، ذرات میکرونی در مایعات معلق می‌شدند تا هدایت حرارتی ارتقاء یابد، اما نتایج نشان داد که این امر به کاهش استحکام شکست منجر می‌شود. نتایج نشان داده‌اند که تعلیق نانومواد به طور مؤثری عمر عایق پلیمرهای جامد را افزایش می‌دهد. یک روش مشابه برای بهبود ویژگی‌های حرارتی و عایق‌بندی عایق مایع مورد آزمایش قرار گرفت. نانومواد با هدف بهبود ویژگی‌های حرارتی و عایق‌بندی به روغن ترانسفورماتور اضافه شدند. نتایج تجربی NFS بهبود ویژگی‌های حرارتی [۵] و عایق‌بندی [۷] را نشان دادند. با این حال، در ابتدا از ذرات میکرونی سنتی برای بهبود هدایت حرارتی استفاده می‌شد. عیب اصلی مرتبط با این سیالات توسعه یافته، کاهش قدرت دی‌الکتریک بود [۸]. مشکل دیگری که به ذرات میکرونی مربوط می‌شود این است که آن‌ها تمایل دارند از حالت معلق خارج شوند. طول عمر تقریبی ترانسفورماتورها بر اساس نوع عایق بدون در نظر گرفتن نانوسیال در جدول ۱ آمده است. نکات مؤثر بر عمر ترانسفورماتور عبارتند از دما و تهویه مناسب، کیفیت عایق و روغن، بارگذاری استاندارد، حفظ و نگهداری منظم و میزان آلودگی و شرایط محیطی.

نانوسیالات عایقی می‌توانند تأثیر مثبتی بر عمر مفید ترانسفورماتورها داشته باشند. این تأثیر عمدتاً به دلیل بهبود

بهبود هدایت حرارتی این سامانه‌ها در مهندسی حرارتی به عنوان افزایش انتقال حرارت شناخته می‌شود. در دهه گذشته، روش‌های مختلفی برای افزایش انتقال حرارت معرفی شده‌اند. تحقیقات نشان داده که هدایت حرارتی جامدات چندین برابر بیشتر از مایعات سنتی نظیر روغن، آب یا گلیکول اتیلن است. تعلیق ذرات در یک سیال می‌تواند هدایت حرارتی مؤثر سیال را افزایش دهد. با پیشرفت نانو فناوری و به‌کارگیری آن برای بالا بردن کارایی دستگاه‌ها، مایعی نوآورانه به نام نانوسیال (NF) توسعه یافته است. این مایع با ترکیب مایع پایه‌ای با هدایت حرارتی کم و نانوذرات جامدی با هدایت حرارتی بالا ساخته شده است. این ویژگی باعث شده تا نانوسیال نسبت به مایعات پایه، ویژگی‌های انتقال بهتری داشته باشند [۱۱، ۱۲]. NF شامل مایعی است که ذرات به اندازه نانومتر به‌طور یکنواخت در آن توزیع شده‌اند و یک محلول کلوئیدی از نانوذرات در مایع پایه ایجاد می‌کنند. نانوذرات معمولاً از موادی مانند فلزات (طلا، مس، آلومینیوم، آهن)، اکسیدها (Al_2O_3 ، CuO ، SiO_2 ، TiO_2)، غیر فلزات (نانولوله‌های کربنی، گرافن)، نیتريد های فلزی (AlN ، SiN)، کاربیدهای فلزی (SiC) یا نانولوله‌های کربنی تشکیل می‌شوند و مایعات پایه شامل روغن، آب و گلیکول اتیلن هستند [۱۰، ۱۳، ۱۴] (شکل ۳). نانو سیال ویژگی‌های جدیدی را ارائه می‌دهند که آن‌ها را برای استفاده در کاربردهای مختلف انتقال حرارت مانند میکروالکترونیک، مدیریت حرارتی وسایل نقلیه، مبدل‌های حرارتی، یخچال‌ها و کاهش دمای گازهای دودکش بویلر مناسب می‌سازد.



شکل ۳. شمایی از توسعه نانو سیال

چوی و همکاران اصطلاح "نانو سیال" را برای توصیف معلق کردن نانوذرات (NPs) در سیال پایه معرفی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که معلق کردن NPs در مایع پایه هدایت حرارتی آن را بهبود می‌بخشد. تمایل به تحقیقات NFs از افزایش تقاضای مهندسان برای طراحی یک سامانه عایق پیشرفته ناشی شد که بتواند خنک‌کنندگی لازم را ارائه دهد و قادر به تحمل سطوح ولتاژ بالا (HV) باشد، به عنوان مثال، برای کاربردهای جریان متناوب با ولتاژ بالا (HVAC) و جریان مستقیم با ولتاژ بالا (HVDC). با وجود این، HVAC از دهه ۱۸۸۰ در سراسر جهان به کار گرفته شده است در حالی که سامانه انتقال HVDC در دهه ۱۹۵۰ توسعه یافته است. در حال حاضر به منظور مقابله با تقاضای روزافزون جهانی برای برق، سامانه‌های انتقال HVDC متعددی وجود دارند و به عنوان جزء حیاتی شبکه برق در نظر گرفته می‌شوند. سطوح ولتاژ AC و DC پیش‌بینی می‌شود که، بیشتر افزایش یابد. متأسفانه، سامانه عایق فعلی دارای عملکرد الکتریکی و حرارتی محدودی است و به همین دلیل، تقاضای بالایی برای حل مسائل حرارتی، الکتریکی، مکانیکی و اقتصادی وجود دارد [۱۵]. به عنوان مثال، یک سامانه عایق حرارتی کارآمد ممکن است با معلق کردن ذرات میکرونی در عایق مایع سنتی توسعه یابد تا ترکیبی از ویژگی‌های هر دو ذرات جامد و مایع پایه را به دست آورد. معلق کردن ذرات میکرونی، به رغم بهبود ویژگی‌های حرارتی (هدایت حرارتی)، همچنین باعث ایجاد نقص‌های بیشتری در سامانه عایق کلی می‌شود.

برعکس، انتظار می‌رود که معرفی نانوذرات به عایق مایع سنتی، ویژگی‌های خنک‌کنندگی و عایق‌بندی سامانه عایق را با در نظر گرفتن اصول اقتصادی و حرارتی بهبود بخشد. این بهبود به دلیل اندازه کوچک NPs است که در نتیجه منجر به ایجاد یک سطح تماس بزرگ می‌شود [۱۶]. به همین دلیل، پیش‌بینی می‌شود که NFs ویژگی‌های دی الکتریک منحصر به فردی را ارائه دهند که به طور قابل توجهی با میکروسیال‌های سنتی قبلی متفاوت است. این بهبود منحصر به فرد در ویژگی‌ها که ناشی از NPs است، منجر به ایجاد یک کلاس نوآورانه از مایعات شده است که ممکن است هم ویژگی‌های الکتریکی و هم حرارتی را ارائه دهد. در واقع، پروژه‌های تحقیقاتی متعددی برای بررسی چشم‌انداز و پتانسیل‌های NFs به عنوان عایق مایع نسل بعدی برای

سامانه‌های انتقال برق AC و DC آغاز شده است. در دو دهه اخیر، NFs به دلیل ویژگی‌های استثنایی و منحصر به فرد خود توجه زیادی را جلب کرده‌اند. این مقاله نه تنها بینش‌هایی در مورد درک ویژگی‌های حرارتی NFs مبتنی بر روغن ترانسفورماتور (TO) ارائه می‌دهد، بلکه جزئیات کاملی از چالش‌ها و فرصت‌های پیش روی آن‌ها را نیز تأمین می‌کند. علاوه بر این، خلاصه‌ای از مزایا، معایب و کاربردهای بالقوه این NFs را نیز ارائه می‌دهد [۱۲]. مزایا و معایب مرتبط با NPs و NFs بصورت خلاصه در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. مزایا و معایب مرتبط با نانوذرات (NPs) و نانوسیالات (NFs)

۳- سنتز نانوسیالات

نانوسیالات به طور گسترده‌ای به عنوان حامل‌های حرارتی در نیروگاه‌ها، سامانه‌های سرمایش و گرمایش ساختمان‌ها، تهویه مطبوع خودروها و سامانه‌های خنک‌کننده کارخانه‌های فرآوری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۷]. فرآیند ساخت نانوسیالات با ترکیب مستقیم مایع پایه با نانوذرات آغاز می‌شود. دو روش اصلی برای تولید این سیالات وجود دارد: روش یک‌مرحله‌ای و دو

مرحله‌ای که در جدول ۳ آمده است [۱۸]. نانوذرات با استفاده از فرآیندهای مختلفی تولید می‌شوند؛ از جمله تجزیه حرارتی، روش‌های فتوشیمیایی، کاهش الکتروشیمیایی نمک‌های فلزات انتقالی و سنتز الکتروشیمیایی. برای جلوگیری از آگلومراسیون و رسوب، پیشنهاد می‌شود از خشک کردن و حمل و نقل نانو سیالات اجتناب شود. روش یک‌مرحله‌ای شامل استفاده از کندوپاش^۶ مغناطیسی است که نانوذرات را به سطح یک فیلم مایع با فشار بخار پایین هدایت می‌کند و در سیال پایه حاوی مواد فعال سطحی فرو می‌برد. این روش بیشتر برای تولید نانوسیالات در مقیاس کوچک مناسب است، در حالی که روش دو مرحله‌ای برای تولید انبوه به کار می‌رود. با این حال، انتخاب روش به عواملی مانند نوع نانو مواد، غلظت و اندازه ذرات بستگی دارد [۱۹]. فکر پراکندگی نانوذرات در مایع در ابتدا توسط کبلنسکی و همکاران مطرح شد که به دنبال بهبود ویژگی‌های حرارتی سوسپانسیون حاوی ذرات میکرو و میلی‌متری بودند [۲۰]. پراکندگی و جداسازی صحیح نانو مواد، جنبه مهمی در تولید نانوسیالات است و مستلزم از بین بردن آگلومراسیون و لایه برداری آن‌ها است. این فرآیند سنتی با چالش‌هایی مانند جداسازی فازی و تجمع ذرات مواجه است. بنابراین، انواع مختلف نانو مواد نیاز به روش‌های پایداری متناسب با ساختار شیمیایی و پیوندهای خود دارند. جدول ۴ مقایسه روش‌های پراکندگی مختلف را که توسط محققان جهانی استفاده شده‌اند، ارائه می‌دهد [۲۱]. به‌طور کلی، شش روش ذاتی مختلف برای معلق کردن وجود دارد که می‌توان از آن‌ها برای دستیابی به پراکندگی یکنواخت ذرات و توسعه روش‌های ساده اما مؤثر بهره گرفت. حمام و پروب اولتراسونیک از روش‌های مشابهی برای تعلیق استفاده می‌کنند، جایی که انرژی اولتراسونیک به نمونه اعمال

جدول ۳. روش‌های استفاده شده برای تولید نانوسیالات [۱۸]

روش تولید نانوسیال	نوع روش
روش تولید نانوسیال اسپاترینگ مغناطیسی	روش تک مرحله‌ای
تبخیر مستقیم رسوب گذاری شیمیایی	
چگالش بخار شیمیایی	
حمام التراسونیک	روش دو مرحله‌ای
التراسونیک مختل کننده	
هموژنایزر فشار بالا	

^۶ Sputtering

^۵ Transformer oil

جدول ۴. ابزارهای پراکندگی برای نانوسیالات [۲۱]

معايب	مزایا	اصل عملکرد	ابزارهای معلق کردن
روش کند/غیرکارآمد - آسیاب گلوله‌ای ممکن است در برخی موارد روزها طول بکشد؛ می‌تواند تمیز کردن آن دشوار باشد؛ احتمال آلودگی بالا	مناسب برای مقیاس‌های بالای تولید	شامل فرآیند سنگ‌زنی فوق‌العاده ریز	آسیاب‌ها (شامل آسیاب‌های گلوله‌ای، هم‌زن، و آسیاب‌های گریز از مرکز و جت)
غیرکارآمد؛ اغلب برای بهبود یکنواختی پراکندگی به کار می‌رود	به ندرت منجر به تخریب یا شکستن نانوذرات می‌شود؛ ارزان/مقرون‌به‌صرفه	از میله مغناطیسی یا همزن بالاسری استفاده می‌کند؛ دارای سرعت چرخشی برای ایجاد گردابه	هم‌زدن (هم‌زدن مغناطیسی/همزن بالاسری)
احتمال آلودگی فلزی	مناسب برای نمونه‌های مایع با ابعاد بزرگ تا ۲۵۰۰ میلی‌لیتر	استفاده از روتور و استاتور پروب مولد؛ روتور به عنوان پمپ گریز از مرکز برای گردش مایع عمل می‌کند و جامدات را از طریق مولد به حالت معلق در می‌آورد	هموژنیزر با سرعت بالا
ساختار نانوذرات می‌تواند تغییر کند؛ احتمال افزایش دما در پراکندگی بالا؛ گران‌قیمت	بسیار کارآمد	ایجاد برش و کاویتاسیون از طریق افزایش سرعت جریان مایع تحت فشار در میکروکانال‌ها	هموژنیزر با فشار بالا
هر دو روش (حمام) نسبت به روش پروب اثربخشی کمتری دارند (نیروی برش کمتر) نوک پروب ممکن است نمونه‌ها را آلوده کند؛ می‌تواند ساختار نانوذرات را تغییر دهد؛ احتمال افزایش دما در پراکندگی حتی برای چند دقیقه بسیار بالا	ارزان/مقرون‌به‌صرفه	استفاده از امواج التراسونیک و کاویتاسیون در حمام	حمام سونیکیت التراسونیک
	بسیار کارآمد	مشابه حمام التراسونیک است اما هدف آن رساندن چگالی انرژی بیشتر در حجم کمتری نسبت به فرمت حمام مشابه است	سونیکیت کردن پروب التراسونیک یا تخریب‌کننده التراسونیک

چالش‌های اصلی در پراکندگی نانوسیالات، دستیابی به پایداری طولانی‌مدت است [۲۵]. نانوسیالات به دلیل حرکت براونی شدید ذرات بسیار پایدارتر از ذرات میکرو هستند. تحقیقات زیادی برای حفظ پایداری در عین کارکرد به عنوان عایق حرارتی انجام شده است. یکی از روش‌های موثر، استفاده از مواد فعال سطحی (سورفاکتانت) چون سدیم دودسیل سولفات (SDS) و صمغ عربی است که تجمع ذرات را با کاهش نیروهای جاذبه وان‌دروالس کم می‌کند [۲۶]. با این حال، کتیار و همکاران [۲۷] تأکید دارند که سورفاکتانت تأثیر کمی بر گرانبوی، هدایت حرارتی و ولتاژهای شکست دارد. همچنین، ژوان و همکاران نشان داده‌اند که سورفاکتانت سدیم دودسیل بنزوئیک سولفات (SDBS) می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد انتقال حرارت نانوسیالات داشته باشد. لایه نازک SDBS روی سطح، مانع از انتقال حرارت مناسب می‌گردد [۲۸]. گزارش‌ها انواع مختلف سورفاکتانت‌ها و روش‌های پراکندگی نانو مواد در روغن ترانسفورماتور را بررسی کرده‌اند. بیشتر محققان اسید اولئیک را برای ارتقاء پراکندگی در روغن ترانسفورماتور پیشنهاد داده‌اند. اما مصرف اضافی سورفاکتانت ممکن است زنجیره دوگانه‌ای در اطراف نانوذرات ایجاد کند که کارایی سورفاکتانت را کاهش دهد.

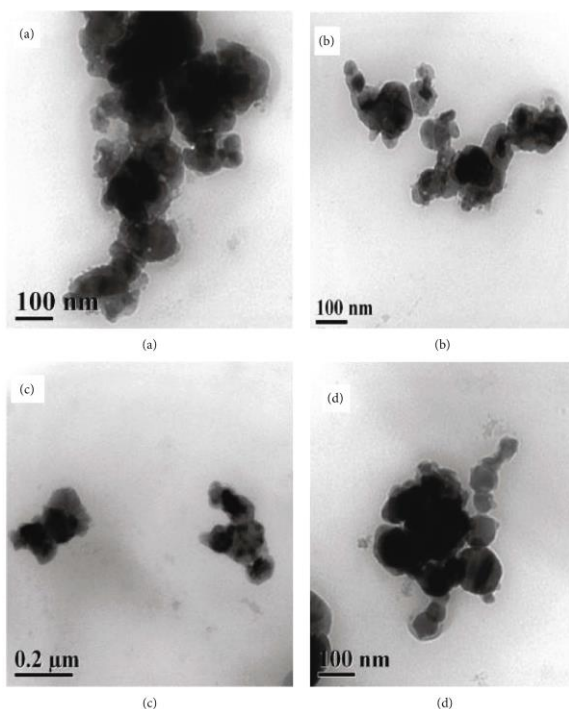
می‌شود [۲۲]. با این حال، در اثربخشی، کارایی، قابلیت‌های فرآیندی و پایداری بین این دو روش تفاوت‌هایی وجود دارد. پروب اولتراسونیک برای اکثر مطالعات مناسب‌تر است زیرا می‌تواند چگالی انرژی بیشتری را به حجم‌های کوچک نمونه‌ها اعمال کند. همگنی نانوسیالات احتمالاً تحت تاثیر زمان، فرکانس، دما و قدرت اعمال شده توسط سونیکاتور قرار دارد؛ با این وجود، پارامترهای بهینه برای پراکندگی نانوذرات در مایعات همچنان مشخص نشده است. به گفته کول و دی، افزایش زمان التراسونیک لزوماً اندازه ذرات را کاهش نمی‌دهد، بلکه می‌تواند منجر به افزایش اندازه آن‌ها شود. در این تحقیق، از پراش نور دینامیکی برای تخمین اندازه نانوذرات ZnO در اتیلن گلیکول در برابر مدت زمان التراسونیک استفاده شده است و نتایج در شکل ۵ نمایش داده شده‌اند [۲۳].

اندازه خوشه‌های نانوذرات به سرعت طی ۴ تا ۶۰ ساعت کاهش می‌یابد و پس از ۱۰۰ ساعت سونیکاسیون به ۲۲۰ نانومتر افزایش می‌کند (شکل ۶). این تغییر به دلیل ایجاد حفره‌های صوتی توسط دستگاه التراسونیک است که نیروی برشی قوی ایجاد می‌کند و می‌تواند تجمع نانوذرات را بشکند. با بهبود نرخ‌های نفوذ، می‌توان پراکندگی‌های یکنواختی از ذرات نانومتری تولید کرد [۲۴]. یکی از

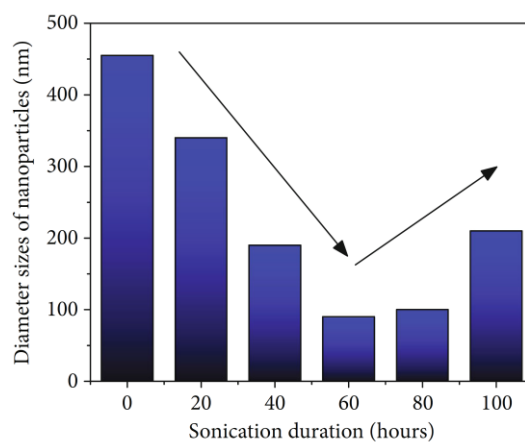
نسازند، تایید شد. تنوع سورفاکتانت‌ها نتایج متفاوتی در خصوص ویژگی‌هایی مثل چگالی، گرانبوی، هدایت حرارتی و پایداری فراهم می‌کند. در نهایت، استاندارد قطعی برای پراکندگی نانومواد سیال وجود ندارد. اطلاعات متناقضی درباره روش بهینه تهیه نانوسیالات برجای مانده که به نوع نانومواد، سازگاری با مایع پایه، غلظت‌ها و روش پراکندگی بستگی دارد، یعنی آماده‌سازی نمونه تأثیر بنیادی بر جلوگیری از تجمع و عدم پایداری دارد. جدول ۵ خلاصه‌ای از کارهای انجام شده با استفاده از روش سونیکیت کردن را نشان می‌دهد.

جدول ۵. روش سونیکیت کردن [۳۳-۳۸]

مدت زمان سونیکیت	مدت زمان هم زدن مغناطیسی	سورفاکتانت	انواع روغن	نانومواد
۲ ساعت	۳۰ دقیقه	سوربیتان مونو اولئات	روغن معدنی	ZnO, BaTiO ₃ , TiO ₂ (>۱۰۰ نانومتر)
۳ ساعت	۱۵ دقیقه	ستیل تری متیل آمونیوم برومید	روغن معدنی	TiO ₂
۲ ساعت	۳۰ دقیقه	سپین ۸۰، عامل جفت‌کننده سیلان Z6011	روغن معدنی	SiO ₂ , TiO ₂
۲ ساعت	-	هگزا دسیل تری متیل آمونیوم برومید	روغن معدنی	Fe ₃ O ₄
۲ ساعت	۲۰ دقیقه	اسید اولئیک	FR3	Fe ₂ O ₃
۵۰ دقیقه	-	بنزتونیوم کلراید (BZC)، بنزالکونیوم کلراید (BAC) CTAB	بنزتونیوم کلراید (BZC)	SiO ₂ (۱۵ نانومتر)



شکل ۵. تصویر TEM نانو سیال ZnO پس از (الف) ۴ ساعت، (ب) ۱۲ ساعت، (ج) ۶۰ ساعت و (د) ۱۰۰ ساعت سونیکیت کردن [۳۳].



شکل ۶. اندازه خوشه نانو سیال ZnO در زمان‌های مختلف التراسونیک [۳۳].

۴-ویژگی‌های حرارتی، الکتریکی و فیزیکی-شیمیایی

درک حقایق مربوط به ویژگی‌های دی‌الکتریک و ترموفیزیکی یک سامانه حرارتی که با نانو سیال کار می‌کند، برای ارزیابی عملکرد آن بسیار حیاتی است. این ویژگی‌ها به شدت به میزان نانوذرات پراکنده شده در مایع پایه بستگی دارند. با نادیده گرفتن ویژگی‌های ترموفیزیکی نانوسیالات به صورت سامانه‌های یا

زکریا و همکاران [۲۹] معتقدند که بهتر است نانوذرات قبل از ترکیب با روغن معدنی و سورفاکتانت تحت فرآیند پلازما قرار گیرند. دسوکی و همکاران [۳۰] از تابش مادون قرمز بعد از التراسونیک برای حذف رطوبت استفاده کردند. شوکلا و آبیر [۳۱] نشان دادند که مخلوط SiO₂ و روغن معدنی می‌تواند زمان‌های پراکندگی متفاوت را نسبت به غلظت‌ها ایجاد کند. این یافته توسط کراجنیک و همکاران [۳۲] که اعلام کردند افزودن سورفاکتانت می‌تواند زمان پراکندگی را کاهش دهد اما ممکن است همه مولکول‌های سورفاکتانت پیوند مؤثری با نانوذرات

از نانوسیالات مورد استفاده در ترانسفورماتورها را نمایش می‌دهد. این داده‌ها معمولاً بر اساس تحقیقات آزمایشگاهی جمع آوری شده که در ادامه با جزئیات ارائه خواهد شد و بسته به ترکیب و شرایط می‌توانند متفاوت باشند.

در تصاویر گرافیکی ارائه شده در شکل ۷، نمای کلی از ویژگی‌های ترموفیزیکی و الکتریکی نانوسیالات به نمایش گذاشته شده است. ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی عایق مایع از اهمیت بالایی برخوردارند زیرا به اجرای مؤثر وظایف عایق‌بندی و خنک‌کنندگی کمک می‌کنند. در بخش بعد، یک توضیح کلی از ویژگی‌های فیزیکی و حرارتی عایق مایع ترانسفورماتور ارائه خواهد شد.

۴-۱- گرانروی

گرانروی روغن به عنوان معیاری از مقاومت در برابر نرخ برش شناخته می‌شود و به مقاومت در برابر حرکت جریان پیوسته نیز اشاره دارد. گرانروی مایع عایق تأثیر مستقیمی بر خنک‌سازی ترانسفورماتور دارد و بررسی آن برای تعیین ویژگی‌های مایع عایق بسیار ضروری است. اکسیداسیون در عایق مایع باعث شروع فرآیند تخریب و افزایش گرانروی می‌شود. اگر گرانروی بالاتر باشد، نشان‌دهنده مقاومت بیشتر در مقابل جریان است و در مقابل، گرانروی پایین‌تر به معنای مقاومت کمتر است. این ویژگی بر ظرفیت انتقال حرارت از طریق هدایت

تجربی، فرض بر این است که نانوذرات به‌طور همگن در مایعات پایه پراکنده شده‌اند. چوی نانوسیالاتی را برای تبادل حرارت در اوایل دهه ۱۹۹۰ توسعه داد که به عنوان جایگزینی چشمگیر برای روغن ترانسفورماتور سنتی با ویژگی‌های حرارتی برجسته شناخته شد. این نانوسیالات دارای ویژگی‌های متعددی از جمله هدایت حرارتی، چگالی، ظرفیت حرارتی ویژه و گرانروی هستند. افت فشار و ضریب انتقال حرارت نیز باید مورد توجه قرار گیرند. ویژگی‌های حرارتی به طور عمده تحت تأثیر برخی خصوصیات فیزیکی مانند اندازه، شکل، غلظت و نوع سورفکتانت نانوذرات قرار دارند. هدایت حرارتی یک مایع ارتباط مستقیم با ظرفیت انتقال حرارت آن دارد، در حالی که گرانروی به افت فشار، جریان و قدرت پمپاژ در انتقال نانوذرات مربوط می‌شود [۳۹]. هدایت حرارتی نانوسیالات بسته به نوع، اندازه، شکل و غلظت نانوذرات تغییر می‌کند. گرانروی همچنین تحت تأثیر قدرت یونی مایع پایه، pH محلول و نیروهای وان‌دروالس و دافعه‌ای نانوذرات قرار می‌گیرد [۴۰]. اضافه کردن سورفکتانت‌ها باید با احتیاط انجام شود، زیرا مقدار زیاد آن‌ها می‌تواند اثر منفی بر گرانروی، پایداری و ویژگی‌های حرارتی بگذارد. نانوذرات ممکن است تمایل به آگلومراسیون در مایع داشته و در نهایت قطر آن‌ها افزایش یافته و گرانروی کل نیز بالا برود. عوامل دیگری مانند مایع پایه و دمای کاری نیز باید در هنگام تحلیل ویژگی‌های ترموفیزیکی در نظر گرفته شوند [۴۱]. جدول ۶ مشخصات الکتریکی و رسانایی برخی

جدول ۶. خواص الکتریکی و رسانایی نانوسیالات در ترانسفورماتورها

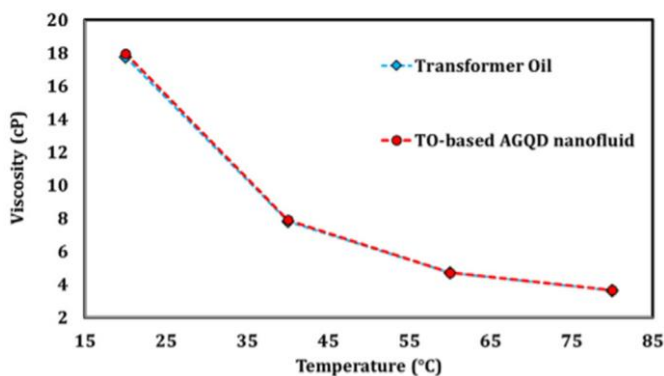
نانوسیال	تحرك یونی (cm ² /V·s)	مقاومت ویژه (Ω·m)	استحکام شکست دی‌الکتریک (kV/mm)	ثابت دی‌الکتریک (ε _r)	ضریب هدایت حرارتی (W/m.K)
روغن معدنی خالص	کم	۱۰ ^۹ -۱۰ ^{۱۲}	۱۰-۱۵	۲/۲-۲/۳	۰/۱۲-۰/۱۴
روغن معدنی + نانو Al ₂ O ₃	متوسط	۱۰ ^۸ -۱۰ ^{۱۱}	۱۵-۲۰	۲/۵-۳/۰	۰/۱۵-۰/۱۸
روغن معدنی + نانو TiO ₂	متوسط	۱۰ ^۸ -۱۰ ^{۱۱}	۱۸-۲۲	۳/۰-۳-۵	۰/۱۶-۰/۱۹
روغن معدنی + نانو SiO ₂	کم	۱۰ ^۹ -۱۰ ^{۱۲}	۱۶-۲۱	۲/۸-۳/۲	۰/۱۴-۰/۱۷
روغن استری + نانو Al ₂ O ₃	بالا	۱۰ ^۷ -۱۰ ^{۱۰}	۲۰-۲۵	۳/۵-۴/۰	۰/۱۷-۰/۲
روغن طبیعی + نانو ZnO	بالا	۱۰ ^۷ -۱۰ ^۹	۲۲-۲۷	۳/۸-۴/۵	۰/۱۸-۰/۲۲

معدنی پایه است [۴۶]. تحقیقات لیا و همکاران [۴۰] نیز نشان داد که با افزایش غلظت، گرانروی دینامیکی افزایش می‌یابد، اما این اثر در نرخ‌های برش بالا ناچیز است. همچنین تاها-تجیرینا و همکاران تأثیر جزئی نانوذرات نیتريد بور بر گرانروی تا غلظت معینی را مشاهده کردند، اما با افزایش بیشتر غلظت، اثر افزایش گرانروی مشهود بود [۴۷]. قینگ و همکاران نیز مباحث مشابهی را در مورد نانوسیالات هیبریدی مطرح کردند [۴۸].

۴-۱-۱-۲- تأثیر دما

گرانروی نانوسیالات تحت تأثیر دما قرار دارد و معمولاً با افزایش دما کاهش می‌یابد. تحقیقات تاها-تجیرینا [۴۷] و همکاران کاهش گرانروی را با افزایش دما تا ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده کردند. پژوهش لیا و همکاران [۴۰] درباره نانوسیالات مبتنی بر روغن معدنی نشان داد که گرانروی با افزایش دما و کاهش نیروهای جاذبه بین مولکولی کاهش می‌یابد. آنها بیان کردند که تغییرات در گرانروی در نرخ‌های برش مختلف و دامنه دمایی ۲۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد بسیار کم است. در نهایت، امیری و همکاران گرانروی روغن ترانسفورماتور خالص و نانوسیال را به عنوان تابع دما بررسی کردند (شکل ۸).

گرانروی نانوسیالات تحت تأثیر ویژگی‌های فیزیکی نانوذرات معلق، از جمله نوع، اندازه و شکل قرار دارد. تحقیقات تجربی انجام شده توسط محققان نشان می‌دهد که با کاهش اندازه نانوذرات، گرانروی افزایش می‌یابد. همچنین، همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، شکل نانوذرات به‌طور قابل توجهی بر گرانروی نانوسیالات تأثیرگذار است.



شکل ۸. تأثیر دما بر گرانروی روغن ترانسفورماتور و نانوسیال [۴۹].



شکل ۷. تصاویر گرافیکی از نمای کلی ویژگی‌های ترموفیزیکی و الکتریکی نانوسیالات

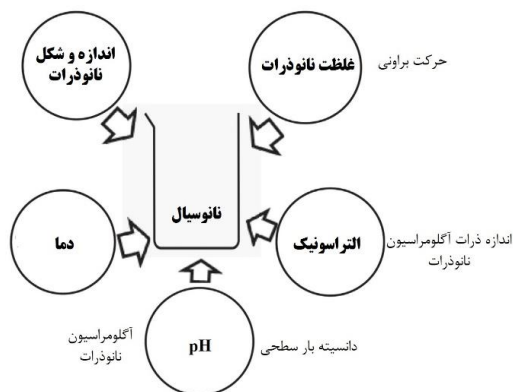
نیز تأثیرگذار است. در تجهیزات ولتاژ بالا (HV)، خنک‌سازی از طریق هدایت از اهمیت بالایی برخوردار است و افزایش گرانروی منجر به بالا رفتن دمای نقاط داغ می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که گرانروی نانوسیالات با استفاده از نانوذرات مس، با افزایش دما کاهش و با افزایش غلظت نانوذرات افزایش می‌یابد، اما همچنان بیش از مایع پایه است [۴۲].

۴-۱-۱-۱- عوامل مؤثر بر گرانروی نانوسیال

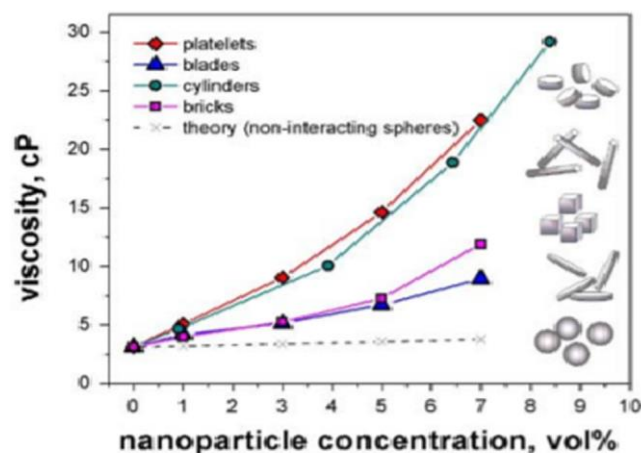
یافته‌های تحلیل نشان داده‌اند که گرانروی نانوسیالات متأثر از عواملی مختلف مانند دما، نرخ برش، میزان نانوذرات، روش سنتز، شکل و اندازه نانوذرات است [۴۳، ۴۴]. در این بخش، پارامترهای مؤثر بر گرانروی به صورت مختصر بررسی شده‌اند.

۴-۱-۱-۱- غلظت نانوذرات

تحقیقات نشان داده‌اند که افزایش غلظت نانوذرات باعث افزایش گرانروی نانوسیالات می‌شود. برای مثال، فونتس و همکاران [۴۵] نانوسیالاتی با نانوذرات چند جداره کربنی در روغن ترانسفورماتور با غلظت‌های مختلف تهیه کردند و متوجه شدند که گرانروی با افزایش میزان نانوذرات به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. نانوسیالی با غلظت بهینه ۲۵ درصد، گرانروی بیشتری نسبت به روغن پایه نشان داد. جین و همکاران با بارگذاری نانوذرات سیلیکا دریافتند که گرانروی این نانوسیالات تقریباً برابر با روغن



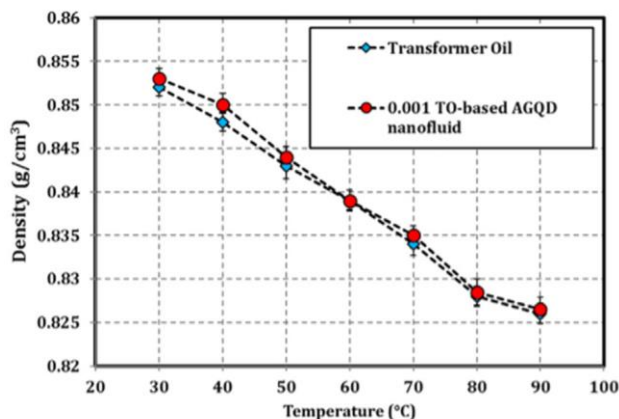
شکل ۱۰. شمایی از مکانیسم‌های کلیدی تأثیرگذار بر گرانیوی نانوسیالات.



شکل ۹. گرانیوی نانوسیالات آلومینا به عنوان تابعی از غلظت و اشکال نانوذرات [۵۰].

۴-۳- چگالی

چگالی یکی از مهم‌ترین عواملی است که با دما تغییر می‌کند. تنها چند تحقیق در مورد چگالی مایع با توجه به غلظت نانوذرات و دما انجام شده است. به عنوان مثال، لیا و همکاران [۵۰] چگالی نانوسیالات مبتنی بر TO که با نانوذرات آلومینا اضافه شده بود را با استفاده از یک مدل نظری که توسط پک و چو پیشنهاد شده بود [۵۱]، پیش‌بینی کردند. نتایج به دست آمده در غلظت‌های پایین نانوذرات با نتایج تجربی همخوانی داشت. مشاهده شد که چگالی با معلق کردن نانوذرات افزایش می‌یابد و با افزایش دما کاهش می‌یابد. امبری و همکاران نتیجه‌گیری کردند که چگالی نانوسیالات مبتنی بر TO که با نقاط کوانتومی گرافن مبتنی بر آمین تهیه شده‌اند، با افزایش دما به دلیل انبساط حرارتی روغن کاهش می‌یابد، همان‌طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. اما همچنان تحقیقات بیشتری برای ارزیابی تأثیر اندازه، نوع و غلظت نانوذرات بر چگالی نانوسیالات مورد نیاز است.



شکل ۱۱. چگالی نانوسیالات مبتنی بر AGQD و روغن خالص [۴۹].

۴-۲- اصلاح سطح نانوذرات

تغییرات در گرانیوی نانوسیالات به نحوه اصلاح سطح نانوذرات بستگی دارد. استفاده بیش از حد سورفکتانت می‌تواند اثرات منفی بر گرانیوی، ویژگی‌های حرارتی و پایداری شیمیایی داشته باشد، بنابراین کنترل دقیق مقدار مصرفی آن بر روی نانوذرات ضروری است [۴۷].

۴-۲-۱- روش‌های پراکندگی نانوذرات

روش‌های پراکندگی نانوذرات نیز نقشی تعیین‌کننده در گرانیوی نانوسیالات دارند. افزون بر این، عواملی مانند مدت زمان فراصوت نیز بر گرانیوی اثرگذارند. پراکنده نمودن نانوذرات در روغن ترانسفورماتور می‌تواند موجب افزایش گرانیوی گردد، اما با افزایش دما این گرانیوی کاهش می‌یابد. افزایش غلظت نانوذرات می‌تواند باعث افزایش گرانیوی شود، زیرا تشکیل خوشه‌هایی که با نیروهای جاذبه به هم متصل هستند، جریان نانوسیالات را مختل می‌کند و برای غلبه بر مقاومت ذاتی نیاز به انرژی بیشتری دارد [۴۸]. با این حال، دمای بالا موجب کاهش گرانیوی به دلیل افزایش سرعت حرکت براونی نانوذرات می‌شود، زیرا انرژی اضافه لازم است تا پیوندهای مولکولی را تضعیف کرده و مقاومت داخلی را کاهش دهد. گرانیوی کمتر برای نانوسیالات مناسب‌تر است زیرا مایع به راحتی جریان پیدا می‌کند. تصویری از مکانیسم‌های کلیدی که بر گرانیوی تأثیر دارند در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

چگالی نانوسیالات تحت تأثیر غلظت نانوذرات و دما تغییر می‌کند. با افزایش غلظت نانوذرات، چگالی افزایش می‌یابد، اما با بالا رفتن دما، حجم مایع گسترش یافته و چگالی کاهش می‌یابد. پراکنده کردن نانوذرات در روغن ترانسفورماتور می‌تواند ویژگی‌های انتقال حرارت را تحت تأثیر قرار دهد؛ این برتری بسته به افزایش چگالی که به جاذبه طبیعی ناشی از شناوری وابسته است، ممکن است محدود شود. بنابراین، برای بررسی دقیق‌تر تأثیر پراکنده‌سازی نانوذرات بر روی چگالی نانوسیالات، تحقیقات بیشتری لازم است.

۴-۴- هدایت حرارتی

هدایت حرارتی نشان‌دهنده قابلیت یک ماده برای انتقال گرماست و نقشی حیاتی در ارزیابی عملکرد عایق مایع در انتقال حرارت دارد. یک عایق مایع با هدایت حرارتی بالا به‌عنوان خنک‌کننده‌ای کارآمد برای تجهیزات ولتاژ بالا عمل می‌کند. در ترانسفورماتورهای قدرت، مایع دی الکتریک نه تنها وظیفه عایق‌بندی بلکه پراکنده‌گری گرما را نیز برعهده دارد. معمولاً منبع اصلی گرما در ترانسفورماتور از تلفات هسته و سیم‌پیچ سرچشمه می‌گیرد که به گرما تبدیل و باعث افزایش دما می‌شود [۵۲]. این افزایش دما، فرآیند پیری مواد عایق را تسریع و عمر مفید ترانسفورماتور را کاهش می‌دهد. بنابراین، بهبود قابلیت عایق و عملکرد انتقال حرارت برای کاهش ابعاد ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا ضروری است. هدایت حرارتی یکی از عوامل کلیدی برای بهبود انتقال حرارت در مایعات عایق است و پیشنهاد می‌شود مایعی با هدایت حرارتی بالا انتخاب شود. برای ارتقای هدایت حرارتی عایق‌ها، روش‌های مختلفی ابداع شده که یکی از آن‌ها، تعلیق نمودن نانوذرات در روغن برای بهینه‌سازی عملکرد حرارتی ترانسفورماتور است. مطالعات متعددی روی هدایت حرارتی نانوسیالات انجام شده و نشان داده‌اند که یک مایع مناسب برای انتقال حرارت باید دارای هدایت حرارتی بالا و گرانیروی پایین باشد. با توجه به اینکه هدایت حرارتی روغن‌های معدنی معمولاً پایین است، امکان افت حرارتی بیشتری در شرایط بارگذاری موقتی وجود دارد. بنابراین، بهبود هدایت حرارتی روغن معدنی برای افزایش عمر ترانسفورماتور و ارتقاء سامانه خنک‌کنندگی بسیار مهم است. یک روغن ترانسفورماتور باید علاوه بر

ویژگی‌های عایق‌بندی مطلوب، هدایت حرارتی بالا و گرانیروی کمی داشته باشد تا جریان پیوسته و پراکنده‌گری گرما را تسهیل کند. پراکنده‌گری نانوذرات در روغن برای افزایش هدایت حرارتی می‌تواند مزایای زیادی از جمله نرخ خنک‌کنندگی بالا، کاهش نیاز به انرژی پمپاژ و مقاومت بیشتر در برابر سایش به همراه داشته باشد. این ویژگی‌ها موجب شده تا محققان به طور ویژه‌ای بر روی خصوصیات انتقال حرارت نانوسیالات تمرکز کنند. هدایت حرارتی این مایعات با افزایش میزان نانوذرات بهبود می‌یابد و افزودن نانوذرات سیلیکا و آلومینا تأثیر مثبتی بر این ویژگی داشته است [۵۳].

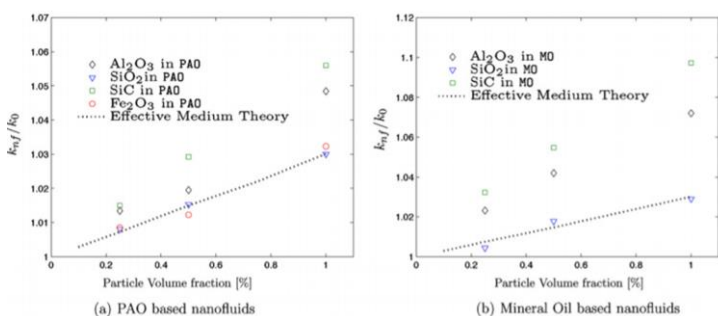
۴-۴-۱- عوامل مؤثر بر هدایت حرارتی

تحقیقات تجربی نشان داده‌اند که هدایت حرارتی نانوسیالات تحت تأثیر عوامل متعددی قرار دارد، مانند نوع، بارگذاری، اندازه و شکل نانوذرات، همچنین نوع مایع پایه و دما. ماهیت و مقدار افزودنی‌ها نیز در بهبود هدایت حرارتی نقش دارد [۵۴]. در بخش بعدی، یافته‌های تجربی مربوط به هدایت حرارتی نانوسیالات بر پایه روغن ترانسفورماتور بررسی می‌شود.

۴-۴-۱-۱- کسری حجم/جرم نانوذرات

تأثیر غلظت نانوذرات بر هدایت حرارتی روغن پایه در مطالعات مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات لی و همکاران نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیالات مبتنی بر نفت سفید با افزایش کسری جرمی نانوذرات مس بهبود می‌یابد. تحقیقات سینغ و همکاران درباره روغن معدنی معلق با نانوذرات آلومینا نشان داد که با افزایش غلظت حجمی نانوذرات، بهبودی تا ۴٪ در هدایت حرارتی مشاهده می‌شود [۵۳]. فونتس و همکاران نیز هدایت حرارتی نانوسیالات شامل نانوذرات الماس و نانو لوله‌های کربنی چند جداره را ارزیابی کردند و بهبودهایی با مقادیر ۲۷٪ برای نانو لوله‌های کربنی و ۲۳٪ برای نانوذرات الماس گزارش دادند، که این مقادیر فراتر از تخمین‌های مدل محیط مؤثر ماکسول بود [۴۶]. مطالعه زنگ و همکاران نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیالات نه تنها با افزایش کسری جرمی، بلکه با افزایش دما نیز بالا می‌رود [۵۵]. بررسی جین و همکاران بر روی نانوسیالات با نانوذرات سیلیکا و فولرین نشان داد که در

در شکل ۱۳ آمده است [۵۹]. دو و همکارانش افزایش چشمگیر در ویژگی‌های حرارتی TO با استفاده از نانوذرات BN و Fe_3O_4 را به دلیل انتقال فونون بالستیک و تأثیر کم حرکت براونی، به ویژه با BN که ویژگی‌های حرارتی برجسته‌ای دارد، توضیح داده‌اند [۶۰]. همچنین یاو و گروهش نتیجه‌گیری کردند که استفاده از غلظت‌های حجمی کم در نانوسیالات مبتنی بر روغن گیاهی بهبود ۱۴ درصدی در هدایت حرارتی را به همراه داشته است [۶۱]. همچنین، وجود میدان الکتریکی برای بهبود انتقال حرارت نانو روغن‌های مبتنی بر پرکننده‌های h-BN مفید واقع شد. این پیشرفت‌ها می‌تواند برای کوچک‌سازی ترانسفورماتورهای ولتاژ بالا بسیار سودمند باشد.



شکل ۱۳. بهبودهای هدایت حرارتی به عنوان تابعی از غلظت حجم ذرات [۵۹].

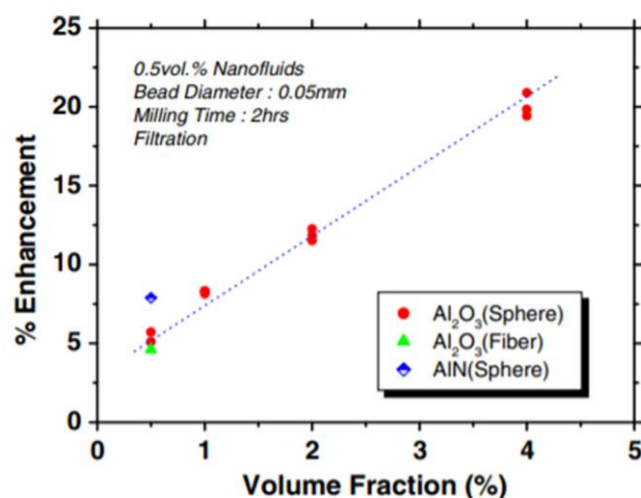
۴-۱-۳- مقدار سورفکتانت

نوع و مقدار سورفکتانت یکی از عوامل مهم در تأثیرگذاری بر هدایت حرارتی نانوسیالات است. به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد هر سورفکتانت، نوع و مقدار آن می‌تواند به شکل‌های مختلفی بر هدایت حرارتی نانوسیالات تأثیر بگذارد. تحقیقات چوی و همکاران نشان داده است که هدایت حرارتی نانوسیالات تهیه شده با نانوذرات مختلف (مانند Al_2O_3 و AIN) افزایش می‌یابد و با افزایش مقدار سورفکتانت، این هدایت کاهش پیدا می‌کند.

۴-۱-۴- سیال پایه

گرانروی مایعات پایه بر حرکت براونی نانوذرات و به تبع آن بر هدایت حرارتی نانوسیالات تأثیر می‌گذارد. گوپین و همکاران اثر لایه دوگانه الکتریکی ایجاد شده در نزدیکی نانوذرات را مورد بررسی قرار دادند و مشخص کردند که این لایه به همراه هدایت

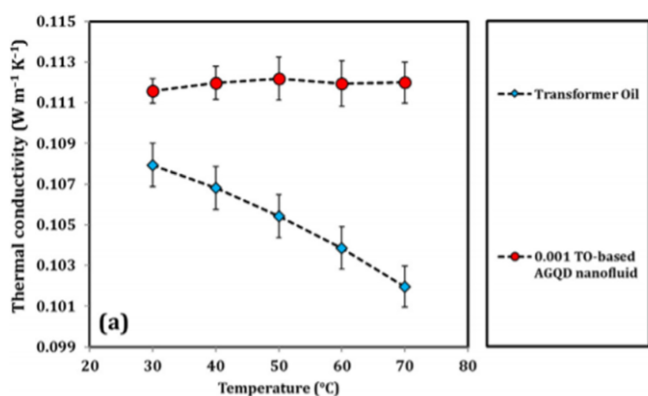
غلظت‌های بسیار کم تأثیر محسوسی بر روغن مشاهده نشد [۳۵]. هوانگ و همکاران همچنین افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات حاوی نانولوله‌های چنددیواره (MWCNT) و فولرین را نسبت به غلظت ارزیابی کردند [۵۶]. شاکلا و همکاران هدایت حرارتی نانوسیالات توسعه یافته با نانوذرات AIN و نانو الماس را مورد بررسی قرار دادند. لیاس و همکاران دریافتند که افزایش دما و غلظت نانوذرات می‌تواند به حداکثر بهبود ۱۶٪ در هدایت حرارتی منجر شود [۳۱]. تحقیق چوی و همکاران تأثیر کسری حجم نانوذرات بر هدایت حرارتی نانوسیالات مختلف را نشان داده است که این اطلاعات در شکل ۱۲ آورده شده است [۵۷].



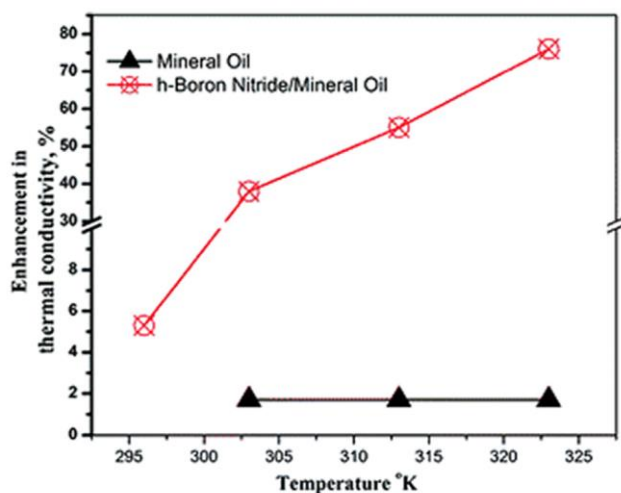
شکل ۱۲. هدایت حرارتی به عنوان تابعی از کسری حجم برای معلقات نانوذرات- روغن [۵۷].

۴-۱-۲- نوع نانوذرات

نوع نانوذرات نقش چشمگیری در هدایت حرارتی مایعات پایه دارد، زیرا نانوذرات مختلف از نظر هدایت حرارتی متفاوت هستند. این یعنی تأثیر آن‌ها بر هدایت حرارتی نانوسیالات نیز بسته به نوع نانوذرات استفاده شده فرق می‌کند. تحقیقاتی نشان داده‌اند که انتخاب نوع نانوذره می‌تواند تغییراتی در هدایت حرارتی ایجاد کند. به عنوان نمونه، در پژوهشی که توسط چن و همکاران انجام شد، نانوسیالات مبتنی بر روغن که با نانوذرات MWCNT تقویت شده بودند، بهبود ۱۶۰ درصدی را تجربه کردند، که این افزایش بزرگ به ویژگی‌های خاص نانوذرات نسبت داده شده است [۵۸]. چیزا و گروهش ترمودینامیک نانوذرات مختلف در TO را با ارزیابی هدایت حرارتی و مدل محیط مؤثر بررسی کرده‌اند که



شکل ۱۴. هدایت حرارتی روغن ترانسفورماتور خالص و نانوسیالات مبتنی بر TO [۴۹].



شکل ۱۵. تأثیر دما بر هدایت حرارتی نانوسیالات [۴۷].

کاهش یافته و نرخ انتقال حرارت بین نانوذره و مایع پایه کاهش می‌یابد، که منجر به کاهش هدایت حرارتی می‌شود. مطالعات مختلفی به بررسی تأثیر اندازه بر هدایت حرارتی پرداخته‌اند. نانوذرات با اشکال مختلف مساحت تماس متفاوتی با مایع پایه دارند که بر هدایت حرارتی تأثیرگذار است. به عنوان مثال، نانوذرات استوانه‌ای به دلیل داشتن نسبت ابعاد بزرگ‌تر، مساحت تماس بیشتری با سیال پایه دارند و بنابراین افزایش هدایت حرارتی را نشان می‌دهند. این بهبود ناشی از شبکه‌ای است که ذرات بزرگ‌تر ایجاد می‌کنند و گرما را بهتر در مایع هدایت می‌کند. تأثیر شکل نانوذرات بر هدایت حرارتی در نمودارهای مربوطه قابل مشاهده است. مکانیسم‌های اصلی تأثیرگذاری عناصر مختلف بر هدایت حرارتی نیز در شکل ۱۶ و ۱۷ به تصویر کشیده شده است [۷۰، ۷۱].

حرارتی، وابسته به نوع سیال پایه است [۶۲]. اثرات استفاده از روغن‌های گیاهی و معدنی به‌عنوان مایع پایه متفاوت است و درک اینکه کدام یک اثر بیشتری دارد، به تحقیقات بیشتری نیاز دارد. مطالعات آلیسیا و همکاران بر روی نانوذرات گرافن نشان دادند که در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد، هدایت حرارتی نانوسیالات کاهش می‌یابد که این مسئله به ویژگی‌های خاص روغن ترانسفورماتور ارتباط دارد [۶۳].

۴-۱-۵-۵-۵

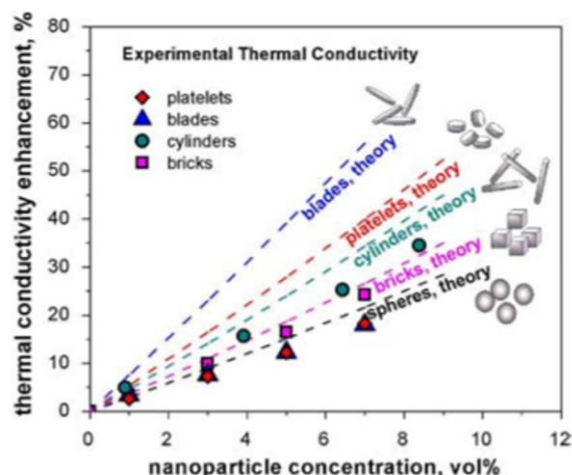
هدایت حرارتی نانوسیالات به میزان زیادی به دما بستگی دارد. امیری و همکاران تأثیر دما را بر هدایت حرارتی بررسی کردند، که نتایج آن در تحقیقات پیتل و همکاران با انواع مختلف نانوذرات (مانند Al, Cu, CuO, Al₂O₃) تأیید شد (شکل ۱۴). نتایج نشان دادند که هدایت حرارتی در دامنه ۲۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد برای نانوذرات Al₂O₃ بین ۳ تا ۱۷٪ و برای دیگر نانوذرات تا ۳۸٪ بهبود یافته است [۶۴]. ژوان و همکاران بهبود ۴۵ درصدی را در هدایت حرارتی با استفاده از نانوذرات Cu در دمای بین ۲۰ تا ۶۰ درجه سانتی‌گراد ثبت کردند [۶۵]. همچنین، طاها-تجربینا و همکاران برای نانوسیالات مبتنی بر h-BN بهبود ۷۷ درصدی در دمای مشابه ثبت کردند (شکل ۱۵) [۴۷، ۶۶]. بیهانیا و سایرین با مطالعه روی نانوصفحات نیتريد بور، افزایش قابل توجهی را در غلظت‌های پایین مشاهده کردند [۶۷]. جعفری مقدم نیز در حال بررسی هدایت حرارتی نانوسیالات مبتنی بر TO بوده و بهبود ۴۱ درصدی را گزارش کرده است [۶۸]. بهشتی و دیگران کاهش هدایت حرارتی روغن ترانسفورماتورها را مورد توجه قرار دادند؛ آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که با افزایش دما، حرکت براونی به دلیل انرژی جنبشی بیشتر نانوذرات افزایش می‌یابد که منجر به برخورد بیشتر ذرات می‌شود [۶۹].

۴-۱-۶-۱-۶-۱-۶

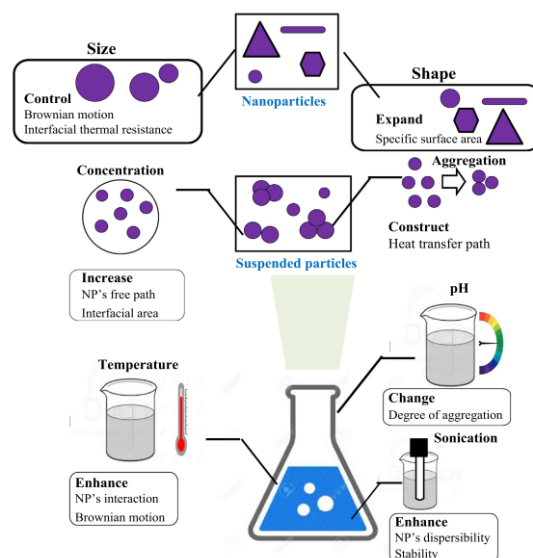
عامل مهمی برای تأثیر بر هدایت حرارتی نانوسیالات هستند. با کاهش اندازه نانوذرات، هدایت حرارتی بهبود می‌یابد. این به دلیل توسعه لایه مایع در اطراف نانوذره و همچنین حرکت براونی نانوذرات اتفاق می‌افتد. با افزایش اندازه نانوذرات، حرکت براونی

۴-۶- نقطه اشتعال و نقطه آتش

در سال‌های اخیر، قابلیت اشتعال مایعات به عنوان یک نگرانی جدی ایمنی مطرح بوده است. گزارش‌های زیادی در مورد انفجار ترانسفورماتورها وجود دارد که مهار آن‌ها دشوار بوده و نشی روغن ممکن است به محیط اطراف آسیب برساند. نقطه اشتعال دمایی است که بالاتر از آن، مایع بخارهایی آزاد می‌کند که می‌توانند مخلوطی قابل اشتعال در جو ایجاد کنند. تعیین نقطه اشتعال به منظور کاهش خطر آتش‌سوزی ناشی از انفجارهای ناگهانی انجام می‌شود و معمولاً این دما بالاتر از ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد است. اندازه‌گیری نقطه اشتعال نانوسیالات معمولاً با استفاده از استاندارد ASTM D93 انجام می‌گیرد. در تحقیقات ساماتی و همکاران، نانوسیالاتی با نانوذرات TiO_2 ، Al_2O_3 و MoS_2 توسعه یافت و نتایج نشان داد که نقطه اشتعال این نانوسیالات نسبت به روغن پایه TO بالاتر بود [۷۳]. نقطه آتش به دمایی اشاره دارد که در آن بخارات مایع پس از احتراق، سوزش را به صورت پیوسته ادامه می‌دهند. این کمترین دماست که در آن، با حرارت دادن بیش از نقطه اشتعال، نمونه می‌تواند آتش را حداقل برای پنج ثانیه حفظ کند. بنابراین، گرم شدن کافی مایع باعث شروع اشتعال می‌شود. نقطه اشتعال به عنوان یکی از شاخص‌های کیفیت مورد استفاده قرار می‌گیرد تا احتمال وقوع خطرات آتش‌سوزی مشخص شود. بهشتی و همکاران اثر بارگذاری نانوذرات را بر نقطه اشتعال بررسی کرده‌اند و گزارش داده‌اند که افزایش ۴/۶ درصدی در نقطه اشتعال با بارگذاری نانوذرات (۰/۰۰۱ کسری جرمی) مشاهده شده است، البته افزایش بیشتر بارگذاری منجر به کاهش نقطه اشتعال می‌شود که در شکل ۱۸ به تصویر کشیده شده است. همچنین، تحقیقات ساماتی و همکاران نشان داده است که نقطه آتش نانوسیالات توسعه یافته نسبت به روغن پایه بالاتر بود. کارتیک و همکاران فاکتورهای کلیدی نانوسیالات توسعه یافته را ارزیابی کرده و دریافته‌اند که تغییرات در غلظت نانوذرات در TO می‌تواند منجر به بهبود گرانی، نقطه آتش و نقطه اشتعال شود [۷۴]. انتخاب صحیح اندازه و بارگذاری نانوذرات می‌تواند عناصر کلیدی TO را بهبود بخشد. امیری و همکاران نقاط اشتعال روغن ترانسفورماتور خالص و نانوسیالات مبتنی بر AGQD را مورد بررسی قرار دادند که نتایج آن در شکل ۱۹ نمایش داده شده است.



شکل ۱۶. هدایت حرارتی نانوسیالات آلومینا با اشکال مختلف نانوذرات [۷۲].

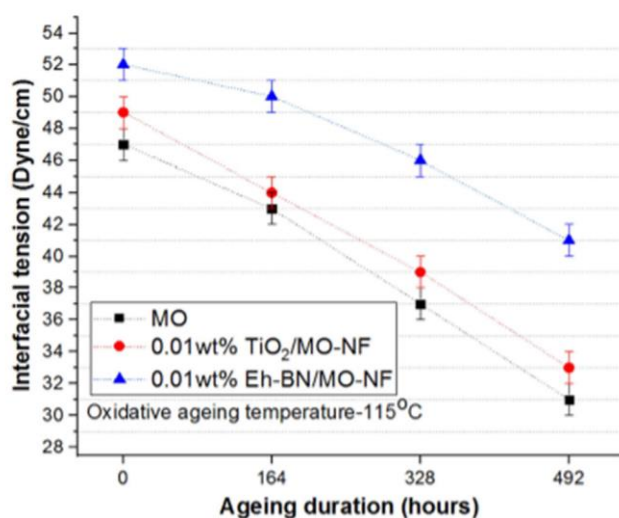


شکل ۱۷. مکانیسم‌های بنیادی تأثیر عناصر مختلف بر هدایت حرارتی نانوسیالات [۷۲].

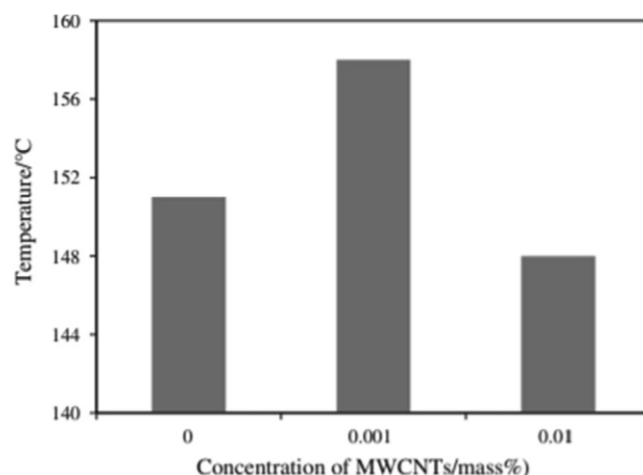
۴-۵- نقطه ریزش

نقطه ریزش به دمایی اطلاق می‌شود که در آن یک مایع تبدیل به حالت نیمه‌جامد می‌شود و قابلیت جریان داشتن خود را از دست می‌دهد. این دما نشان‌دهنده پایین‌ترین حدی است که مایع می‌تواند بدون از دست دادن خصوصیات مایع بودن، جریان یابد. این شاخص همچنین یکی از معیارهای اصلی در توصیف عملکرد عایق مایع برای تجهیزات فشار قوی محسوب می‌شود. بر اساس تحقیقات بهشتی و همکاران، نمونه‌هایی شناسایی شده‌اند که نقطه ریزش آنها کمتر از منفی ۴۵ درجه سانتی‌گراد است [۶۹].

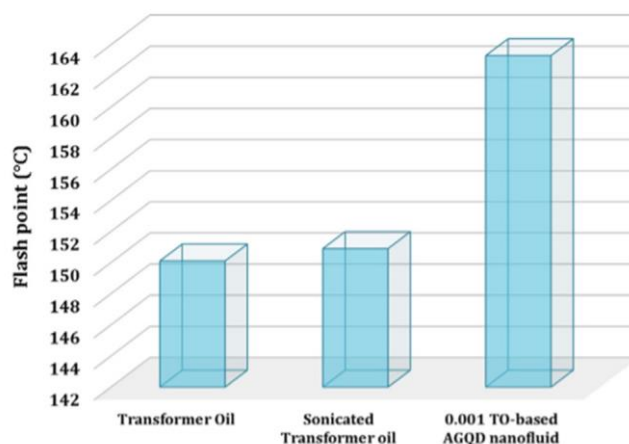
می‌شود. این مقدار می‌تواند با استفاده از دستگاهی به نام تنسیومتر اندازه‌گیری شود. IFT از تفاوت تعاملات بین مولکول‌های یک مایع با مولکول‌های مایع دیگر به دست می‌آید. بنابراین، نانوذرات به خوبی پراکنده شده، IFT را نسبت به TO بهبود می‌بخشند، زیرا نیروهای موینگی بین ذرات هرگونه تغییر شکل در سطح را مخالفت می‌کنند. یافته‌های تجربی مرجع نشان داد که نانوسیالات مبتنی بر TO که با نانوذرات TiO_2 و Al_2O_3 توسعه یافته‌اند، IFT بالاتری نسبت به روغن پایه TO دارند، در حالی که نانو مایع مبتنی بر TO که با نانوذرات MoS_2 تهیه شده، IFT کمتری نسبت به روغن پایه TO نشان داد. ماهارانا فرآیند پیری را مشاهده کرد و آزمایش را در حضور اکسیژن انجام داد [۷۵]. IFT نانوسیالات مبتنی بر TO که با نیتريد بور هگزاگونال (Eh-BN) و نانوذرات TiO_2 تهیه شده بودند، به مراتب بالاتر از روغن پایه TO بود. افزایش مداوم در دوره پیری اکسیداتیو منجر به کاهش IFT برای هر دو روغن پایه TO و نانوسیالات می‌شود، با این حال در تمام موارد، نانوسیالات IFT بهتری نسبت به TO ارائه می‌دهند (شکل ۲۰). نیهاریکا و همکاران [۷۶] IFT نانوسیالات را با نانوذرات Eh-BN با استفاده از روغن‌های پایه مختلف تعیین کردند. آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که IFT نانوسیالات مبتنی بر روغن گیاهی (VO) نسبت به نانوسیالات مبتنی بر روغن معدنی (MO) کمتر است. این به دلیل ساختار مولکولی VO است که شامل زنجیره‌های اسید چرب غیراشباع و محتوای رطوبت در روغن می‌باشد.



شکل ۲۰. کشش سطحی در مقابل مدت زمان پیری [۷۷].



شکل ۱۸. نقاط اشتعال روغن خالص و نانوسیالات [۶۹].



شکل ۱۹. نقاط اشتعال نانوسیالات مبتنی بر AGDQ و روغن ترانسفورماتور خالص [۴۹].

۴-۷- کشش سطحی بین‌فازی (IFT)

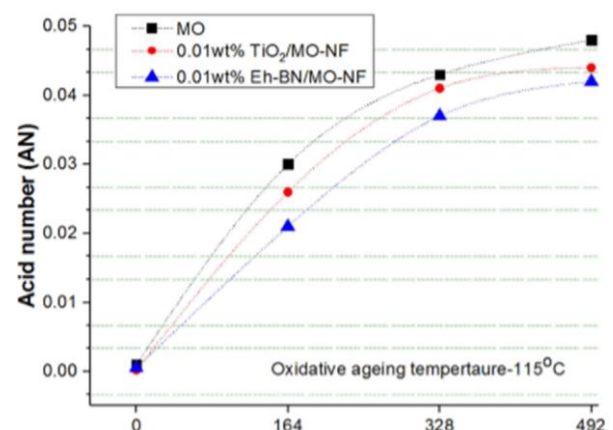
IFT مقدار نیروی جاذبه مولکولی بین مولکول‌های روغن و آب در سطح بین‌فازی آن‌ها است. این مقدار می‌تواند به ارزیابی ناخالصی‌های قطبی محلول موجود در روغن که نیروی جاذبه مولکولی بین روغن و آب را کاهش می‌دهد، کمک کند. مقدار IFT کیفیت روغن را نشان می‌دهد. مقدار بالای IFT نشان‌دهنده وجود کمتر آلاینده‌های قطبی در روغن است و بنابراین کیفیت و عملکرد بهتری را برای روغن تضمین می‌کند. مقدار پایین IFT منجر به کاهش یکپارچگی روغن ترانسفورماتور می‌شود که منجر به توسعه اکسیدها و پراکسیدها در روغن عایق در طول سرویس می‌گردد. روغن خالص TO باید حداقل مقدار 18 dyn/cm و حداکثر 40 dyn/cm داشته باشد. IFT روغن ترانسفورماتور معمولاً با استاندارد ASTM D971 ارزیابی

۴-۸- عدد اسیدی

تحمل تنش‌های الکتریکی بدون شکست است، حتی در برابر فشار، دما، رطوبت و پیکربندی خاصی از الکترودها. تجهیزات با ولتاژ بالا مانند ترانسفورماتورها نیازمند روغنی هستند که بتواند نه تنها حرارت را منتقل کند، بلکه باید میدان الکتریکی را نیز عایق کند تا عملیات ایمنی صورت گیرد. روغن ترانسفورماتوری با DS بالا به امنیت عملکرد کمک کرده و وزن و حجم تجهیزات را کاهش می‌دهد. DS باید در حد بالاترین سطوح باقی بماند. عوامل مختلفی مانند آلودگی، رطوبت، حباب‌ها، ذرات و اسیدیته، بر DS روغن تأثیر می‌گذارند. هر مایع عایقی بایستی بتواند ولتاژ AC فرکانس قدرت را در کنار تنش‌های ناشی از رعد و برق و سوئیچینگ تحمل کند که طی عملیات سامانه قدرت پیش می‌آید. عایق‌های نانو سیال جدید نشان داده‌اند که DS بهتری نسبت به TO پایه دارند و این بهبود بسته به نوع ولتاژها و شکل موج‌های مختلف از جمله AC، DC یا امپالس‌ها و با توجه به نوع نانوذرات اندازه‌گیری شده است.

استحکام دی‌الکتریک (AC BDS) یکی از ضروری‌ترین معیارها برای استفاده از عایق‌های مایع در ترانسفورماتورها است. این مقاومت حداکثر ولتاژ AC را نشان می‌دهد که عایق مایع قادر به تحمل بدون وقوع تخلیه مخرب است. عوامل آلودگی مانند ذرات کوچک، رطوبت و حباب‌های هوا نقش مهمی بر AC BDS دارند. بنابراین، ولتاژ شکست ارزیابی شده معمولاً نشان‌دهنده کیفیت مایع به جای ویژگی‌های ذاتی آن است. ولتاژ شکست عایق مایع (LI BDV) به وسیله ضربه‌های الکتریکی که معمولاً از ۱/۲ میکروثانیه برای رسیدن به ۹۰٪ دامنه و کاهش به ۵۰٪ دامنه در ۵۰ میکروثانیه استفاده می‌کنند، تعیین می‌شود. آزمایش‌های LI BDV طبق استاندارد IEC 60897 انجام می‌گیرد. این ویژگی تحت تأثیر عوامل مختلف نانوذرات مانند نوع، شکل و غلظت قرار می‌گیرد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که نانوسیالات تهیه‌شده اولیه باعث بهبود AC و LI BDS می‌شوند. مطالعات گوناگون AC، DC و LI BDS را نیز بررسی کرده‌اند. به عنوان مثال، سارنوراتو و همکاران [۷۸] نانوسیالات مبتنی بر روغن ترانسفورماتور را با نانوذرات مغناطیسی و سورفاکتانت‌های مختلف آزمایش کردند. هوانگ و اوسالوان [۱۵] به بهبود هدایت نانوسیالات مبتنی بر TO پرداختند. برخی پژوهش‌ها نشان می‌دهند که افزودن نانوذرات اصلاح‌شده TiO_2

اسیدیته معیاری است برای سنجش میزان اسیدهای آلی و غیرآلی در روغن، که به صورت میلی‌گرم هیدروکسید پتاسیم لازم برای خنثی‌سازی اسیدهای موجود در یک گرم روغن اندازه‌گیری می‌شود. برای تعیین اسیدیته روغن ترانسفورماتور معمولاً از استاندارد ASTM D974 استفاده می‌شود. اسیدها از تجزیه یا اکسیداسیون روغن ناشی می‌شوند و همچنین ممکن است از منابع خارجی مانند آلاینده‌های جوی به وجود آیند. این اسیدهای آلی می‌توانند به ساختار عایق آسیب رسانده و در حضور رطوبت باعث خوردگی در ترانسفورماتور شوند. اگرچه ایده‌آل این است که هیچ اسیدی در TO خالص وجود نداشته باشد، اما در عمل همیشه مقداری اسید موجود است. ساماتی و همکاران، میزان اسیدیته نانوسیالات را با TO پایه مقایسه کردند [۷۳]. نانوسیالات شامل نانوذرات Al_2O_3 ، TiO_2 و MoS_2 نشان دادند که محتوای اسیدی کمتری نسبت به TO پایه دارند و از این رو خطر خوردگی در ترانسفورماتور کاهش می‌یابد. با گذشت زمان و پیر شدن روغن، اسیدیته افزایش می‌یابد. ماهارانا و همکاران، عدد اسیدی نانوسیالات را بررسی کرده و مشاهده کردند که برای مدت ۴۹۲ ساعت، محتوای اسیدی آنها نسبت به TO پایه کمتر بوده است (شکل ۲۱) [۷۵].



شکل ۲۱. عدد اسیدی در مقابل مدت زمان پیری [۷۷].

۴-۹- استحکام دی‌الکتریک (DS) / ولتاژ شکست (BDV)

استحکام دی‌الکتریک از مهم‌ترین پارامترها در تعیین عملکرد روغن عایق ترانسفورماتور است و نشان‌دهنده توانایی آن در

مشاهده شده اما برخی مطالعات اخیر نشان‌دهنده تراکم ذرات نیز هستند که نیازمند بررسی دقیق‌تر است. هزینه بالای توسعه نانوسیالات یکی از موانع اصلی در استفاده تجاری و عملی از نانوذرات، هزینه بالای توسعه آن‌ها است. برای تهیه نانوسیالات، روش‌های تک‌فازی یا دو فازی معمولاً به کار می‌روند؛ ولی هر دو روش به تجهیزات پیچیده و هزینه‌بر نیاز دارند. وضع تحقیق جدید نانوسیالات توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده‌اند، زیرا از محدودیت‌های اساسی مفاهیم سنتی عبور می‌کنند و به یک حوزه تحقیقاتی و کاربردی نوظهور تبدیل شده‌اند.

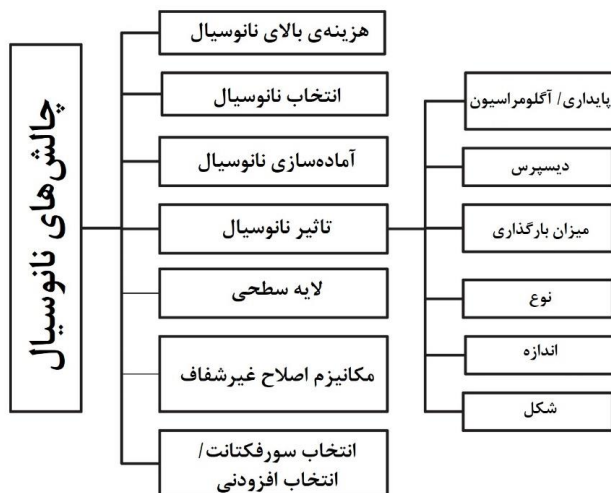
آگاهی از قابلیت‌ها به دلیل بهبود خصوصیات ترموفیزیکی و کارایی بهتر در پدیده‌های حرارتی، نانوسیالات به عنوان گزینه‌ای امیدوارکننده در کاربردهای مهندسی شناخته شده‌اند. با این حال، برای افزایش آگاهی در میان محققان دانشگاهی و صنعتی، تحقیقات بیشتری مورد نیاز است. بازار در حال رشد نانوسیالات به دلیل ویژگی‌های حرارتی برتر و سطوح بهبودیافته انتقال حرارت نسبت به مایعات خنک‌کننده معمولی، آینده انتقال حرارت را شکل می‌دهند. تحقیق برای پیدا کردن مایعی با خصوصیات حرارتی بهتر، جهت بهینه‌سازی طراحی اجزا و تجهیزات با کارایی بالاتر ضروری است و این بازار توان بالایی برای رشد اقتصادی دارد. بهبود انتقال حرارت نانوسیالات به عنوان نسلی آینده‌دار برای کاربردهای انتقال حرارت شناخته می‌شوند و انتظار می‌رود عملکرد حرارتی برتری نسبت به سیالات سنتی داشته باشند، زیرا وجود نانوذرات پراکنده باعث افزایش هدایت حرارتی می‌شود. آزمایش‌های صنعتی آینده تلاش‌هایی برای آزمایش نانوسیالات در محیط‌های واقعی در حال انجام است تا تأثیر شرایط کار بر عملکرد و کارایی آن‌ها ارزیابی شود. نتایج این آزمایش‌ها می‌تواند اثبات‌کننده مزایای بلندمدت و اثرات نانوذرات بر سایر قسمت‌های سامانه باشد. سیالات کاری دوستدار محیط زیست برای تولید نانوسیالات از روش‌های غیرسمی و دوستدار محیط زیست استفاده می‌شود تا کاربرد آن‌ها گسترش یابد. هدف این است که نانوذراتی توسعه یابند که هم محیط زیست را حفظ کنند و هم ویژگی‌های انتقال حرارت بالایی داشته باشند؛ در عین حال هزینه کم و توان تولید انبوه هم مدنظر باشد [۸۰].

۵-۱- سایر مشکلات مرتبط با فرآیند تولید

به TO مقاومت بیشتری در برابر رطوبت ایجاد می‌کند. نانوسیالات بر پایه روغن گیاهی نیز با استفاده از نانوذرات Fe_2O_3 یا TiO_2 نشان داده‌اند که می‌توانند ولتاژ شکست دی‌الکتریک را به میزان قابل توجهی افزایش دهند [۷۹]. تحقیقات دیگر نیز بر روی تأثیر اندازه و غلظت نانوذرات بر BDS تمرکز داشته‌اند و یافته‌ها نشان‌دهنده بهبود در استحکام دی‌الکتریک با اندازه‌ها و غلظت‌های متفاوت بوده‌اند. نانوذرات با تأخیرهای کمتر زمانی بهتر عمل کرده‌اند و نانوسیالات تهیه‌شده با نانوذرات Fe_3O_4 به دلیل زمان استراحت کمتر، BDV بالاتری نشان دادند. اما تجمع زیاد نانوذرات می‌تواند باعث کاهش BDV شود. این یافته‌ها تأکید بر اهمیت نانوذرات در بهبود ویژگی‌های الکتریکی روغن‌های ترانسفورماتور دارند. برای مثال، استفاده از نانوذرات TiO_2 توانسته استحکام دی‌الکتریک را تا ۳۰٪ افزایش دهد.

۵- چالش‌های مرتبط با نانوسیالات

نانوسیالات در گذشته به دلیل ویژگی‌های جذاب متعددی که ارائه داده‌اند، توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. تحقیقات قبلی بیشتر بر هدایت حرارتی تمرکز داشته‌اند، اگرچه اخیراً تمرکز بیشتری بر روی دیگر خصوصیات انتقال حرارت نانوسیالات شده است. با اینکه نانوسیالات پتانسیل گسترده‌ای برای کاربردهای مختلف دارند، اما رشد این حوزه به دلیل مسائل گوناگون مانند: (۱) پایداری ضعیف مواد پراکنده شده؛ (۲) تفاوت در نتایج حاصل از مطالعات مختلف؛ (۳) کمبود دانش نظری در مورد مکانیزم‌های بهبود ویژگی‌ها کند بوده است. این بررسی تلاش می‌کند تا مسائل کلیدی نیازمند توجه و حل‌وفصل در آینده را شناسایی کند. چالش‌هایی همچون هدایت حرارتی، حرکت ذرات و تغییر ویژگی‌های ترموفیزیکی با دما باید به دقت بررسی شوند و تأثیرات حرارتی آن‌ها با دقت بیشتری سنجیده شود. بیشتر تحقیقات جابجایی موجود روی نانوذرات اکسیدی انجام شده‌اند، که معمولاً گرانبه و قدرت پمپاژ سیال را افزایش می‌دهند. مطالعه نانوسیالات حاوی نانوذرات فلزی جالب به نظر می‌رسد؛ چراکه هدایت حرارتی نانومواد فلزی بسیار بالاتر از نوع اکسیدی است. تحقیقات آتی باید بر روی نانوذرات فلزی با شکل‌ها و بارگذاری‌های متفاوت متمرکز شوند تا انتقال حرارت بهینه شود. هرچند که بهبودهایی در انتقال حرارت با استفاده از نانوسیالات



شکل ۲۲. چالش‌های کلی توسعه نانوسیالات.

داده‌اند که هدایت حرارتی و توانایی انتقال حرارت نانوسیالات بهبود یافته است. گزارش‌ها حاکی از افزایش قابل توجه در سطح انتقال حرارت با استفاده از نانوسیالات در مقایسه با مایعات معمولی هستند. شناخت دقیق خواص نانوسیالات مانند هدایت حرارتی، گرانبوی و ظرفیت حرارتی ویژه برای کاربردهای مختلف بسیار ضروری است و اصول انتقال حرارت و دینامیک اصطکاک نیز باید بررسی شوند تا بتوان استفاده از نانوسیالات را گسترش داد. نانوسیالات مبتنی بر TO دارای مزایای متعددی هستند که شامل موارد زیر می‌شود: (۱) عملکرد عایق بندی و خنک‌کنندگی بهتری نسبت به مایعات سنتی دارند، (۲) هدایت حرارتی بالایی ارائه می‌دهند که به عملکرد بهتر تجهیزات HV کمک می‌کند. (۳) سطح بالا و در نتیجه تبادل حرارت بیشتری بین نانوذرات و مایعات فراهم می‌کنند. (۴) پایداری پراکندگی با حرکت براونی مناسب دارند. (۵) قدرت پمپاژ کمتری برای دستیابی به انتقال حرارت معادل نیاز دارند. (۶) ریسک انسداد کمتری نسبت به دوغاب‌های سنتی دارند، که به کوچک‌سازی سامانه کمک می‌کند. (۷) ویژگی‌های قابل تنظیمی مانند هدایت حرارتی و قابلیت مرطوب شدن سطح ارائه می‌دهند که برای کاربردهای مختلف مناسب هستند. سنتز ترکیبات آلی بدون حلال به شدت مورد توجه قرار گرفته است. این روش سازگار با محیط زیست بوده و مزایای متعددی مانند واکنش‌های غیرسمی، کاهش ضایعات مضر و بازده بالاتر محصول نهایی با شرایط واکنش ملایم‌تر دارد. این امر موجب پیدایش روش‌های نوآورانه برای تولید ترکیبات سازگار با محیط زیست شده است [۸۳].

به طور سنتی، نانوسیالات با استفاده از یک فرآیند تک مرحله‌ای که در آن نانوذرات به طور همزمان تولید و در سیال پایه معلق می‌شوند، یا یک روش دو مرحله‌ای که شامل تشکیل NPs و سپس معلق کردن آن‌ها در مایع میزبان است، توسعه می‌یابند. در هر دو این روش‌ها، NPs به طور ذاتی از روش‌هایی که شامل واکنش‌های کاهش یا تبادل یون هستند، تولید می‌شوند. علاوه بر این، مایعات پایه شامل سایر یون‌ها و محصولات واکنش هستند که جدا کردن آن‌ها از مایعات چالش‌برانگیز است. مشکل دیگری که به توسعه NFS مربوط می‌شود، تمایل NPs به آگلومراسیون و تبدیل شدن به ذرات بزرگ‌تر است که مزایای NPs با سطح بالا را محدود می‌کند. معمولاً چندین افزودنی پراکنش به مایع پایه با NPs اضافه می‌شود. با این حال، این رویکرد ممکن است سطح NPs را تغییر دهد و NFS توسعه‌یافته ممکن است شامل سطوح نامطلوبی از آلودگی‌ها باشد. اکثر تحقیقات تاکنون به اندازه نمونه‌ای محدود به چند صد میلی‌متر از NFS محدود شده‌اند. این مورد نیز یک مشکل است، زیرا نمونه‌های بزرگ‌تری برای آزمایش ویژگی‌های متعدد مرتبط با NFS و به ویژه برای ارزیابی کاربردهای بالقوه آن‌ها در کاربردهای عملی مورد نیاز است [۸۱]. اطلاعات موجود نشان می‌دهد که استفاده از NFS به عنوان مایع خنک‌کننده توجیه قوی‌تری دارد که این حوزه به عنوان یک چشم‌انداز غیرقابل انکار توسعه یافته است. اما این حوزه نیاز به تحقیقات جدی‌تری در مورد NFS دارد و لازم است مواردی مانند آماده‌سازی، شناسایی، ویژگی‌های ترموفیزیکی، انتقال حرارت و جرم، مدل‌سازی و همچنین کاربردهای تجاری در این حوزه بررسی شود. بنابراین، یک رویکرد چندرشته‌ای شامل محققانی مانند شیمیدان‌ها، مهندسان حرارتی، کارشناسان مواد و فیزیک‌دانان باید آغاز شود. تنها چنین روشی می‌تواند آینده خنک‌کننده‌ها را با NFS تضمین کند [۸۲]. چالش‌های مطرح شده در NFS مبتنی بر TO در شکل ۲۲ خلاصه شده است.

۶- مزایای نانوسیالات

نانوسیالات به عنوان نسل آینده مایعات انتقال حرارت در کاربردهای متعدد شناخته می‌شوند. انتظار می‌رود این سیالات به دلیل وجود نانوذرات پراکنده با هدایت حرارتی بالاتر، عملکرد بهتری نسبت به مایعات سنتی داشته باشند. تحقیقات اخیر نشان

می‌تواند اثرات مثبتی بر روی اجزای حرارتی تجهیزات بگذارد. با این حال، مقدار زیاد مواد فعال سطحی ممکن است اثرات منفی بر هدایت حرارتی و گرانبوی داشته باشد. با توجه به شکاف‌های تحقیقاتی و فعالیت کم در حوزه تحقیق و توسعه، استفاده از نانوسیالات مبتنی بر روغن روند رو به افزایشی دارد. بهبود ویژگی‌های دی‌الکتریک و خنک‌کنندگی این سیالات از عوامل اصلی در استفاده از آن‌ها در تجهیزات ولتاژ بالا هستند. البته، پایداری طولانی‌مدت این نانوسیالات و تاثیر بلندمدت نانوذرات در روغن پایه همچنان نیازمند بررسی بیشتر است.

شکاف تحقیقاتی و چشم‌انداز آینده براساس مطالعات موجود، اکثر محققان بر مکانیزم‌هایی که باعث بهبود عملکرد حرارتی و دی‌الکتریک نانوسیالات می‌شوند، تمرکز دارند. غلظت نانوذرات بستگی زیادی به ماهیت مایع پایه، نوع نانوذرات، مواد فعال سطحی و فرآیند سنتز دارد. برای بهره‌برداری مؤثرتر از نانوسیالات در ترانسفورماتورها، نیازمند تحقیقات عمیق‌تر درباره مواد و تاثیر آن‌ها بر ویژگی‌های حرارتی و دی‌الکتریک هستیم. ملزومات بررسی شامل پایداری بلندمدت نانوسیالات و تاثیر تجمع نانوذرات است. همچنین باید سازگاری آن‌ها با عایق‌های جامد و امکان توسعه آن‌ها با استفاده از مایعات گیاهی یا استرهای مصنوعی که به عنوان "عملکرد سبز" شناخته می‌شوند نیز ارزیابی شود. بررسی عملکرد نانوسیالات در دماهای بالاتر نیز ضروری است. در نهایت، جامعه تحقیقاتی باید راه‌های تبدیل آزمایش‌های کوچک به نمونه‌های صنعتی بزرگ‌تر را نیز بررسی کند.

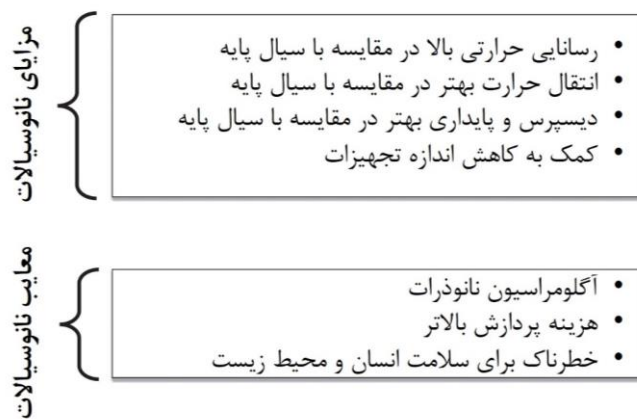
۸- واکنش نانوسیالات با عوامل محیطی

نانوسیالات به دلیل داشتن نانوذرات پراکنده در سیال پایه، می‌توانند با محیط اطراف خود واکنش‌هایی داشته باشند که بر پایداری، عملکرد و خواص فیزیکی و شیمیایی آن‌ها تاثیر می‌گذارد. در ادامه به برخی از مهم‌ترین واکنش‌های نانوسیالات با عوامل محیطی پرداخته شده است:

۱- اکسیداسیون و تخریب حرارتی

- عامل محیطی: اکسیژن هوا و دماهای بالا.

با این حال، نانوسیالات نیز چالش‌هایی ارائه می‌دهند که محدودیت‌هایی برای کاربرد صنعتی آن‌ها ایجاد می‌کند. هزینه پایین‌تر، پایداری بلندمدت و توجه به تأثیرات زیست محیطی و سلامت از جمله نیازمندی‌های ضروری هستند. نقاط ضعف مرتبط با نانوسیالات شامل موارد زیر است: (۱) پایداری ضعیف و تمایل به تجمع و رسوب نانوذرات. (۲) هزینه بالای فرایند ساخت و نیاز به تجهیزات پیشرفته. (۳) استفاده از سورفاکتانت که ممکن است هدایت الکتریکی را کاهش دهد. (۴) خطرات ایمنی ناشی از واکنش‌پذیری بالای نانوذرات. (۵) احتمال تأثیرات زیست‌محیطی منفی ناشی از آزادسازی نانوذرات در محیط [۸۴، ۸۵]. مزایا و محدودیت‌های نانوسیالات در شکل ۲۳ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲۳. مزایا و محدودیت‌های نانوسیالات

۷- کاربرد نانوسیالات

نانوسیالات مبتنی بر روغن ترانسفورماتور تجهیزات ولتاژ بالا به مایعاتی با ویژگی‌های عایق و خنک‌کنندگی قوی نیاز دارند. نانوسیالات در مقایسه با مایعات سنتی عملکرد عایق و خنک‌کنندگی بهتری ارائه می‌دهند و به عنوان جایگزین‌های مناسبی برای مایعات در تجهیزات ولتاژ بالا شناخته می‌شوند. با استفاده از نانوسیالات، می‌توان اندازه و وزن تجهیزات را نیز کاهش داد، زیرا این سیالات خاصیت دی‌الکتریک و خنک‌کنندگی بالایی دارند. همچنین، ولتاژ انتقال و طول عمر تجهیزات ممکن است با این فناوری بهبود یابد. پراکنده کردن نانوذرات رسا در روغن ترانسفورماتور ممکن است دمای آن را تا ۵ درجه سانتی‌گراد کاهش دهد [۸۶، ۸۷]. مطالعات تجربی نشان می‌دهند که استفاده از نانوسیالات مبتنی بر روغن Al_2O_3/AI_N

- واکنش: برخی نانوسیالات می‌توانند تحت تأثیر میدان الکتریکی قوی دچار تجزیه الکتریکی شوند و گازهایی مانند H_2 ، CO و CO_2 تولید کنند.
 - تأثیر: کاهش استقامت دی‌الکتربک، افزایش تخریب عایقی در ترانسفورماتورها.
 - راهکار: انتخاب نانوذرات پایدار در برابر تخریب الکتریکی، استفاده از ترکیبات مقاوم در برابر UV.
- ۵- واکنش با مواد موجود در سامانه (سازگاری با روغن عایق)
- عامل محیطی: ترکیبات شیمیایی روغن‌های معدنی یا استری.
 - واکنش: برخی نانوذرات ممکن است با ترکیبات موجود در روغن عایق واکنش داده و خواص آن را تغییر دهند. به عنوان مثال نانوذرات فلزی مانند Cu و Ag می‌توانند در روغن‌های عایق اکسید شده و رنگ و گرانبوی روغن را تغییر دهند. همچنین نانوذرات کربنی می‌توانند ساختار شیمیایی روغن را تغییر داده و منجر به افزایش لجن شوند.
 - راهکار: انتخاب نانوذرات سازگار با روغن عایق و انجام آزمایش‌های بلندمدت پایداری.
- ۹- نتیجه‌گیری
- نانوفناوری به عنوان یک فناوری نوین، ارائه‌دهنده راه‌حل‌های دقیق برای توسعه سامانه‌های عایق نوآورانه با ویژگی‌های دی‌الکتربک و انتقال حرارت پیشرفته است. این مقاله به بررسی مطالعات موجود در زمینه بهبود ویژگی‌های حرارتی روغن ترانسفورماتور و سایر مواد که حاوی نانوذرات معلق هستند، می‌پردازد. آماری از منابع متعدد بررسی شده تا تأثیر نانوذرات بر پارامترهایی مانند هدایت حرارتی، گرانبوی و چگالی مشخص شود. برای بهره‌مندی خوانندگان، یک فهرست جامع از ادبیات موجود تهیه شده است. مواد فعال سطحی به عنوان یک افزودنی، نقشی مؤثر در بهبود هدایت حرارتی نانوسیالات ایفا می‌کند. اگرچه بسیاری از پژوهشگران از مواد فعال سطحی برای توسعه نانوسیالات پایدار بهره برده‌اند، اما تأثیر غلظت آن بر هدایت
- واکنش: نانوذرات فلزی مانند نقره یا مس ممکن است در حضور اکسیژن و دمای بالا اکسید شوند و خواص الکتریکی و حرارتی خود را از دست بدهند.
 - تأثیر: کاهش هدایت حرارتی و پایداری شیمیایی نانوسیال.
 - راهکار: استفاده از نانوذرات دارای پوشش محافظ (مانند اکسید سیلیکون یا کربن).
- ۲- رسوب و تجمع ذرات
- عامل محیطی: نیروی جاذبه، نیروی واندروالس، بار سطحی.
 - واکنش: نانوذرات در طول زمان ممکن است به دلیل جاذبه بین ذرات و نیروی واندروالس به هم بچسبند و توده‌های بزرگ تشکیل دهند.
 - تأثیر: کاهش پایداری نانوسیال، مسدود شدن مسیرهای خنک‌کننده، کاهش انتقال حرارت.
 - راهکار: استفاده از مواد فعال سطحی (سورفکتانت‌ها) و روش‌های پایدارسازی مانند التراسونیک.
- ۳- واکنش با رطوبت و آب (هیدرولیز)
- عامل محیطی: رطوبت محیط یا نشت آب در سامانه.
 - واکنش: برخی نانوذرات مانند نانوذرات فلزی آلومینیوم، منیزیم و روی در تماس با آب، واکنش داده و اکسید یا هیدروکسید تشکیل می‌دهند.
 - تأثیر: تغییر در pH نانوسیال، کاهش هدایت حرارتی و ناپایداری ترکیب نانوسیال.
 - راهکار: استفاده از روغن‌های خشک و مواد جاذب رطوبت.
- ۴- تجزیه شیمیایی و تولید گازهای نامطلوب
- عامل محیطی: تابش UV، میدان الکتریکی قوی.

1. M. Rafiq, Y. Lv, Y. Zhou, K. Ma, W. Wang, C. Li, Q. Wang, *Renew. Sust. Energ.*, 52, 308-324(2015).
2. E. Portfolio, *Transmission reliability and performance: 37.002, transformer life extension*, Accessed: Dec, 12 (2007) 2020.
3. M. Rafiq, M. Shafique, A. Azam, M. Ateeq, J. *Mol. Liq.*, 302, 112482(2020).
4. R. Liao, C. Lv, L. Yang, Y. Zhang, W. Wu, C. Tang, *J. Nanomater.*, 2013, 373959(2013).
5. E.C. Nsofor, *Recent Pat. Mech. Eng.*, 1, 190-197(2008).
6. S.U. Choi, J.A. Eastman, *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, Argonne National Lab.(ANL), Argonne, IL (United States), 1995.
7. D. Wen, Y. Ding, *IEEE Trans. Nanotechnol.*, 5, 220-227(2006).
8. P. Kopčanský, L. Tomčo, K. Marton, M. Koneracka, I. Potočová, M. Timko, J. Jadzyn, G. Czechowski, *Status Solidi B Basic Res.*, 236, 454-457(2003).
9. A. Hosseinpour, M.R. Abadchi, M. Mirzaee, F.A. Tabar, B. Ramezanzadeh, *Surf. Interfaces.*, 23, 100994(2021).
10. Z. Zhou, A. Seif, S. Pourhashem, J. Duan, A. Rashidi, P.L. Silvestrelli, X. Ji, M. Mirzaee, B. Hou, *Constr. Build. Mater.*, 384, 131229 (2023).
11. V. Segal, A. Rabinovich, D. Nattrass, K. Raj, A. Nunes, *J. Magn. Magn. Mater.*, 215, 513-515(2000).

حرارتی به‌طور کامل بررسی نشده است. در مقاله اشاره شده که تحقیقات محدودی درباره گرانبروی نانوسیالات مبتنی بر روغن انجام شده است و بررسی‌های مختلفی در این خصوص با انواع و اندازه‌های مختلف نانوذرات ارائه شده است. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که نانوسیالات قادر به بهبود قابل ملاحظه انتقال حرارت هستند و برای کاربردهای عملی در این حوزه بسیار مناسب‌اند. این موضوع افق جدیدی برای محققان به منظور طراحی دستگاه‌های انتقال حرارت فشرده و کارآمد فراهم می‌کند. بنابراین، نیاز به تحقیقات بیشتر برای درک ویژگی‌های پیچیده انتقال حرارت در نانوسیالات مبتنی بر روغن احساس می‌شود.

استحکام دی‌الکتریک و BDV نانوسیالات تاکنون به‌صورت کامل ارزیابی نشده‌اند. عواملی چون اندازه، شکل، غلظت، اصلاح سطح نانوذرات، محتوای رطوبت و فاصله الکترونی نیازمند بررسی جامع هستند. با این حال، تهیه نانوسیالات مبتنی بر روغن همچنان با چالش‌هایی مانند عدم توافق در نتایج و کاراکترسازی ضعیف مواجه است. تحقیقات جامع‌تر در این زمینه برای بهره‌برداری بهتر از این فناوری مورد نیاز است. بر اساس ادبیات موجود، تبیین شده است که هدایت حرارتی نانوسیالات به عنوان یک انگیزه برای بهبود عملکرد در کاربردهای مختلف شناخته می‌شود. نانوسیالات پتانسیل بالایی برای استفاده در کاربردهای متعدد دارند و یافته‌ها نشان داده‌اند که می‌توان خصوصیات حرارتی و رئولوژیکی آنها را بدون اتصال مستقیم به کاربردهای خاص بهبود بخشید. همچنین، استفاده از نانوسیالات می‌تواند باعث افزایش کارایی و کاهش اندازه دستگاه‌های تبادل حرارت شود. با وجود این، یافته‌های برخی محققان نشان‌دهنده تناقضاتی بین مدل‌ها و نتایج تجربی درباره هدایت حرارتی نانوسیالات است. اگرچه مکانیزم دقیق بهبود انتقال حرارت هنوز کاملاً مشخص نیست، اما چالش‌های شناسایی شده نیازمند راه حل هستند تا بتوان از ظرفیت کامل آنها بهره برد. پایداری و هزینه بالای تولید نانوسیالات نیز موارد مهمی هستند که پیش روی تجاری‌سازی گسترده آنها قرار دارد. پس از رفع این مسائل، انتظار می‌رود که نانوسیالات به عنوان خنک‌کننده‌ای مؤثر در دستگاه‌های تبادل حرارت جایگاه قابل توجهی کسب کنند.

23. M. Kole, T. Dey, *Thermochim. Acta*, 535, 58-65(2012).
24. J. Park, K. An, Y. Hwang, J.-G. Park, H.-J. Noh, J.-Y. Kim, J.-H. Park, N.-M. Hwang, T. Hyeon, *Nat. Mater.*, 3, 895-891(2004).
25. A. Nasiri, M. Shariaty-Niasar, A. Rashidi, A. Amrollahi, R. Khodafarin, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 35, 717-723(2011).
26. J.H. Fendler, *Korean J. Chem. Eng.*, 18, 1-13(2001).
27. A. Katiyar, P. Dhar, T. Nandi, L. S. Maganti, S. K. Das, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 23(6), 3494-3503(2016).
28. Y. Xuan, Q. Li, P. Tie, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 46, 259-262(2013).
29. I. Zakaria, M. Ahmad, Z. Abdul-Malek, M. Sidik, Z. Nawawi, M. Jambak, AC breakdown strength performance of plasma treated mineral oil-based nanofluids, 2017 International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICECOS), IEEE, 2017, pp. 333-337.
30. S.S. Dessouky, S.A.M. Abdelwahab, M. Shaban, Effect of titanium oxide nanoparticles on breakdown strength of transformer oil, 2017 Nineteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), IEEE, 2017, pp. 538-542.
31. G. Shukla, H. Aiyer, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 22, 2185-2190(2015).
32. P. Krajnik, F. Pusavec, A. Rashid, Nanofluids: properties, applications and sustainability aspects in materials processing technologies, *Advances in*
12. A. Zolriasatein, Z. RajabiMashhadi, D.H. Ardebili, N.R. Noori, M.R. Abadchi, M. Mirzaee, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 126, 103465(2023).
13. M. Shafique, X. Luo, *Mater.*, 12, 2493(2019).
14. M. Mirzaee, T. Mohebbi, M. Rezaei Abadchi, *Nashrieh Shimi va Mohandesi Shimi Iran*, 43, 63-98(2024).
15. J.G. Hwang, F. O'Sullivan, M. Zahn, O. Hjortstam, L.A. Pettersson, R. Liu, Modeling of streamer propagation in transformer oil-based nanofluids, 2008 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, IEEE, 2008, pp. 361-366.
16. M. Mirzaee, A. Rashidi, A. Zolriasatein, M. Rezaei Abadchi, *J. Polym. Res.*, 28, 62(2021).
17. M. Mirzaee, A. Yousefpour, T. Mohebbi, *Farayandno*, 19, 20-36(2024).
18. Y. Hwang, J.-K. Lee, J.-K. Lee, Y.-M. Jeong, S.-i. Cheong, Y.-C. Ahn, S.H. Kim, *Powder Technol.*, 186, 145-153 (2008).
19. Y. Li, S. Tung, E. Schneider, S. Xi, *Powder Technol.*, 196, 89-101 (2009).
20. P. Keblinski, S. Phillpot, S. Choi, J. Eastman, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 45, 855-863(2002).
21. I. Kaur, L.-J. Ellis, I. Romer, R. Tantra, M. Carriere, S. Allard, M. Mayne-L'Hermite, C. Minelli, W. Unger, A. Potthoff, *J. Vis. Exp.*, 130, 56074(2017).
22. C. Ying, Z. Zhaoying, Z. Ganghua, *Ultrasound Med. Biol.*, 32, 415-420 (2006).

40. S. Suresh, K. Venkitaraj, P. Selvakumar, M. Chandrasekar, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 38, 54-60(2012).
41. S.M. Abbasi, A. Rashidi, A. Nemati, K. Arzani, *Ceram. Int.*, 39, 3885-3891(2013).
42. D.K. Devendiran, V.A. Amirtham, *Renew. Sust. Energ.*, 60, 21-40 (2016).
43. A. Nasiri, M. Shariaty-Niasar, A.M. Rashidi, R. Khodafarin, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 55, 1529-1535(2012).
44. A. Rashidi, H. Ahmadi, S.S. Mohtasebi, M. Pourkhalil, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 48, 178-182(2013).
45. N. Putra, W. Roetzel, S.K. Das, *Heat Mass Transf.*, 39 775-784(2003).
46. D.H. Fontes ,G. Ribatski, E.P. Bandarra Filho, *Diam. Relat. Mater.*, 58, 115-121(2015).
47. J. Taha-Tijerina, T.N. Narayanan, G. Gao, M. Rohde, D.A. Tsentalovich, M. Pasquali, P.M. Ajayan, *ACS Nano*, 6, 1214-1220(2012).
48. S.H. Qing, W. Rashmi, M. Khalid, T. Gupta, M. Nabipoor, M.T. Hajibeigy, *Mater. Res. Express*, 4, 015504(2017).
49. A. Amiri, M. Shanbedi, G. Ahmadi, S. Rozali, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 83, 40-47(2017).
50. S.U. Ilyas, R. Pendyala, M. Narahari, L. Susin, *Energy Convers. Manage.*, 142, 215-229(2017).
51. B.C. Pak, Y.I. Cho, *Exp. Heat Transf.*, 11, 151-170(1998).
- Sustainable Manufacturing: Proceedings of the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Springer, 2011, pp. 107-113.
33. P. Muangpratoom, N. Pattanadech, A. Kunakorn, W. Vittayakorn, Impulse breakdown characteristic of mineral oil based nanofluid, 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), IEEE, 2017, pp. 1-4.
34. E.G. Atiya, D.-E.A. Mansour, R.M. Khattab, A.M. Azmy, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 22, 2463-2472 (2015).
35. H. Jin, Dielectric strength and thermal conductivity of mineral oil based nanofluids, Delft University of Technology, (2015) 1-170.
36. B. Du, J. Li, B.-M. Wang, Z.-T. Zhang, Preparation and breakdown strength of Fe₃O₄ nanofluid based on transformer oil, 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application, IEEE, 2012, pp. 311-313.
37. V. Charalampakos, A. Bakandritsos, G. Peppas, E. Pyrgioti, I. Gonos, A comparative study of natural ester based nanofluids with Fe₂O₃ and SiO₂ nanoparticles, 2017 IEEE 19th International Conference on Dielectric Liquids (ICDL), IEEE, 2017, pp. 1-4.
38. E.V. Timofeeva, M.R. Moravek, D. Singh, *J. Colloid Sci.*, 364, 71-79(2011).
39. H. Ahmadi, A. Rashidi, A. Nouralishahi, S.S. Mohtasebi, *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, 46, 142-147(2013).

64. H.E. Patel, T. Sundararajan, S.K. Das, J. Nanopart. Res., 12, 1015-1031(2010).
65. Y. Xuan, Q. Li, W. Hu, Aggregation structure and thermal conductivity of nanofluids, AIChE J., 49, 1038-1043(2003).
66. M. Mirzaee, A. Rashidi, A. Zolriasatein, M.R. Abadchi, Ceram. Int., 47, 5977-5984(2021).
67. M.M. Bhunia, S. Das, P. Chattopadhyay, S. Das, K.K. Chattopadhyay, Enhancement of thermal conductivity of transformer oil by exfoliated white graphene nanosheets, 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), IEEE, 2016, pp. 1-5.
68. S. Aberoumand, A. Jafarimoghaddam, Alex. Eng. J., 57, 169-174 (2018).
69. A. Beheshti, M. Shanbedi, S.Z. Heris, J. Therm. Anal. Calorim., 118, 1451-1460(2014).
70. M. Chopkar, S. Sudarshan, P. Das, I. Manna, Metall. Mater. Trans. A: Phys., 39, 1535-1542(2008).
71. H.-q. Xie, J.-c. Wang, T.-g. Xi, Y. Liu, Int. J. Thermophys., 23, 571-580(2002).
72. M.J. Pastoriza-Gallego, C. Casanova, J.a. Legido, M.M. Piñeiro, Fluid Ph. Equilib., 300, 188-196 (2011).
73. S. Sumathi, R. Rajesh, Current Sci., 118, 29-33(2020).
74. R. Karthik, T.S.R. Raja, R. Madavan, Arab. J. Sci. Eng., 38, 2725-2733(2013).
52. A. Amiri, M. Shanbedi, M.J. AliAkbarzade, J. Dispers. Sci. Technol., 37, 949-955(2016).
53. E.V. Timofeeva, J.L. Routbort, D. Singh, , J. Appl. Phys. 106 (2009).
54. A. Ghozatloo, A. Rashidi, M. Shariaty-Niassar, Exp. Therm. Fluid Sci., 53, 136-141(2014).
55. Y.-X. Zeng, X.-W. Zhong, Z.-Q. Liu, S. Chen, N. Li, J. Nanomater., 2013, 270490(2013).
56. Y.-j. Hwang, J. Lee, C. Lee, Y. Jung, S. Cheong, C. Lee, B. Ku, S. Jang, Thermochim. Acta, 455, 70-74(2007).
57. X. Wang, X. Xu, S.U. Choi, J. Thermophys. Heat Transf., 13, 474-480 (1999).
58. C. Chen, M. Niu, L. Wang, Y. Ge, M. Huang, Y. Lv, C. Li, Effect of nanoparticle type on prebreakdown and breakdown characteristics of transformer oil, 2018 IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD), IEEE, 2018, pp. 1-4.
59. M. Chiesa, S.K. Das, Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Asp., 335, 88-97(2009).
60. B. Du, X. Li, J. Li, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 22, 2530-2536 (2015).
61. W. Yao, Z. Huang, J. Li, L. Wu, C. Xiang, J. Nanomater., 2018, 4504208 (2018).
62. A.M. Gobin, M.H. Lee, N.J. Halas, W.D. James, R.A. Drezek, J.L. West, Nano lett., 7, 1929-1934 (2007).
63. C.P.Y. Alicia, R. W, M. Khalid, A.K. Rasheed, T. Gupta, J. Eng. Sci. Technol., 11, 140-152(2016).

87. T. Rouse, IEEE Electr. Insul. Mag., 14, 6-16(1998).
75. M. Maharana, M.M. Bordeori, S.K. Nayak, N. Sahoo, IET Sci. Meas. Technol., 12, 878-885(2018).
76. N. Baruah, M. Maharana, S.K. IET Sci. Meas. Technol., 13, 995-1002 (2019).
77. L. Dong, D. Johnson, Langmuir, 19, 10205-10209 (2003).
78. P. Sartoratto, A. Neto, E. Lima, A. Rodrigues de Sá, P. Morais, J. Appl. Phys., 97 (2005).
79. J. Kudelcik, P. Bury, P. Kopcansky, M. Timko, Physics procedia, 9, 78-81(2010).
80. D. Liu, Y. Zhou, Y. Yang, L. Zhang, F. Jin, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 23, 2757-2767(2016).
81. Y. Hwang, H. Park, J. Lee, W. Jung, Curr. Appl. Phys., 6, e67-e71(2006).
82. D. Wen, G. Lin, S. Vafaei, K. Zhang, Particuology, 7, 141-150(2009).
83. B. Baroli, M.G. Ennas, F. Loffredo, M. Isola, R. Pinna, M.A. López-Quintela, J. Invest. Dermatol., 127, 1701-1712(2007).
84. R.H. Hurt, M. Monthieux, A. Kane, Carbon, 44, 1028-1033(2006).
85. M. Geiser, B. Rothen-Rutishauser, N. Kapp, S. Schürch, W. Kreyling, H. Schulz, M. Semmler, V.I. Hof, J. Heyder, P. Gehr, Environ. Health Perspect., 113, 1555-1560 (2005).
86. L.E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, T.J. Painter, IEEE Trans. Power Syst., 19 230-239(2004).



Nanofluids in transformer insulation: synthesis, performance and future prospects

Majid Mirzaee*, Majid Rezaei Abadchi, Alimorad Rashidi

Non-metallic Group, Niroo Research Institute (NRI), Tehran, Iran

Abstract: With the increase in voltage levels in power transmission, the need to ensure the insulating performance of transformers has significantly increased. Mineral oil and paper are the main insulating components in oil-filled transformers. Given the growing demand for superior insulations, several researchers have conducted experimental studies to demonstrate the effectiveness and capabilities of transformer oils. To enhance the insulating level of ultra-high voltage transformers and reduce their weight and dimensions, it is essential to increase the dielectric strength of transformer oil and the cellulose impregnated. Recently, an innovative project has been implemented in the application of nanotechnology in the liquid insulations of transformers, with results indicating a significant improvement in the insulating properties of transformer oils. The field of oil-based transformer nanofluids has recently attracted considerable attention from both theoretical and practical perspectives. Nanofluids can be used as a potential replacement for mineral oils in the near future. This article reviews a collection of research conducted in this area, divided into three main sections. The first section focuses on the preparation of nanofluids, including various types of nanomaterials and synthetic methods for producing stable and suspended nanofluids. The second section thoroughly examines and compares the performance of nanofluids, concentrating on the thermal, electrical, and physicochemical properties of transformer oil. The third section addresses the advantages and limitations of nanofluids. The significance of this article lies in its compilation of previous studies, categorization of research nature, motivations, and predictions of future trends. Additionally, several recommendations for future research and applications of nanofluids are provided.

Keywords: Transformer, Oil, Nanofluid, Nanomaterials.