

خالص سازی یک نمونه کنده حفاری با استفاده از امواج ریزموج

شکوه نیک اندیش^۱، محمدصادق توللی^{۱*}، غلامرضا نجابت^۲ و^۳

^۱ گروه مهندسی شیمی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

^۲ گروه پژوهش های کاربردی، مرکز تحقیقات مهندسی شیمی، نفت و پلیمر، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

^۳ گروه مهندسی پلیمر، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران.

چکیده: کنده های حفاری حاوی مقدار زیادی آب و مواد نفتی است که باعث افزایش جرم و حجم آن و همچنین آلوده شدن محیط زیست می شود. برای حذف این ناخالصی ها از کنده ها از روش های مختلفی استفاده می شود. یکی از روش های خالص سازی این کنده ها استفاده از امواج الکترومغناطیس ریزموج می باشد. در این مقاله تاثیر امواج ریزموج در توان های مختلف بر روی خالص سازی کنده حفاری دریافت شده از میدان نفتی سروستان استان فارس مورد بررسی قرار گرفته است. جهت بررسی نظام مند تاثیر قدرت امواج و ترکیب کنده بر خالص سازی، از طراحی آزمون استفاده گردید (نرم افزار Design expert 11) که در آن تاثیر سه متغیر توان ریزموج، وزن اولیه کنده و نوع آب همراه با آن، بر روی میزان خالص سازی بررسی شد. تغییرات در وزن کنده حفاری با استفاده از اختلاف وزن قبل و بعد از پرتودهی به دست آمد. همچنین از آزمون های گرما وزن سنجی (TGA) و طیف سنجی مادون قرمز (FTIR) جهت دنبال کردن تغییرات استفاده شد. نتایج نشان داد که با افزایش توان امواج و یا کاهش وزن کنده، خالص سازی بهبود می یابد. همچنین TGA و FTIR نشان دادند در اثر پرتودهی کنده حفاری، ترکیبات مختلفی از قبیل آب و مولکول های آلی کنده را ترک می کنند. بهترین نتایج هنگامی حاصل شد که وزن نمونه ۵۰ گرم و توان امواج ۳۰۰ وات و آب همراه از نوع آب سازند انتخاب شد که در این حالت ناخالصی در کنده مورد بررسی از ۲۵ درصد وزنی به ۵ درصد وزنی کاهش یافت.

واژگان کلیدی: کنده حفاری، خالص سازی، محیط زیست، ریزموج، گرما وزن سنجی.

ms.tavallali@iau.ac.ir, gr.nejabat@iau.ac.ir

کنده های حفاری همواره با چالش های متنوعی مواجه بوده است، به نحوی که امکان بدست آوردن کنده های مناسب برای ارزیابی خواص سنگ همواره مشکلات متنوعی را داشته است. یکی از موانع و محدودیت های موجود در استفاده از کنده های بدست آمده از عملیات حفاری، وجود آلودگی های مختلف درون نمونه سنگ بدست آمده است که منجر به نفوذ ناخالصی های مختلف درون محیط متخلخل سنگ شده و باعث تفاوت در ساختار و

۱- مقدمه

مطالعه ای ساختار و ویژگی های نمونه سنگ های سازند اطلاعات ارزشمندی در خصوص ویژگی های مخازن نفت موجود در اعماق زمین فراهم می کند که یکی از روش ها برای نیل به هدف بیان شده، مطالعه ای کنده های حفاری^۱ است. البته دسترسی به

¹ Drill cuttings

ویژگی‌های نمونه سنگ در مقایسه با نمونه سنگ واقعی موجود درون زمین می‌شوند. به همین دلیل نتایج بدست آمده از آنالیز کنده‌های حفاری، عموماً با نتایج واقعی سنگ مغایرت داشته و باعث بروز خطا در محاسبات بعدی می‌شود [۱، ۲].

رفع آلودگی از نمونه‌های سنگ و کنده‌های بدست آمده از عملیات حفاری به منظور تخمین و اندازه‌گیری دقیق‌تر خواص سنگ و سیالات درون آن به عنوان یک ضرورت مطرح است. در این خصوص باید توجه داشت که فرآیند رفع آلودگی نباید به ساختار فیزیکی و شیمیایی کنده‌ها آسیب وارد نماید؛ در غیر این صورت مطالعه و شناسایی ویژگی‌های ساختاری کنده‌ها از قبیل ترشوندگی، توزیع اندازه حفرات سنگ، تخلخل و تراوایی با چالش مواجه خواهد شد. در همین راستا روش‌های غیر مخرب مختلفی برای از بین بردن آلودگی کنده‌های حفاری ارائه شده‌اند. استفاده از امواج در سال‌های اخیر به منظور پاک‌سازی و رفع آلودگی از کنده‌های حفاری بیش از پیش مورد توجه بوده است و پژوهش‌های مختلفی در این زمینه انجام شده است [۱-۳].

یکی دیگر از چالش‌ها در زمینه کنده‌های حفاری، حجم و وزن بالای این مواد است که باعث شده فضای اشغال شده توسط آنها قابل توجه باشد و جابجایی و حمل و نقل آن‌ها هزینه بر باشد و مشکلات اقتصادی قابل توجهی برای دست اندرکاران این موضوع ایجاد کند. با خشک‌سازی و خالص‌سازی این کنده‌ها، حجم و وزن آن‌ها نیز کاهش می‌یابد و فضای کمتری اشغال می‌کند و جابجایی و انتقال آن‌ها نیز راحت‌تر صورت می‌گیرد.

موضوع مهم دیگر که باید مورد توجه قرار گیرد بحث زیست محیطی مربوط به آلودگی‌ها و مواد شیمیایی سمی همراه با کنده‌های حفاری است به نحوی که حضور کنده‌های حفاری آلوده روی سطح زمین، یا در چاه‌های موجود در خشکی، یا نفوذ این مواد به آب اقیانوس‌ها و دریاها در چاه‌های فراساحلی باعث آسیب‌های جبران‌ناپذیر و جدی به محیط زیست شده و خطری جدی در حفظ سلامت جانداران محسوب می‌شود [۴-۶]. در همین راستا استفاده از امواج ریزموج به عنوان یک روش نوین جهت پاک‌سازی نمونه‌های سنگ و کنده‌های حفاری مطرح است. کنده‌های حفاری محصول جانبی سمی و غیر قابل اجتنابی هستند که در فرآیند حفاری به وجود می‌آیند. تقریباً ده درصد

حجمی از پسماندهای حفاری را، کنده‌های حفاری تشکیل می‌دهند. در طی فرآیند حفاری، سیال همراه کنده‌های حفاری با آب، نفت و مواد شیمیایی دیگر ترکیب شده و مخلوطی سمی را به وجود می‌آورند که می‌تواند مواد شیمیایی سمی همچون نفت، روغن، جامدات سوسپانسیون فنل، آرسنیک، کروم، کادمیوم، سرب و جیوه و مواد رادیواکتیو طبیعی و باریم را با خود به همراه داشته باشد. ترکیبات ذکر شده تحت شرایطی همچون موقعیت و عمق چاه و یا نوع سیمان استفاده شده در فرآیند حفاری، دست خوش تغییر می‌شوند. مقدار کنده‌های حفاری بسته به شرایطی همچون بزرگتر شدن دهانه چاه و یا عمیق‌تر شدن آن افزایش می‌یابد [۷]. از جمله آسیب‌های پسماندهای ناشی از کنده‌های حفاری می‌توان به اثرات سمی روی گیاهان، اختلال فعالیت‌های بیولوژیک خاک و اثرات زیان‌بار روی انسان در اثر ورود مواد سمی به زنجیره غذایی اشاره کرد [۸].

در دو دهه گذشته استفاده از امواج ریزموج به روشی رایج در فرآیندهای شیمیایی تبدیل شده است. مزایای اصلی این روش شامل زمان‌های کوتاه واکنش، عدم نیاز به حلال، و بازده بالا می‌باشد [۹-۱۱]. همچنین این روش میزان مصرف انرژی را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و لذا یکی از گزینه‌های بهینه کردن فرآیندهای مختلف به حساب می‌آید. همچنین این فناوری هم‌خوانی قابل قبولی با قوانین شیمی سبز دارد و برای محیط زیست مشکلی به وجود نمی‌آورد [۱۲]. فرکانس ریزموج‌هایی که عموماً در فرآیندهای شیمیایی استفاده می‌شود ۲/۴۵ گیگا هرتز می‌باشد که انرژی فوتون‌های گسیل شده آن در حدی نیست که بتواند پیوندهای مولکولی را بشکند؛ لذا امواج ریزموج نمی‌توانند به صورت مستقیم منجر به واکنش شیمیایی شوند. در واقع ساز و کار عملکرد امواج ریزموج بر اساس گرمایش دی‌الکتریکی است که این موضوع به توانایی مواد موجود در واکنش جهت جذب امواج الکترومغناطیس و تبدیل آن به حرارت بر می‌گردد. این مواد باید حتماً دارای ممان دوقطبی دائمی باشند تا بتوانند امواج ریزموج را به حرارت تبدیل کنند [۱۳-۱۵].

در راستای استفاده از مزایای بیان شده برای امواج ریزموج، پژوهشگران به بررسی تاثیر آن بر روی کاهش آلودگی‌های کنده‌های حفاری پرداخته‌اند. نتایج آن‌ها حاکی از کم شدن قابل توجه میزان نفت درون کنده‌ها در مدت زمان کوتاه پرتودهی بوده

از آن جا که برخی مواد موجود در کنده‌ها از قبیل آب یا ترکیبات گوگرددار و نیتروژن‌دار، قطبی و دارای ممان دوقطبی دائمی هستند می‌توانند امواج ریزموج را به حرارت تبدیل نمایند و این حرارت منجر به تبخیر و تخریب آب و مواد آلی زائد موجود در کنده شوند؛ لذا در این پژوهش به بررسی تاثیر این امواج در رفع آلودگی از کنده‌های حفاری و کنده‌های فرموله شده پرداخته شده است. همچنین برای بررسی هم‌زمان تاثیر عوامل مستقل بر روی متغیرهای وابسته از طراحی آزمون استفاده شده است.

۲- بخش تجربی

۲-۱- مواد مورد استفاده

کنده حفاری استفاده شده در این پژوهش از میدان نفتی سروستان واقع در جنوب غربی ایران دریافت شد. همچنین در این پژوهش از آب دریا و آب سازند برای ساخت کنده حفاری (فرموله شده) استفاده شد. مشخصات آب دریا (خلیج فارس) و آب سازند استفاده شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

۲-۲- روش کار

از دستگاه ماکروفر خانگی ۲۰ لیتری با برند Geepas از نوع GMO1894 1200W Solo Microwave با ۶ سطح توان تابش استفاده شد که سطوح انتخاب شده در متن مقاله معرفی شده‌اند. سه متغیر مستقل شامل جرم (وزن) کنده حفاری، نوع آب و توان ریزموج در نظر گرفته شدند و میزان کاهش وزن به عنوان پاسخ انتخاب شد. علاوه بر کنده پایه، برای تهیه کنده‌ها با فرمولاسیون مورد نظر نیز اجزای آن (کنده و آب‌های مختلف) در بشر دو لیتری ریخته شده و با استفاده از مخلوط‌کن مکانیکی تا حصول یک کنده یکنواخت هم‌زدن ادامه یافت. پس از آن مقدار مورد نظر از کنده‌ی مورد بررسی در یک بشر شیشه‌ای ریخته شده و برای مدت زمان ۵ دقیقه تحت تابش امواج ریزموج قرار داده شد. برای بررسی ضریب تاثیر فاکتورهای مستقل و همچنین تاثیر هم‌زمان آن‌ها بر روی نتایج و بهینه شدن تعداد آزمایش‌ها از طراحی آزمون در نرم افزار Design Expert 10 استفاده گردید (جدول ۲). برای به دست آوردن میزان خالص‌سازی کنده‌ها از اندازه‌گیری جرم کنده

است [۱۶]. همچنین با افزایش توان امواج، میزان بازده فرآیند خالص‌سازی افزایش می‌یابد [۱۷]. غلظت سیال حفاری درون کنده‌ها، جرم کنده‌های آلوده شده توسط سیال حفاری و انرژی اعمال شده به نمونه‌ها توسط امواج ریزموج به عنوان عوامل تاثیرگذار در بازده عملیات پاک‌سازی کنده‌ها مطرح شده‌اند [۱۸]. میزان اشباعیت اولیه کنده حفاری، نوع سیال حفاری درون نمونه‌ها و میزان تنش وارد شده بر کنده‌ها نقش کلیدی در بازده فرآیند خالص‌سازی توسط امواج دارند. در همین راستا، با افزایش وزن کنده حفاری، بازده عملیات خالص‌سازی و در نتیجه رفع آلودگی کنده کاهش می‌یابد. با افزایش فشار مکانیکی بر روی کنده‌ها نیز، میزان خشک‌شدن آن‌ها بهبود می‌یابد [۱۹]. استفاده از امواج ریزموج نسبت به استفاده از امواج الکتریکی بازده بیشتری در خشک کردن و پاک‌سازی کنده‌های حفاری آلوده دارد [۲۰]. استفاده از امواج ریزموج منجر به کاهش محسوس در میزان نفت باقیمانده درون محیط متخلخل کنده‌های حفاری آلوده می‌شود. همچنین با کاهش ضخامت کنده‌های حفاری و افزایش لرزش مکانیکی در نمونه‌ها، میزان بازده عملیات پاک‌سازی کنده‌ها بهبود می‌یابد. مزایای اقتصادی عملیات خالص کردن کنده‌های حفاری توسط امواج ریزموج در مقایسه با سایر روش‌های معمول اثبات شده است [۲۱].

یکی از راهکارهای معمول جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها و پیرو آن کاهش هزینه‌ها، زمان مورد نیاز و انرژی مورد نیاز و همچنین افزایش سرعت دستیابی به رابطه بین عوامل متغیر و وابسته در آزمایش‌ها استفاده از روش‌های مختلف طراحی آزمایش می‌باشد که یکی از این روش‌های معمول روش سطح پاسخ (RSM)^۱ است. این روش زمانی که در یک فرآیند تاثیرات چندین پارامتر بر روی یک یا چند پاسخ مورد بررسی قرار می‌گیرد، به خوبی قابلیت کاربرد دارد و هدف آن بهینه سازی هم‌زمان مقادیر این پارامترها برای دست یابی به بهترین عملکرد سامانه است. البته روش سطح پاسخ به چندین صورت قابل استفاده بوده که می‌توانند در حالات مختلف مورد استفاده قرار گیرند. در این روش‌ها با برازش (فیت کردن) یک معادله چند جمله‌ای بر روی نتایج تجربی، تاثیرات هم‌زمان پارامترهای مستقل بر روی پارامتر وابسته مشخص می‌شود [۲۲-۲۴].

¹ Response Surface Methodology

جدول ۱. ویژگی‌های آب سازند و آب دریا مورد استفاده در آزمایش.

آب	چگالی g.cm ⁻³	HCO ₃ ⁻ ppm	Cl ⁻ ppm	SO ₄ ²⁻ ppm	Ca ²⁺ ppm	Mg ²⁺ ppm	Na ⁺ ppm	K ⁺ ppm	TDS ppm	CN ⁻ ppm	pH
سازند	۱/۱۵	۴۸۸	۵۷۳/۱۳۹	۷۵۰	۴۰۰/۱۰	۴۵۸/۱	۲۵۱/۷۶	-	۲۰۰/۰۰۰	-	۶/۶
دریا	۱/۰۳۴	۲۲۸/۷	۱۷۵/۳۰	۳۶۰/۳	۲۵۰/۱	۵۰۰/۱	۷۸۰/۱۸	۷۲۷	۵۶/۰۲۱	۰/۰۵۲	۷/۵۳

TDS: Total Dissolved Solids

جدول ۲. متغیرهای مستقل (پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار طراحی آزمون) و نتایج حاصل از انجام آزمون‌ها (پاسخ).

متغیرهای مستقل						پاسخ
شماره	توان (وات)	جرم کنده (گرم)	نوع نمونه	جرم ثانویه (گرم)	اختلاف جرم	کاهش جرم (%)
۱	۳۰۰	۵۰	پایه + آب دریا	۳۵/۵	۱۴/۵	۲۹
۲	۳۰۰	۲۰۰	پایه + آب دریا	۱۷۸/۸	۲۱/۲	۱۰/۶۰
۳	۳۰۰	۱۲۵	پایه + آب سازند	۹۶/۶۱	۲۸/۳۹	۲۲/۷۱
۴	۳۰۰	۱۲۵	پایه	۹۸/۸	۲۶/۲	۲۰/۹۶
۵	۲۰۰	۲۰۰	پایه + آب سازند	۱۸۴/۴۷	۱۵/۵۳	۷/۷۷
۶	۲۰۰	۵۰	پایه + آب سازند	۳۷/۲۱	۱۲/۷۹	۲۵/۵۸
۷	۲۰۰	۱۲۵	پایه + آب دریا	۱۰۷/۷	۱۷/۳	۱۳/۸۴
۸	۱۰۰	۲۰۰	پایه + آب دریا	۱۹۰/۰۱	۹/۹۹	۵
۹	۱۰۰	۱۲۵	پایه + آب سازند	۱۱۴/۱۹	۱۰/۸۱	۸/۶۵
۱۰	۱۰۰	۱۲۵	پایه	۱۱۲/۲	۱۲/۸	۱۰/۲۴
۱۱	۲۰۰	۱۶۲/۵	پایه + آب سازند	۱۴۴/۶۷	۱۷/۸۳	۱۰/۹۷
۱۲	۲۰۰	۵۰	پایه + آب سازند	۳۷/۲۷	۱۲/۷۳	۲۵/۴۶
۱۳	۲۰۰	۱۲۵	پایه	۱۰۴/۱	۲۰/۹	۱۶/۷۲
۱۴	۲۰۰	۵۰	پایه	۳۸	۱۲	۲۴
۱۵	۲۰۰	۱۲۵	پایه + آب دریا	۱۰۶/۵	۱۸/۵	۱۴/۸۰
۱۶	۲۰۰	۲۰۰	پایه	۱۸۵/۹	۱۴/۱	۷/۰۵

حفاری به کمک ترازوی دو رقم اعشار، قبل و پس از پرتودهی استفاده شد. در پایان برای ارزیابی و تحلیل بهتر نتایج حاصل از مرحله خالص سازی، نمونه های مورد بررسی قبل و بعد از پرتودهی توسط آزمون های گرما وزن سنجی (TGA) در دامنه دمایی ۲۵ تا ۷۰۰ درجه سانتی گراد و طیف سنجی مادون قرمز (FTIR) آنالیز شدند.

۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از بررسی تغییرات وزن کنده های حفاری در اثر پرتودهی ریزموج (پاسخ) در جدول ۲ بیان شده اند. با ارائه این نتایج به نرم افزار و تحلیل و برازش نتایج مشخص شد که بهترین برازش بر روی مدل های خطی و ۲FI اتفاق می افتد. از بین این دو روش، روش ۲FI عدم برازش کمتری نشان داد (۰/۲۸۵۵ = مقدار p عدم برازش). جزئیات مربوط به آنالیز واریانس (ANOVA) مدل پیشنهاد شده توسط نرم افزار در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج مندرج در جدول ۳، p-value

برای متغیرهای توان (A)، جرم کنده حفاری (B)، تاثیر همزمان توان و جرم کنده حفاری (AB) و همچنین تاثیر همزمان جرم کنده حفاری و نوع آب سازند (BC) کمتر از مقدار ۰/۰۵ می باشد که نشان دهنده با معنی بودن و تاثیر گذاری قابل توجه آن ها بر روی نتیجه نهایی یعنی میزان خالص سازی کنده حفاری است. علاوه بر این همان طور که در جدول نشان داده شده است میزان عدم برازش مدل نیز بی معنی بوده (۰/۲۸۵۵ = p) و به معنای این است که مدل انتخاب شده بر روی داده های به دست آمده برازش دارد و نیازی به تغییر مدل نیست. خلاصه آماری آنالیز واریانس و آنالیز خطی سازی میزان خالص سازی های به دست آمده در جدول ۴ نشان داده شده است. همان طور که از جدول ۴ بر می آید دقت کافی مدل (Adequate Precision) برابر با ۴۲/۷۵۹۷ شده است که از مقدار مرزی ۴ خیلی بالاتر است و حاکی از برازش ایده آل آن و همچنین نسبت زیاد سیگنال به نویز است.

جدول ۳. آنالیز واریانس مدل 2Fi برازش شده بر روی پاسخ های حاصل.

منبع	مجموع مربعات	درجه آزادی	مربع میانگین	مقدار F	مقدار p	تاثیر
مدل	۸۹۷/۵۵	۹	۹۹/۷۳	۱۹۷/۸۵	<۰/۰۰۰۱	معنی دار
A: توان	۱۷۰/۲۳	۱	۱۷۰/۲۳	۳۳۷/۷۳	<۰/۰۰۰۱	
B: وزن	۵۷۷/۸۱	۱	۵۷۷/۸۱	۱۱۴۶/۳۴	<۰/۰۰۰۱	
C: نوع آب	۴/۶۷	۲	۲/۳۳	۴/۶۳	۰/۰۶۰۷	
AB	۷/۱۸	۱	۷/۱۸	۱۴/۲۵	۰/۰۰۹۲	
AC	۳/۲۰	۲	۱/۶۰	۳/۱۷	۰/۱۱۴۸	
BC	۵/۲۸	۲	۲/۶۴	۵/۲۳	۰/۰۴۸۴	
باقیمانده	۳/۰۲	۶	۰/۵۰۴۰			
عدم برازش	۲/۵۶	۴	۰/۶۳۹۱	۲/۷۳	۰/۲۸۵۵	بی معنی
خطای خالص	۰/۴۶۸۰	۲	۰/۲۳۴۰			
مجموع کُر	۹۰۰/۵۸	۱۵				

جدول ۴. خلاصه آماری آنالیز واریانس (ANOVA) و آنالیز رگرسیون میزان کاهش جرم (خالص سازی) به دست آمده.

مدل پاسخ	R^2	R^2 تنظیم شده	دقت کافی
کاهش جرم	۰/۹۹۶۶	۰/۹۹۱۶	۴۲/۷۵۹۷

معادله واقعی (Actual Equation) به دست آمده برای میزان خالص سازی (درصد کاهش جرم) به صورت های زیر به دست آمدند:

در صورت استفاده فقط از پایه:

$$\text{توان} \times ۰/۰۹۸۲۶۷ + ۱۰/۲۶۵۶۷ = \text{درصد کاهش جرم}$$

$$\text{جرم} \times \text{توان} - ۰/۰۰۰۳۵۷ - \text{جرم} \times ۰/۰۴۱۵۳۳$$

در صورت استفاده از پایه و آب سازند:

$$\text{توان} \times ۰/۱۱۴۹۶۷ + ۸/۳۵۱۰۴ = \text{درصد کاهش جرم}$$

$$\text{جرم} \times \text{توان} - ۰/۰۰۰۳۵۷ - \text{جرم} \times ۰/۰۵۰۵۳۵$$

در صورت استفاده از پایه و آب دریا:

$$\text{توان} \times ۰/۰۹۹۴۶۷ + ۵/۲۹۳۳۳ = \text{درصد کاهش جرم}$$

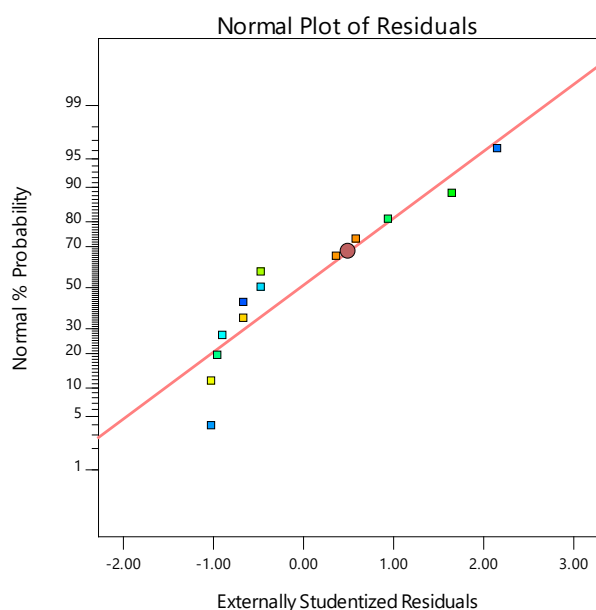
$$\text{جرم} \times \text{توان} - ۰/۰۰۰۳۵۷ - \text{جرم} \times ۰/۰۱۵۴۶۷$$

با استفاده از این معادلات می توان میزان پاکسازی کننده حفاری در مقادیر مختلف متغیرهای توان و جرم و نوع آب (سازند یا دریا یا مخلوط آن ها) را پیش بینی کرد. البته باید مقادیر استفاده شده در این معادلات حتما در دامنه تعریف شده برای هر کدام از متغیرها در جدول ۲ باشد.

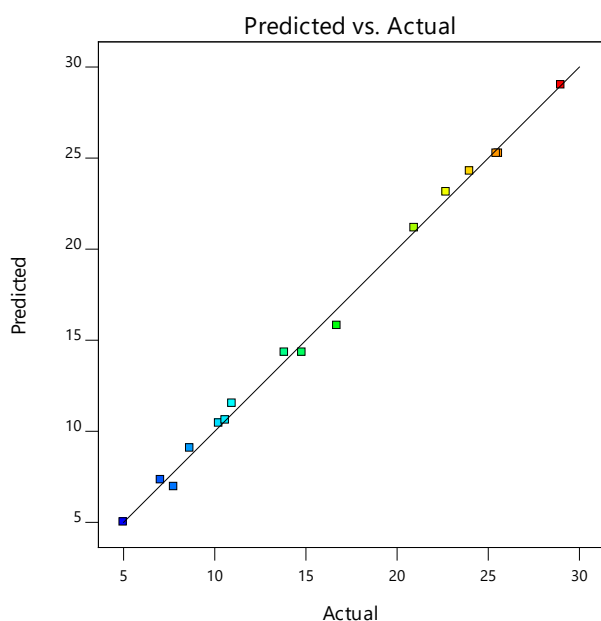
ارزیابی مدل های خطی سازی (رگرسیون) به کمک ابزارهای تشخیصی شکل ۱ و شکل ۲ نیز حاکی از توزیع تقریباً نرمال باقیمانده ها و نزدیکی بسیار زیاد داده های واقعی (تجربی) و داده های پیش بینی شده توسط مدل بود. لذا می توان گفت که فرضیات مدل مورد استفاده قابل اعتماد بوده و خطای قابل توجهی وجود ندارد و نیازی به استفاده از مدل جدید نمی باشد.

نمودار سطح سه بعدی ارائه شده توسط نرم افزار در تمام حالات آب سازندی در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که از تصاویر مشخص است نوع آب سازندی در روند نتایج تاثیر چندانی نداشته است.

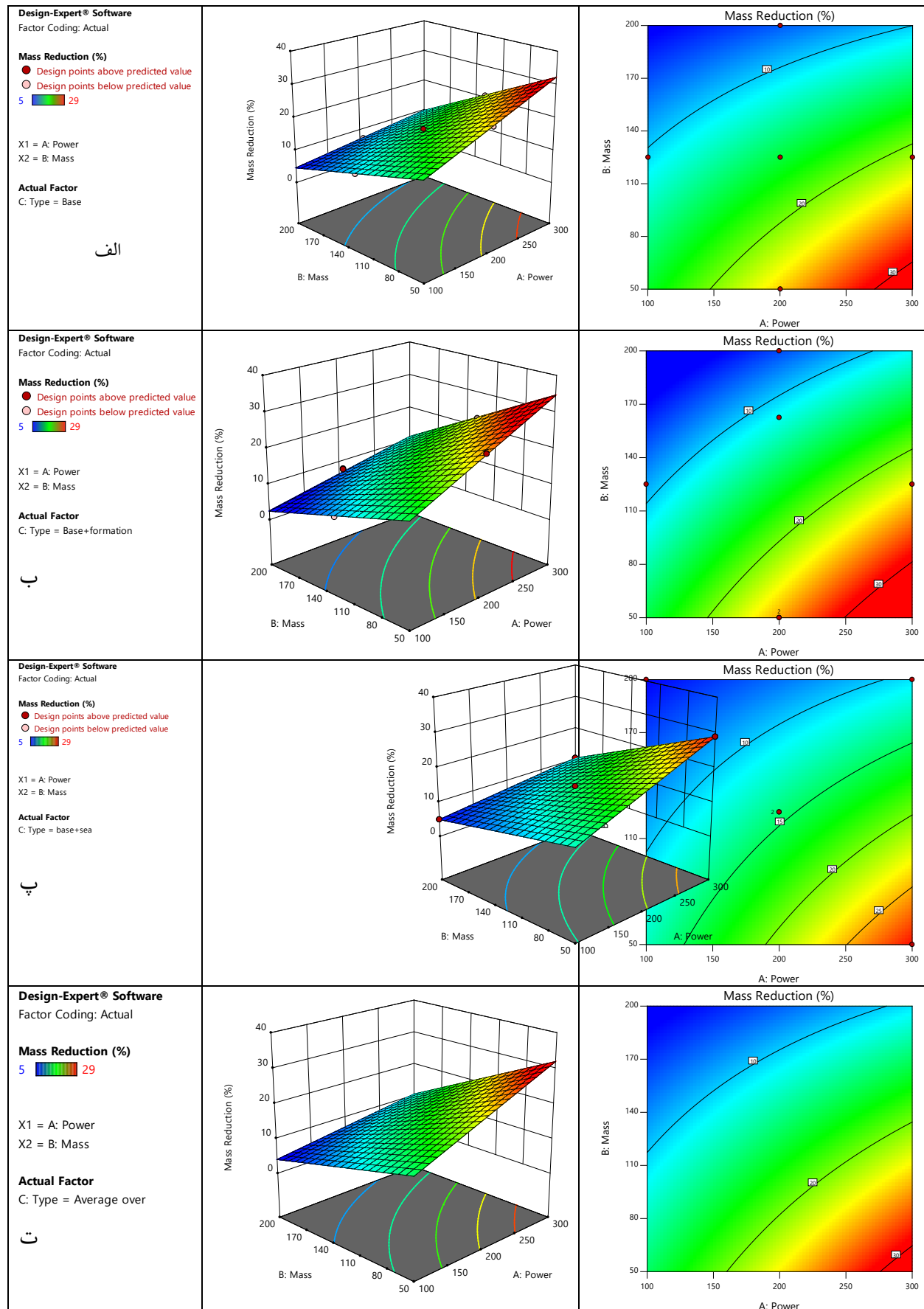
همچنین در این شکل تاثیر جرم کننده حفاری و توان ریزموج بر روی پاسخ متغیر میزان خالص سازی (درصد کاهش جرم) به صورت نمودارهای سه بعدی و کانتور برای سه حالت آب های مختلف و همچنین میانگین نتایج حاصل از آن ها نشان داده شده است (هر ردیف نشان دهنده یک حالت است). بر اساس این نمودارها میزان خالص سازی قابل قبولی اتفاق افتاده است و در مدت زمان پرتو دهی ثابت ۵ دقیقه ای هرچه توان امواج ریزموج افزایش یافته است و یا وزن کننده مورد استفاده کاهش یافته است



شکل ۱. نمودار درصد احتمال نرمال بر حسب باقیمانده استاندارد شده داخلی.



شکل ۲. نمودار مقادیر پیش بینی شده توسط مدل در برابر مقادیر واقعی.



شکل ۳. نمودار سطح سه بعدی و کانتور حاصل از تحلیل نتایج پاکسازی در چهار حالت استفاده از آب های همراه مختلف در کنده های حفاری: (الف) پایه، (ب) پایه+سازند، (پ) پایه+آب دریا، (ت) میانگین آب ها.

مقایسه با آب سازند میزان تبدیل امواج ریزموج به حرارت کمتر شده و میزان خالص سازی کم می شود.

در بررسی گرما وزن سنجی (TGA) نمونه ها، بر اساس نتایج به دست آمده در مراحل قبل (جدول ۳) سه نمونه انتخاب شدند و مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج TGA و DTG این سه نمونه در شکل ۴ نشان داده شده است. این نمونه ها شامل نمونه پایه، ۱ و ۸ بوده است. همان طور که از نمودارها مشخص است نمونه شماره ۱ کمترین کاهش وزن را از خود نشان داده است که تایید کننده نتایج حاصل از محاسبه تغییر وزن توسط ترازو (جدول ۲) در مراحل قبل نیز است؛ یعنی امواج ریزموج به خوبی توانسته اند این نمونه را پاک سازی کنند و ناخالصی باقی مانده کمی در آن وجود دارد. نمونه شماره ۸ نیز بیشترین کاهش وزن را در آنالیز گرما وزن سنجی از خود نشان داد که حاکی از ناخالصی زیاد آن بعد از دریافت امواج ریزموج می باشد. این نتیجه نیز تایید کننده نتایج حاصل در مراحل قبل (جدول ۲) می باشد یعنی شرایط انتخاب شده برای خالص سازی به اندازه کافی موثر نبوده است. نمودار کنده پایه نیز به عنوان معیاری جهت مقایسه با سایر نمونه ها آورده شده است. هم چنین همان طور که از تمام نمودارها مشخص است تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی گراد که تمامی ترکیبات آبی و آلی تبخیر یا تخریب می شوند در نمونه شماره ۱، حداکثر ۵٪ کاهش وزن مشاهده شد، در کنده پایه، ۱۵٪ کاهش وزن و برای نمونه شماره ۸، ۲۵٪ کاهش وزن مشاهده گردید که این موضوع حاکی از موثر بودن این روش خالص سازی می باشد.

میزان پاک سازی افزایش یافته است. با افزایش توان ریزموج، در مدت زمان ثابت میزان انرژی بیشتری به نمونه وارد شده و میزان آب و مواد آلی بیشتری (در اثر تبخیر و تخریب) حذف می شوند و با کاهش جرم کنده نیز هم میزان ناخالصی ها کمتر شده و هم میزان نفوذ پرتوها بیشتر اتفاق می افتد و لذا آب و مواد آلی بهتر و کامل تر حذف می شوند و پاک سازی بهتر اتفاق می افتد. هم چنین نوع آب مورد استفاده نیز بر روی میزان پاک سازی تاثیر محسوسی داشته است به نحوی که هنگام استفاده از آب سازند در مقابل با آب دریا میزان کاهش جرم بیشتر شده است. بیشترین کاهش وزن کنده حفاری مربوط به توان ۳۰۰ وات از امواج تابشی و کنده حاوی سیال پایه + آب دریا، و هم چنین کمترین کاهش در وزن کنده حفاری مربوط به امواج با توان ۱۰۰ وات و کنده حاوی سیال پایه + آب سازند به دست آمد. ممکن است با مقایسه میزان ترکیبات معدنی (مواد نامحلول) موجود در آب سازند و آب دریا (جدول ۱) انتظار داشت که میزان کاهش وزن کنده حفاری حاوی آب سازند کمتر باشد. اما اولاً میزان اختلاف بسیار کم است (۱۵۰ قسمت در میلیون یعنی در ۱ گرم آب، اختلافی معادل با ۰/۰۰۰۱۵۰ گرم حاصل می شود که بسیار کم است) و از طرفی دیگر همین اختلاف بسیار کم در مقدار ترکیبات معدنی در این دو نوع آب باعث می شود که قطبیت کنده حفاری حاوی آب سازند بیشتر شده و در نتیجه امواج ریزموج را بیشتر به حرارت تبدیل کند [۱۳-۱۵] و دما بالاتر رود و میزان پاک سازی افزایش چشمگیری یابد.

۳-۱- بهینه سازی شرایط خالص سازی

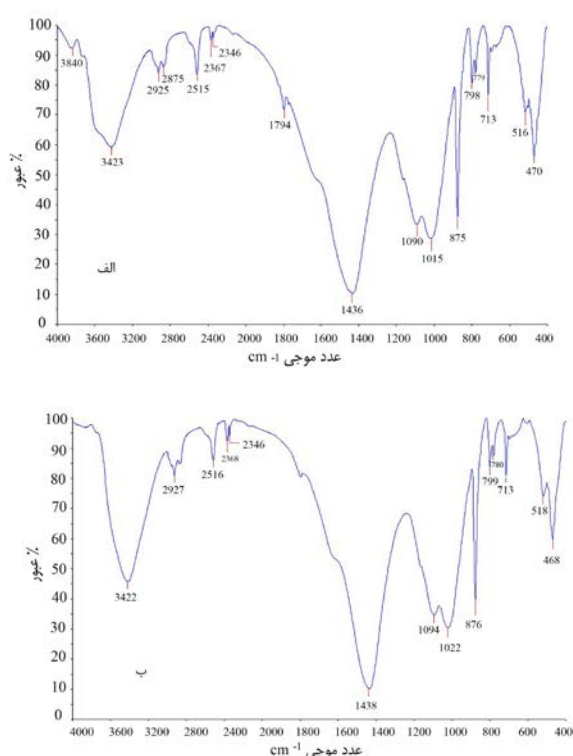
در فرآیند بهینه سازی، عوامل متعددی می تواند مد نظر قرار گیرد. مسلماً خالص سازی کنده حفاری هدف اصلی و مهم است. اما میزان انرژی مورد استفاده برای این کار نیز باید مد نظر قرار گیرد. لذا در محدودیت هایی که برای بهینه سازی در نرم افزار تعریف شد موارد بیان شده در جدول ۵ در نظر گرفته شدند. بر اساس این محدودیت های تعریف شده، نرم افزار تعداد ۳۰ راه حل برای رسیدن به هدف مورد نظر پیشنهاد داد که در جدول ۶ نشان داده شده اند. با توجه به جدول کمترین درجات مطلوبیت برای مواردی به دست آمد که حاوی آب دریا بودند که همان طور که قبلاً گفته شد به دلیل کمتر بودن املاح موجود در آب دریا در

جدول ۵. محدودیت های در نظر گرفته شده برای بهینه سازی.

متغیر	هدف	حد پایین	حد بالا	وزن پایین	وزن بالا	اهمیت
A: توان	کمینه	۱۰۰	۳۰۰	۱	۱	۳
B: وزن	در محدوده	۵۰	۲۰۰	۱	۱	۳
C: نوع آب	در محدوده	پایه	پایه + آب دریا	۱	۱	۳
کاهش وزن	بیشینه	۵	۲۹	۱	۱	۳

جدول ۶ راه حل های پیشنهادی جهت رسیدن به اهداف مورد نظر در فرآیند خالص سازی کنده ها.

شماره راه حل پیشنهادی	توان (وات)	جرم (گرم)	نوع آب	درصد کاهش وزن	مطلوبیت
۱	۱۳۰	۵۰	پایه	۱۸/۶	۰/۶۹۵
۲	۱۲۹	۵۰	پایه	۱۸/۶	۰/۶۹۵
۳	۱۳۱	۵۰	پایه	۱۸/۷	۰/۶۹۵
۴	۱۳۲	۵۰	پایه	۱۸/۸	۰/۶۹۵
۵	۱۲۸	۵۰	پایه	۱۸/۵	۰/۶۹۵
۶	۱۲۷	۵۰	پایه	۱۸/۴	۰/۶۹۵
۷	۱۳۳	۵۰	پایه	۱۸/۹	۰/۶۹۵
۸	۱۳۴	۵۰	پایه	۱۹	۰/۶۹۵
۹	۱۴۰	۵۰	پایه	۱۹/۵	۰/۶۹۴
۱۰	۱۴۵	۵۰	پایه + آب سازند	۲۰	۰/۶۹۴
۱۱	۱۴۶	۵۰	پایه + آب سازند	۲۰	۰/۶۹۴
۱۲	۱۴۴	۵۰	پایه + آب سازند	۱۹/۸	۰/۶۹۴
۱۳	۱۴۳	۵۰	پایه + آب سازند	۱۹/۷	۰/۶۹۴
۱۴	۱۴۸	۵۰	پایه + آب سازند	۲۰/۳	۰/۶۹۴
۱۵	۱۱۵	۵۰	پایه	۱۷/۴	۰/۶۹۲
۱۶	۱۴۵	۵۰	پایه	۱۹/۹	۰/۶۹۲
۱۷	۱۵۷	۵۰	پایه + آب سازند	۲۱/۱	۰/۶۹۲
۱۸	۱۴۹	۵۰	پایه	۲۰/۳	۰/۶۹۰
۱۹	۱۰۰	۵۰	پایه	۱۶	۰/۶۷۶
۲۰	۱۸۲	۵۰	پایه + آب سازند	۲۳/۵	۰/۶۷۴
۲۱	۱۸۵	۵۰	پایه + آب سازند	۲۳/۸	۰/۶۷۱
۲۲	۱۵۳	۵۰	پایه + آب دریا	۱۷	۰/۶۰۶
۲۳	۱۵۴	۵۰	پایه + آب دریا	۱۷/۱	۰/۶۰۶
۲۴	۱۵۱	۵۰	پایه + آب دریا	۱۶/۹	۰/۶۰۶
۲۵	۱۵۵	۵۰	پایه + آب دریا	۱۷/۲	۰/۶۰۶
۲۶	۱۵۱	۵۰	پایه + آب دریا	۱۶/۸	۰/۶۰۶
۲۷	۱۶۳	۵۰	پایه + آب دریا	۱۷/۸	۰/۶۰۵
۲۸	۱۳۹	۵۰	پایه + آب دریا	۱۵/۸	۰/۶۰۳
۲۹	۱۱۶	۵۰	پایه + آب دریا	۱۴	۰/۵۸۷
۳۰	۱۹۵	۵۰	پایه + آب دریا	۲۰/۴	۰/۵۸۱



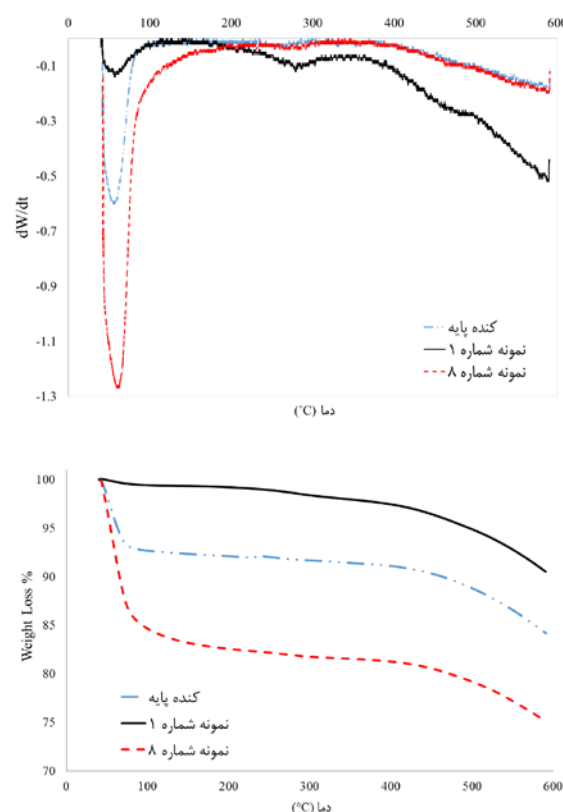
شکل ۵. طیف FTIR نمونه های (الف) شماره ۱ و (ب) شماره ۸

عبور در قله 3342 cm^{-1} که مربوط به آب است اختلاف قابل توجهی بین دو نمونه قابل مشاهده است به نحوی که نمونه شماره ۸ میزان عبور ۴۵٪ (جذب ۵۵٪) را نشان می‌دهد. در حالی که نمونه شماره ۱ میزان عبور ۶۰٪ (جذب ۴۰٪) را نشان می‌دهد. البته به دلیل استفاده از قرص KBr جهت ساخت نمونه ها خطای قابل توجهی متوجه این آزمون خواهد بود (به دلیل جذب آب). اما علی رغم این موضوع تفاوت چشمگیری بین دو نمونه مشاهده شد. همچنین با مقایسه پیک های ظاهر شده در اعداد موجی 2925 cm^{-1} و 2874 cm^{-1} که مربوط به حرکات کششی پیوندها C-H در هیدروکربن ها می باشند مشخص است که نمونه شماره ۱ میزان عبور ۸۵٪ (جذب ۱۵٪) را نشان داده، در حالی که نمونه شماره ۸ میزان عبور ۸۰٪ (جذب ۲۰٪) را نمایش می دهد که موید حضور کمتر هیدروکربن ها در نمونه شماره ۱ می باشد و به عبارت دیگر تایید کننده نقش توان بالاتر ریزموج در حذف هیدروکربن ها (هر چند غیرقطبی) از کنده ها است.

۴- نتیجه گیری

همچنین همان طور که از نمودارهای DTG برمی آید بیشترین سرعت کاهش وزن در دمای ۶۲ درجه سانتی گراد اتفاق افتاده که حاکی از حضور ترکیبات فرار از قبیل آلکان هایی مانند هگزان و پنتان نرمال می باشد که همان گونه که مشخص است استفاده از امواج ریزموج به راحتی آن ها را حذف کرده است هر چند که غیر قطبی می باشند و نمی توانند امواج ریزموج را خودشان به حرارت تبدیل کنند.

انجام طیف سنجی مادون قرمز بر روی کنده های مورد بررسی قبل و بعد از پرتودهی نشان داد که اولاً طیف سنجی از کنده ها قبل از پاک سازی به دلیل حضور رطوبت زیاد در آن ها امکان پذیر نمی باشد و قله مربوط به آب، سایر قله ها در طیف مورد نظر را می پوشاند. این در حالی است که پس از خالص سازی توسط امواج ریزموج قله های متعددی نمایان گردید. طیف های ثبت شده از نمونه شماره ۱ و نمونه شماره ۸ در شکل ۵ آورده شده است. با معیار قرار دادن شدت قله ظاهر شده در 1437 cm^{-1} که در هر دو طیف یکسان است (میزان عبور ۱۰٪) و مقایسه سایر قله های دو طیف بایکدیگر مشخص است که میزان



شکل ۴. نمودارهای TGA/DTG سه نمونه انتخاب شده شامل کنده حفاری پایه، کنده حفاری شماره ۱ و کنده حفاری شماره ۸.

7. D. Pan, C. Vipulanandan, N. Amani, S. A. Reddy, C.G. Chockalingam. in Offshore technology conference. (2018).
8. D. Herman, D. Roberts, Soil & Sediment Contamination. 14, 433 (2005).
9. A. Khalafi-Nezhad, A. Zare, A. Parhami, M.N. Soltani-Rad, G.R. Nejabat, Can. J. Chem. 84, 979 (2006).
10. A. Khalafi-Nezhad, A. Zare, A. Parhami, M.N. Soltani-Rad, G.R. Nejabat, J. Iran. Chem. Soc. 4, 271(2007).
11. A. Zare, A. Hasaninezhad, A. Khalafi-Nezhad, A.R. Moosavi-Zare, A. Parhami, G.R. Nejabat, Arkivoc 1, 58 (2007).
12. H.M. Albuquerque, D.C. Pinto, A.M. Silva, Molecules, 26, 6293 (2021).
13. D.M.P. Mingos, D.R. Baghurst, Chem. Soc. Rev. 20, 1 (1991).
14. C. Gabriel, S. Gabriel, E.H. Grant, B.J. Halstead, D.M.P. Mingos, Chem. Soc. Rev. 27, 213(1998). <https://doi.org/10.1039/A827213Z>
15. C.O. Kappe, 3.36 - Microwave-Assisted Chemistry, in Comprehensive Medicinal Chemistry II, J.B. Taylor and D.J. Triggle, Editors. 2007, Elsevier: Oxford. p. 837-860.
16. H. Shang, C.E. Snape, S.W. Kingman, J.P. Robinson, Sep. Purif. Technol. 49, 84 (2006).
17. J.P. Robinson, S.W. Kingman, C.E. Snape, R. Barranco, H. Shang, M.S.A. Bradley, S.M. Bradshaw, Chem. Eng. J. 152, 458 (2009).
18. M.S. Pereira, C.M.A. Panisset, A.L. Martins, C.H. Marques de sa, M.A.S. Barrozo, C.A. Ataide, Sep. Purif. Technol. 124, 68(2014).

بررسی تاثیر امواج الکترومغناطیسی در محدوده ریزموج بر روی پاک‌سازی (کاهش وزن و خالص سازی) کنده‌های حفاری نشان داد که هرچه توان مورد استفاده بیشتر باشد و یا میزان کنده مورد پاک‌سازی کمتر باشد، میزان پاک‌سازی بهبود می‌یابد. بررسی کنده‌های پاک‌سازی شده توسط ریزموج به کمک آنالیزهای TGA و FTIR نشان داد که پاک‌سازی به صورت قابل قبولی اتفاق افتاده است. با در نظر گرفتن میزان انرژی مصرفی توسط ریزموج، بهینه‌سازی صورت گرفت و نتایج نشان داد که با کم کردن حجم کنده می‌توان در توان‌های پایین دستگاه ریزموج به درجات خلوص قابل قبولی دست یافت.

تشکر و قدردانی

از دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز و مرکز تحقیقات مهندسی شیمی، نفت و پلیمر آن دانشگاه بابت حمایت‌های مادی و معنوی جهت انجام این پروژه قدردانی می‌گردد.

مراجع

1. R. Mohammadian, Int. J. Adv. Stu. Hum. Soc. Sci. 9, 291 (2020).
2. M.E. Chenevert, J.T. Dewan, Petrophysics, 42, SPWLA-2001-v42n3a4.
3. A.S. Apaleke, A. Al-Majed, M.E. Hossain. in SPE North Africa Technical Conference and Exhibition. SPE (2012).
4. G.M. Adewole, T.M. Adewale, E. Ufuoma, Afr. J. Environ. Sci. Technol. 4, 284 (2010).
5. A. Wojtanowicz, in Environmental Technology in the Oil Industry. 2016, Springer. p. 167-198.
6. P. Coussot, F. Bertrand, B. Herzhaft, Oil & gas science and technology. 59, 23 (2004).

19. I.P. Junior, M.S. Pereira, J.M. dos Santos, C.R. Duarte, C.H. Ataide, C.M.A. Panisset, J. Pet. Sci. Eng. 134, 23 (2015).
20. Y. Hou, S. Qi, H. You, Z. Huang, Q. Niu, J. Environ. Manag. 228, 312(2018).
21. G.M. Alves, I.P. Júnior, J. Pet. Sci. Eng. 207, 109137(2021).
22. G.R. Nejabat, M. Nekoomanesh, H. Arabi, H. Salehi-Mobarakeh, G.H. Zohuri, S.M.M. Mortazavi, S. Ahmadjo, S.A. Miller, Polyolefins J. 2, 73 (2015).
23. H. Arabi, H. Alehi-Mobarakeh, Z. Balzadeh, G.R. Nejabat, J. Appl. Polym. Sci. 129, 3047(2013).
24. H. Nassiri, H. Arabi, S. Hakim, S. Bolandi, Polym. bull. 67, 1393(2011).



Using microwave irradiation for the purification of a drill cutting

Shokooh Nikandish¹, M. Sadegh Tavallali^{1,2*}, Gholam-Reza Nejabat^{2,3*}

¹ Department of Chemical Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

² Department of Applied Researches, Chemical, Petroleum & Polymer Engineering Research Center, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

³ Department of Polymer Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran.

Abstract: Drill cuttings contain significant amounts of water and petroleum contaminants, which increase their mass and volume, contributing to environmental pollution. To address these issues, various methods are employed to remove these impurities. One effective purification method involves the use of microwave electromagnetic irradiation. This paper investigates the effect of microwave irradiation at different power levels on the purification of cuttings obtained from the Sarvestan oil field in Fars Province. To better understand the impact of various parameters, experimental design software (Design Expert, v.11) is utilized to examine three key factors: microwave power, sample weight, and the type of accompanying water. The changes in the composition of the cuttings are assessed by weighing them with a balance. Additionally, Thermogravimetric Analysis(TGA) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy(FTIR) are used for enhanced monitoring of these changes. The results from the software indicate that increasing microwave power or reducing sample weight improves the purification process. TGA and FTIR analyses further demonstrate that microwave irradiation effectively removes various compounds, such as water and organic molecules, from the cuttings. The best results were achieved when 50 grams of samples containing formation water were treated with 300-watt microwave irradiation, resulting in a decrease in the weight percentage of impurities from 25 wt.% to 5 wt.%.

Keywords: Drill cuttings, Purification, Environment, Microwave, TGA.