

استفاده از ضایعات کشاورزی در تولید افزایه‌های طبیعی گل حفاری:
رویکردی زیست‌سازگار برای کاهش استفاده از مواد شیمیایی در صنعت حفاری

احمد رضا عبدشاهی^{۱*}، محمدمهدی حقیقی^۲، سید مرتضی میرعباسی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر Ahmadreza.abdshahi@aut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر Mehdihaghighi@aut.ac.ir

۳- استادیار دانشکده مهندسی نفت و زمین انرژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر Sm.mirabbasi@aut.ac.ir

چکیده:

افزودنی‌های شیمیایی در گل حفاری، به عنوان بازیگران اصلی در کنترل خواص فیزیکی و شیمیایی سیال حفاری نقش ایفا می‌کنند. اما این افزودنی‌ها مانند زانتان گام، پلی آنیونی سلولز و کربوکسی متیل سلولز به علت فرایند سنتزی پر هزینه و همچنین استفاده از مواد شیمیایی در هنگام تولید چالش‌های پیچیده‌ای را برای صنعت ایجاد می‌کنند. این مقاله با رویکردی زیست‌سازگار، امکان استفاده از ضایعات کشاورزی مانند پوست برنج، سبوس گندم و تغاله نیشکر را به عنوان افزایه‌های طبیعی بررسی می‌کند. این ضایعات در کنترل ویسکوزیته، کاهش فیلتراسیون، پایداری شیل، روان‌کنندگی نقش مؤثری دارند. نتایج نشان می‌دهند که عملکرد این مواد در مواردی با نمونه‌های شیمیایی قابل قیاس است، با این تفاوت که کم‌هزینه‌تر و سازگارتر با محیط‌زیست هستند. این راهکار، گامی نو در جهت توسعه پایدار عملیات حفاری در صنعت حفاری است.

کلمات کلیدی: ضایعات کشاورزی، افزایه‌های طبیعی، گل حفاری، پایداری زیست‌محیطی

۱. مقدمه:

در سال‌های اخیر، افزایش حجم فعالیت‌های حفاری در صنعت نفت و گاز، نیاز به استفاده از گل‌های حفاری با کارایی بالا را بیش از پیش برجسته کرده است. افزودنی‌های شیمیایی به‌عنوان ابزارهای کلیدی در بهبود خواص فیزیکی و شیمیایی سیالات حفاری، همچون کنترل ویسکوزیته، کاهش فیلتراسیون، تثبیت سازندهای رسی، افزایش روان‌کاری و بهبود انتقال کنده‌های حفاری به سطح نقشی مهمی ایفا کرده‌اند. با این حال، اتکای این صنعت به ترکیبات مصنوعی عمدتاً نفت‌پایه، در بلندمدت چالش‌هایی جدی از نظر اقتصادی، زیست‌محیطی و عملیاتی به همراه خواهد داشت (Ghaderi et al. 2020).

هزینه‌های بالای تولید، وابستگی به واردات، سختی بازیافت پساب‌ها و مخاطرات زیست‌محیطی، موجب تردید در تداوم استفاده از این افزودنی‌ها شده است. در پاسخ به این چالش‌ها، گرایش به سمت استفاده از منابع طبیعی و تجدیدپذیر، به‌ویژه ضایعات کشاورزی، به‌عنوان راهکاری پایدار و دوستدار محیط‌زیست در حال گسترش است (Gómez-Merino et al. 2022).

ضایعات کشاورزی به‌دلیل فراوانی، قیمت مناسب، ساختار شیمیایی غنی و قابلیت دسترسی محلی، ظرفیت بالایی برای جایگزینی افزودنی‌های شیمیایی دارند. مطالعات و تجربیات اولیه نشان داده‌اند که این مواد، پس از انجام فرآوری‌های ساده، می‌توانند عملکردی قابل رقابت با ترکیبات متداول داشته باشند. ویژگی‌هایی مانند زیست‌تجزیه‌پذیری، غیرسمی بودن و سازگاری با محیط‌زیست نیز آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای توسعه فناوری‌های سبز در حفاری بدل کرده است (Al-Hameedi et al. 2022).

این پژوهش با هدف معرفی و ارزیابی ظرفیت ضایعات کشاورزی به‌عنوان افزودنی‌های طبیعی در فرمولاسیون گل حفاری انجام شده و تلاش دارد با تکیه بر شواهد علمی و تحلیل فنی، زمینه‌ساز توسعه راهکارهایی پایدار در این حوزه باشد.

۲. تئوری و پیشینه تحقیق:

گل حفاری یکی از اجزای کلیدی عملیات حفاری است که وظایفی همچون حمل خرده‌سنگ‌ها، کنترل فشار، روان‌کاری و خنک‌سازی مته را بر عهده دارد. برای بهبود عملکرد آن، افزودنی‌های شیمیایی مختلفی مانند کربوکسی متیل سلولز^۱ (CMC)، پلی‌آنیونی سلولز^۲ (PAC) و نشاسته‌های اصلاح‌شده به‌کار می‌روند که خواصی مانند ویسکوزیته، فیلتراسیون و پایداری شیل

¹ Carboxymethyl Cellulose

² Polyanionic Cellulose

را کنترل می‌کنند. با این حال، این ترکیبات به دلیل تجزیه سخت، هزینه تولید زیاد و مشکلات زیست‌محیطی در حجم بالا، با انتقادات فزاینده‌ای روبه‌رو هستند. در پاسخ به این چالش‌ها، توجه به منابع زیستی، تجدیدپذیر و کم‌خطر افزایش یافته و مطالعاتی روی مواد طبیعی نظیر صمغ زانتان، نشاسته خام و ترکیبات سلولزی انجام شده که نتایج مثبتی داشته‌اند (Peng et al. 2018).

لی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۵ استفاده از ایزوله پروتئین سویا^۲ (SPI) را به‌عنوان افزودنی کاهنده فیلترات در گل حفاری پایه بنتونیتی بررسی کردند. آن‌ها دریافتند که SPI با هموژنیزاسیون فشار بالا موجب بهبود عملکرد آن در انسداد تخلخل‌ها و کاهش هرزروی سیال می‌شود. در غلظت‌های پایین، SPI باعث ایجاد کیک‌های پرمنفذ و ناکارآمد شد، اما در غلظت‌های بالا، کیک‌هایی فشرده و کم‌تخلخل ایجاد گردید. نتایج نشان داد SPI ماده‌ای طبیعی و زیست‌تخریب‌پذیر با پتانسیل بالا برای کاهش فیلترات است (Li et al. 2015).

آرمو^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۷ چهار افزودنی کنترل pH استخراج‌شده از پوست کاکائو، پوست برنج، پوسته بادام‌زمینی و پوست موز را برای مهار خوردگی و بهبود رئولوژی گل حفاری در محیط سولفید هیدروژن^۴ بررسی کردند. عصاره پوست کاکائو بهترین عملکرد در مهار خوردگی و پایداری حرارتی را نسبت به KOH سنتزی داشت و توانست هرزروی سیال را کاهش دهد. با این حال، این عصاره باعث رقیق شدن گل شد که نیازمند افزودن مواد افزایش‌دهنده ویسکوزیته بود (Aremu et al. 2017).

مسلمی‌زاده^۵ و شادی‌زاده^۶ در سال ۲۰۱۷ به بررسی استفاده از عصاره حنا^۷ به‌عنوان بازدارنده زیست‌محیطی در سیالات حفاری پایه آبی پرداختند. نتایج نشان داد که عصاره حنا توانایی قابل توجهی در کاهش تورم و پراکندگی شیل دارد و با تغییر زاویه تماس باعث افزایش خاصیت آب‌گریزی سطح شیل و بهبود پایداری آن می‌شود. همچنین، این عصاره با افزودنی‌های متداول سیالات حفاری سازگاری داشت و موجب بهبود لغزندگی سیال شد که این ویژگی در حفاری جهت‌دار

¹ Li² Soy Protein Isolate³ Aremu⁴ Hydrogen Sulfide⁵ Moslemizadeh⁶ Shadizadeh⁷ Henna Extract

اهمیت دارد. علاوه بر این، مزایایی نظیر سازگاری زیست‌محیطی، هزینه پایین و خاصیت ضدخوردگی باعث می‌شود عصاره حنا گزینه مناسبی برای استفاده در سیالات حفاری پایه آبی باشد (Moslemizadeh and Shadizadeh 2017).

موحدی^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۷ به بررسی کاربرد دانه‌های ریحان هیدراته^۲ (HBS) به‌عنوان الیاف طبیعی و سازگار با محیط زیست در سیالات حفاری پرداخت. نتایج نشان داد که افزودن HBS در غلظت‌های پایین می‌تواند به طور مؤثری در پاکسازی چاه و کنترل هرزروی سیال نقش داشته باشد. همچنین، آزمایش‌ها در شرایط فشار و دمای مختلف پایداری حرارتی و بهبود عملکرد HBS را تایید کردند. این مطالعه نشان می‌دهد HBS یک افزودنی طبیعی کارآمد برای بهبود ویژگی‌های رئولوژیکی و کاهش هرزروی در سیالات حفاری است (Movahedi et al. 2017).

حسام‌الدین محمود و همکاران در سال ۲۰۲۴ مروری جامع بر افزودنی‌های سبز در سیالات حفاری انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که موادی مانند پوست سیب‌زمینی، برگ حنا، و گلبرگ زعفران می‌توانند خواص رئولوژیکی گل حفاری را بهبود دهند و جایگزین مناسبی برای افزودنی‌های شیمیایی باشند، اما تأکید کردند که بیشتر این مطالعات در مقیاس آزمایشگاهی بوده و نیاز به ارزیابی‌های میدانی دارند (Mahmoud et al. 2024).

با وجود این مزایا، همچنان نیاز به بررسی بیشتر در زمینه پایداری، مقیاس‌پذیری و بهینه‌سازی فرآیند استفاده از این مواد وجود دارد. پژوهش حاضر با هدف تحلیل جامع مطالعات پیشین، به بررسی فرصت‌ها و چالش‌های استفاده از ضایعات کشاورزی در گل حفاری می‌پردازد.

۳. مهمترین کاربرد ضایعات کشاورزی:

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در منابع علمی و تجربیات میدانی حاصل از حضور در محیط‌های آزمایشگاهی و صنعتی، می‌توان گفت ضایعات کشاورزی، با توجه به ترکیبات طبیعی و ساختار شیمیایی غنی خود، توان بالقوه‌ای برای استفاده در فرمولاسیون سیالات حفاری دارند. این پسماندهای زیستی نه تنها به راحتی در دسترس‌اند و از نظر اقتصادی مقرون به صرفه محسوب می‌شوند، بلکه به دلیل تجزیه‌پذیر بودن و غیرسمی بودن، اثرات منفی

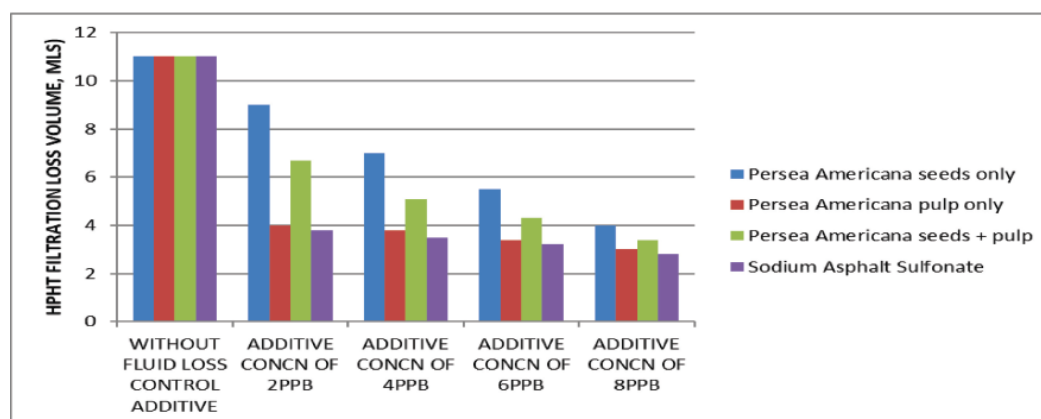
¹ Movahedi

² Hydrated Basil Seeds

زیست‌محیطی به مراتب کمتری نسبت به مواد شیمیایی دارند. در ادامه، شش مورد از مهم‌ترین کاربردهای ضایعات کشاورزی در بخش‌های مختلف سیال حفاری معرفی و بر اساس مطالعات معتبر تحلیل می‌شوند:

۳.۱ کاهنده فیلتراسیون

مطالعه‌ای که با هدف بررسی امکان استفاده از ضایعات گیاه آووکادو^۱ به عنوان افزودنی کاهنده فیلتراسیون در سیالات حفاری غیرآبی انجام شد، نشان داد که سه بخش مختلف این گیاه شامل دانه، پالپ، و ترکیب دانه و پالپ، پتانسیل قابل توجهی در کاهش فیلتراسیون تحت شرایط فشار و دمای بالا (HPHT) دارند. نتایج حاکی از آن بود که پالپ آووکادو نسبت به دانه و ترکیب آن‌ها، عملکرد مؤثرتری داشته و توانست تا ۲.۵ برابر مؤثرتر از دانه به تنهایی عمل کند. همچنین ضخامت کیک فیلتر در تمام نمونه‌ها نازک (حدود ۱ میلی‌متر) و غیرقابل نفوذ بوده که مطابق با استاندارد API است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که آووکادو می‌تواند به عنوان افزودنی طبیعی و زیست‌پایه در کنترل فیلتراسیون در گل‌های حفاری غیرآبی مورد استفاده قرار گیرد (Igwi et al. 2019).



شکل ۱. میزان کاهش حجم فیلتراسیون ضایعات آووکادو (Igwi et al. 2019)

افزودنی‌های تجاری مانند CMC و PAC معمولاً برای کنترل فیلتراسیون به کار می‌روند، اما به دلیل هزینه بالا، ایجاد آلودگی و برخی محدودیت‌ها، پژوهشگران به دنبال جایگزین‌های بومی و مقرون به صرفه هستند. در همین راستا، مطالعه‌ای با هدف ارزیابی عملکرد سه ماده بومی شامل خرما و لوبیای آفریقایی و همچنین پوست برنج به عنوان افزودنی کاهنده هرزروی در

^۱ Persea Americana

گل حفاری پایه آبی انجام شد. نتایج آزمایش‌های فیلتر در شرایط فشار و دمای پایین نشان داد که ترکیب خرمای آفریقایی و پوست برنج در غلظت ۱۰ گرم، عملکردی مشابه CMC داشته و کیک فیلتر نازک، نرم و یکنواختی تولید کرده است که مطابق با استاندارد API و مناسب برای جلوگیری از گیر کردن لوله حفاری است. بنابراین، این مواد محلی می‌توانند گزینه‌هایی پایدار، ارزان، به دور از آلودگی محیط زیستی و مؤثر برای کنترل هرزروی سیال حفاری باشند (Okon, Akpabio, and Tugwell 2020).



شکل ۲. پوست برنج (Okon, Akpabio, and Tugwell 2020)

در مطالعه ای دیگر به بررسی قابلیت استفاده از عصاره برگ حنا^۱ (HLE) و عصاره برگ گل ختمی^۲ (HBLE) به عنوان افزودنی‌های زیست‌تخریب‌پذیر و دوستدار محیط زیست در سیالات حفاری پایه آبی پرداخته شده است. آزمایش‌های رئولوژیکی و کنترل فیلتر بر روی این سیالات با غلظت‌های مختلف (۱، ۲، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ گرم) در دماهای ۷۸ و ۳۰۰ درجه فارنهایت انجام شد. نتایج عصاره‌های گیاهی در مقادیر کم (۱ و ۲ گرم) با افزودنی PAC با ویسکوزیته کم مقایسه شد. یافته‌ها نشان دادند که HLE و HBLE به طور قابل توجهی میزان فیلتراته را به ترتیب بین ۶۲ تا ۶۷ درصد و ۶۴ تا ۷۶ درصد کاهش داده و خصوصیات رئولوژیکی سیال حفاری را در بازه ۱۰ تا ۴۰ گرم بهبود بخشیدند. هرچند PAC در مقدار برابر (۱ و ۲ گرم) تأثیر بیشتری بر خواص رئولوژیکی داشت، اما ایجاد ژل‌های بسیار قوی و مسطح آن می‌تواند منجر به گیر کردن مکانیکی لوله‌ها شود. همچنین داده‌ها نشان داد که استفاده از عصاره‌های حنا و گل ختمی تأثیر بیشتری روی ضخامت کیک گل نسبت به PAC داشته‌اند؛ به طوری که ضخامت کیک به ترتیب با حنا ۳۲٪، گل ختمی ۳۳٪ و PAC

¹ Henna Leaf Extracts

² Hibiscus Leaf Extracts

۲۷٪ کاهش یافته است که این نشان‌دهنده عملکرد عالی این افزودنی‌های طبیعی در کنترل فیلتراته است (Ismail et al. 2020).



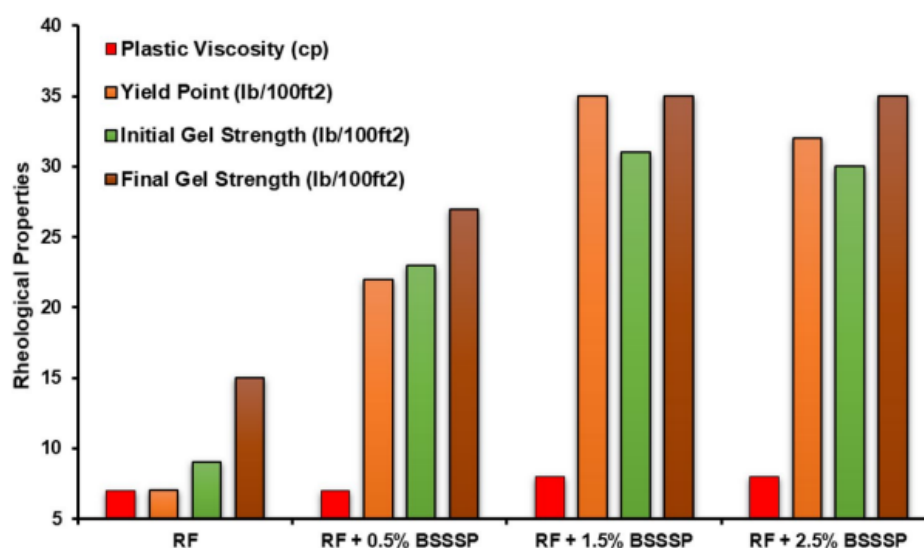
شکل ۳. پودر برگ حنا (Ismail et al. 2020)

۳.۲ پایداری خواص رئولوژیکی

آلئوئه‌ورا به عنوان یک افزودنی طبیعی و زیست‌سازگار، تاثیر قابل توجهی بر بهبود خواص رئولوژیکی سیال حفاری دارد که این ویژگی‌ها در عملکرد مناسب و کارآمد سیال نقش اساسی ایفا می‌کنند. آزمایش‌ها نشان داده‌اند که افزودن آلئوئه‌ورا به گل حفاری می‌تواند ویسکوزیته سیال را به شکل مناسبی تنظیم کند، به طوری که سیال ضمن حفظ روانی لازم برای انتقال کنده‌ها، از ایجاد انسداد و مشکلات ناشی از رقیق یا غلیظ شدن بیش از حد جلوگیری می‌کند. همچنین، نقطه تسلیم^۱ گل حفاری که نشان‌دهنده مقاومت اولیه سیال در برابر جریان است، با حضور آلئوئه‌ورا بهبود یافته و این امر باعث افزایش پایداری و عملکرد بهتر در شرایط مختلف فشار و دما می‌شود. آلئوئه‌ورا همچنین نقش مؤثری در حفظ تعادل بین استحکام ژل اولیه و نهایی گل دارد که این تعادل، موجب کاهش خطر ته‌نشینی ذرات و جلوگیری از انسداد چاه می‌گردد. به علاوه، ساختار مولکولی طبیعی آلئوئه‌ورا به گونه‌ای است که می‌تواند به عنوان یک عامل تقویت‌کننده و تثبیت‌کننده ساختار گل عمل کند و از تخریب خواص رئولوژیکی در شرایط دمایی و فشاری بالا جلوگیری نماید. مقایسه‌های صورت گرفته با افزودنی‌های سنتی نشان می‌دهد که آلئوئه‌ورا علاوه بر فراهم کردن خواص رئولوژیکی مطلوب، دارای مزیت‌های زیست‌محیطی و اقتصادی قابل توجهی است که آن را به گزینه‌ای جذاب و پایدار برای صنعت حفاری تبدیل می‌کند (Bagum et al. 2022).

¹ Yield Point

پودر پوسته دانه آفتابگردان سیاه^۱ (BSSSP) به عنوان یک افزودنی چندمنظوره در سیالات حفاری، نقش مؤثری در اصلاح و پایداری خواص رئولوژیکی ایفا می‌کند. این ماده با بهبود ویسکوزیته، نقطه تسلیم و استحکام ژل سیال، موجب حفظ رفتار جریان مطلوب و جلوگیری از ناپایداری‌های رئولوژیکی در شرایط عملیاتی پیچیده مانند دما و فشار بالا می‌شود. ساختار فیبری و اندازه ذرات BSSSP باعث تقویت شبکه ساختاری گل حفاری شده و مقاومت آن را در برابر تغییرات محیطی افزایش می‌دهد، که این امر منجر به بهبود عملکرد سیال در انتقال و تعلیق ذرات و کنترل بهتر خواص مکانیکی سیال می‌گردد. همچنین، قابلیت استفاده از این افزودنی در غلظت‌های مختلف و سازگاری آن با سایر اجزای گل حفاری، امکان بهینه‌سازی خواص رئولوژیکی متناسب با شرایط خاص هر چاه را فراهم می‌سازد. به علاوه، BSSSP منبعی اقتصادی، بومی و زیست‌تخریب‌پذیر است که می‌تواند جایگزینی کارآمد برای افزودنی‌های شیمیایی متداول در صنعت نفت باشد و در عین حال اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهد. بنابراین، استفاده از پودر پوسته دانه آفتابگردان سیاه ضمن بهبود پایداری و عملکرد رئولوژیکی سیالات حفاری، مزایای اقتصادی و محیط‌زیستی قابل توجهی به همراه دارد (Al-Hameedi et al. 2020).



شکل ۴. تاثیر BSSSP بر روی خواص رئولوژیکی

¹ Black Sunflower Seeds' Shell Powder

۳.۳ جلوگیری از هرزروی سیال

در حفاری، جلوگیری از هرزروی سیال یکی از مهم‌ترین چالش‌ها به شمار می‌رود که تأثیر مستقیم بر هزینه‌ها و ایمنی عملیات دارد. مواد کاهنده هرزروی^۱ (LCM) نقش کلیدی در کاهش اتلاف سیال حفاری ایفا می‌کنند؛ این مواد با ایجاد پل در منافذ و ترک‌های ریز سازند، از خروج سیال جلوگیری می‌نمایند. در پژوهش‌های مختلف چند نوع الیاف طبیعی از جمله الیاف نارگیل، برگ کاج و باگاس (تفاله نیشکر) به‌عنوان افزودنی‌های مؤثر برای کنترل هرزروی مورد بررسی قرار گرفتند. این الیاف به دلیل خواص نامحلول بودن، غیرواکنش پذیر و دسترسی آسان در مناطق حفاری هند، گزینه‌های مناسبی محسوب می‌شوند. نتایج آزمایشات نشان داد که الیاف باگاس در غلظت‌های پایین‌تر توانایی بسیار بالایی در ایجاد پل مقاوم و کاهش میزان هرزروی نسبت به سایر الیاف دارد. جالب آنکه عملکرد این الیاف طبیعی در کنترل هرزروی در سطحی مشابه و حتی فراتر از مواد متداول صنعتی مانند کربنات کلسیم و میکاها قرار دارد. بنابراین، باگاس به عنوان یک ماده کاهنده هرزروی پایدار، اقتصادی و دوستدار محیط زیست، قابلیت جایگزینی یا کاهش مصرف مواد شیمیایی سنتی در فرآیندهای حفاری را داراست (Ganesh et al. 2019).

دیگر افزودنی مورد استفاده پودر پوسته بادام‌زمینی است. تمامی خواص گل حفاری در شرایط دما و فشار بالا (HTHP) مورد ارزیابی قرار گرفت و تأثیر افزودن پودر پوسته بادام‌زمینی^۲ (PSP) در سه غلظت مختلف بر ویژگی‌های گل پایه بررسی شد. نتایج نشان داد که PSP، به‌عنوان ماده‌ای زیست‌تخریب‌پذیر، ارزان و در دسترس، می‌تواند به‌عنوان یک افزودنی چندکاره برای کاهش هرزروی سیال حفاری در شرایط سطحی و زیرسطحی مورد استفاده قرار گیرد. بر اساس داده‌های آزمایشگاهی، پودر پوسته بادام‌زمینی توانست در دمای ۷۹ درجه سانتی‌گراد و شرایط زمان‌بر دوام بیاورد و عملکردی پایدار از خود نشان دهد. همچنین، این ماده پتانسیل بالایی برای جایگزینی یا کاهش مصرف افزودنی‌های شیمیایی رایج و غیرقابل تجزیه زیستی مانند رزین‌ها دارد. استفاده از PSP نه تنها هزینه‌های کلی حفاری را کاهش می‌دهد، بلکه اثرات زیست‌محیطی و خطرات سلامتی ناشی از افزودنی‌های شیمیایی متداول را نیز به‌شدت کاهش می‌دهد. با توجه به سهولت تهیه، دسترسی محلی، و قابلیت تولید در مقیاس انبوه، PSP گزینه‌ای کارآمد و پایدار برای به‌کارگیری در عملیات حفاری به شمار می‌رود (Al-Hameedi et al. 2022).

¹ Lost Circulation Material

² Peanut Shell Powder

۳.۴ پایدارکننده شیل و مهارکننده تورم رس

یکی از چالش‌های مهم در حفاری با گل پایه آبی، تورم و واپاشی سازندهای رسی است که منجر به گیر کردن رشته حفاری یا ریزش دیواره چاه می‌شود. میتوان از سیالات حفاری غیر آسیب‌زا^۱ (NDDF) بر پایه ترکیبات طبیعی شامل پودر پوست تخم‌مرغ^۲ با دو اندازه ذره‌ای مختلف (۴۵ و ۹۰ میکرون)، عصاره سیب‌زمینی^۳ و زردچوبه^۴ توسعه داده شده‌اند و نقش آن‌ها در پایداری شیل مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج آزمون‌های طیف‌سنجی نشان داد که این ترکیبات با آب موجود در ساختار سیال پیوندهای پایداری ایجاد می‌کنند که موجب تقویت یکپارچگی و قوام ساختار سیال می‌شود. آزمایش‌های مربوط به ارزیابی پایداری شیل با این سیالات نشان داد که میزان جذب سطحی تنها حدود ۱۰٪ است؛ این مقدار اندک بیانگر برهم‌کنش محدود سیال با سازندهای رسی و کاهش تورم یا واپاشی شیل‌ها در حین حفاری می‌باشد. این ویژگی، نقش مؤثری در جلوگیری از ناپایداری چاه، گیر کردن لوله‌ها و ریزش دیواره چاه ایفا می‌کند (Mech et al. 2024).

۳.۵ روان‌کنندگی و و پایداری حرارتی

روانکاری و کنترل حرارت از مهم‌ترین چالش‌ها در عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز به‌شمار می‌روند. افزایش دما و سایش در محل تماس رشته حفاری با دیواره چاه و سایر اجزای مکانیکی، می‌تواند منجر به کاهش عمر تجهیزات، افزایش گشتاور، گیرکردن لوله‌ها و افت راندمان حفاری شود. بنابراین، استفاده از روانکارهای مؤثر که علاوه بر کاهش ضریب اصطکاک، قابلیت انتقال حرارت و پایداری در دما و فشار بالا را نیز داشته باشند، ضروری است.

در این تحقیق، از سامانه روانکار زیست‌پذیری متشکل از روغن نارگیل^۵ و روانکار صنعتی تالادرین^۶ با نسبت اختلاط ۱ به ۹ استفاده شد. به‌منظور ارتقاء عملکرد حرارتی و روانکارانه، از نانوذرات سیلیکا آب‌دوست^۷ در سه درصد حجمی ۰.۰۳ و ۰.۰۱ و

¹ Non-Damaging Drilling Fluids

² Eggshells Powder

³ Solanum Tuberosum

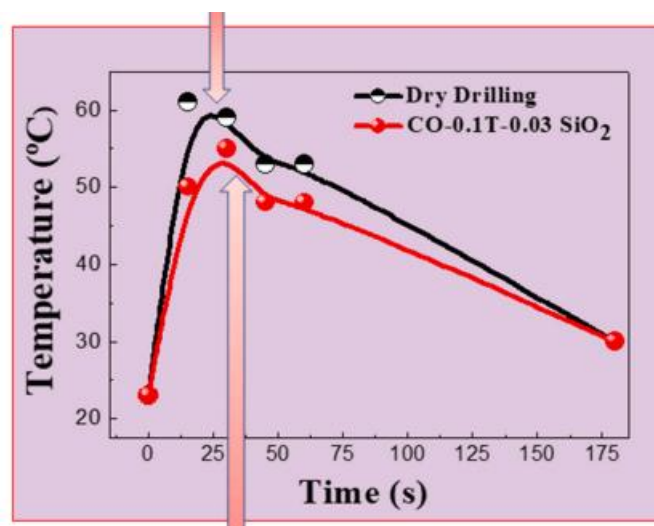
⁴ Curcuma Longa

⁵ Coconut Oil

⁶ Taladrine

⁷ Hydrophilic Silica

۰.۰۵ استفاده شد. بررسی‌های حرارتی با استفاده از کالری‌سنجی تفاضلی با اسکن^۱ (DSC) و اندازه‌گیری هدایت حرارتی نشان داد که افزودن نانوذرات موجب افزایش هدایت حرارتی سیستم با تغییرات ناچیز در گرمای نهان شد. همچنین، ساختار میکروسکوپی ژل تشکیل‌شده در نمونه دارای ۰.۰۳ حجم سیلیکا، به‌صورت ساختارهای سوزنی‌مانند مشاهده شد که به حفظ استحکام شبکه سیال در شرایط دمایی بالا کمک می‌کند. بررسی خواص رئولوژیکی نیز نشان داد که این ترکیب ضمن حفظ پایداری حرارتی تا دماهای بالا، ویسکوزیته مطلوبی در محدوده عملکرد عملیاتی دارد. بنابراین، استفاده از روغن گیاهی تقویت‌شده با نانوذرات سیلیکا به‌عنوان افزودنی روانکار در سیال حفاری، نه تنها موجب بهبود خواص انتقال حرارت و کاهش اصطکاک می‌شود، بلکه جایگزین پایدار و غیرسمی برای روانکارهای نفت‌پایه به‌شمار می‌رود (Gómez-Merino et al. 2022).



شکل ۵. نمودار افزایش حرارت در عملیات یکسان برای حفاری خشک و حفاری با روغن نارگیل

۳.۶ کنترل‌کننده pH

برای بهبود عملکرد سیال حفاری، کنترل pH یکی از پارامترهای کلیدی است که بر خوردگی تجهیزات و خواص رئولوژیکی سیال تأثیر می‌گذارد. در این مطالعه، از ضایعات کشاورزی زیست‌تخریب‌پذیر شامل پودر پوست لوبیا گاوی^۲ (CSP)، پوست

¹ Differential Scanning Calorimetry

² Cowpea Skin Powder

نیشکر^۱ (SRP) و پوست یام^۲ (YP) به عنوان عوامل کنترل‌کننده pH سیال حفاری استفاده شده است. ترکیب عنصری این مواد با استفاده از میکروسکوپی الکترونی روبشی^۳ (SEM) تعیین و آنالیز پروگزیمیت برای بررسی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مانند رطوبت، خاکستر، نیتروژن، پروتئین، و pH انجام شد. این افزودنی‌ها در مقادیر مختلف ۰.۱٪ (۵ گرم)، ۰.۳٪ (۱۰ گرم)، ۰.۴٪ (۱۵ گرم) و ۰.۵٪ (۲۰ گرم) به سیال افزوده شدند و تأثیر آنها بر مقدار pH سیال مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که هر سه ماده توانایی تنظیم pH سیال را داشته و بسته به نوع و غلظت افزودنی، PH در محدوده مناسبی برای کاهش خوردگی و بهبود خواص سیال تنظیم شد. به ویژه، افزودنی پوست نیشکر در بالاترین غلظت‌ها بیشترین اثر را در تثبیت pH نشان داد (Alade et al. 2024).

جدول ۱. مواد و کاربردها

مواد زیستی	مواد شیمیایی	کاربرد
عصاره برگ حنا، خرما و لوبیای آفریقایی، پوست برنج، آووکادو و آووکادو	CMC، PAC	کاهش فیلتراسیون
پودر پوسته دانه آفتابگردان سیاه، آلوئه‌ورا	CMC، زانتان گام	پایداری رئولوژیکی
پوست گردو، برگ کاج، پودر پوسته بادام‌زمینی، تفاله نیشکر	میکا، کلسیم کربنات	کنترل هرزروی سیال حفاری
پودر پوست تخم‌مرغ، عصاره سیب‌زمینی، زردچوبه	KCl، پلی‌آمین، لیگنین سولفونه	پایداری شیل
روغن نارگیل، تفاله زیتون، دانه‌های روغنی	روغن‌های پایه نفتی، گرافیت	روانکنندگی و پایداری حرارتی
پودر پوست لوبیا گاوی، پوست نیشکر، پوست یام	کربنات سدیم، NaOH	کنترل‌کننده PH

¹ Sugarcane Rind Powder

² Yam Bark Powder

³ Scanning Electron Microscopy

۵. نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که ضایعات کشاورزی فرآوری شده پتانسیل بالایی برای تبدیل شدن به افزودنی‌هایی مؤثر، اقتصادی و زیست‌سازگار در گل حفاری دارند. این مواد در کاربردهایی مانند کاهش فیلتراسیون، افزایش ویسکوزیته، تثبیت شیل، روان کاری و تنظیم pH عملکردی قابل قبول و گاه رقابتی با افزودنی‌های شیمیایی دارند. مزایایی مانند دسترسی آسان، هزینه پایین، تجزیه پذیری و کاهش آلودگی زیست محیطی، جایگاه این منابع را در توسعه سیالات حفاری پایدار تقویت می‌کند.

اگرچه برای استفاده صنعتی گسترده از این مواد نیاز به تحقیقات بیشتر و استانداردسازی وجود دارد، اما حرکت به سوی منابع زیستی، به ویژه پسماندهای کشاورزی، می‌تواند گامی مؤثر در جهت تحقق اهداف زیست محیطی و اقتصادی در صنعت حفاری باشد.

۶. مراجع:

- Al-Hameedi, Abo Taleb T, Husam H Alkinani, Mohammed M Alkhamis, Shari. Journal of Petroleum Exploration Dunn-Norman, and Production Technology. 2020. 'Utilizing a new eco-friendly drilling mud additive generated from wastes to minimize the use of the conventional chemical additives', **10**: 3467-81.
- Al-Hameedi, AT, HH Alkinani, Shari. International Journal of Environmental Science Dunn-Norman, and Technology. 2022. 'Development of high-performance water-based drilling fluid using biodegradable eco-friendly additive (Peanut Shells)', **19**: 4959-70.
- Alade, Blessing O, Petrus Nzerem, Ayuba Salihu, Oghenerume Ogolo, Ajiri Nile Journal of Engineering Otedheke, and Applied Science. 2024. 'Analysis of Selected Fiber-Rich Agricultural Waste as Water-Based Drilling Mud Fluid Loss Control Additives', **2**: 0-0.
- Aremu, MO, AO Arinkoola, KK Salam, EO Petroleum Ogunmola, and Coal. 2017. 'POTENTIAL OF LOCAL PH CONTROL ADDITIVES FOR CORROSION INHIBITION IN WATER BASE DRILLING FLUIDS', **59**.

- Bagum, Monuara, Jalal M Ahammad, Tahir Husain, M Enamul, Journal of Petroleum Science Hossain, and Engineering. 2022. 'An experimental study to develop an environmental friendly mud additive of drilling fluid using Aloe Vera', **211**: 110135.
- Ganesh, Hari, P Sivasankar, Sivakumar Pandian, Anirbid, Energy Sources Sircar, Part A: Recovery, Utilization,, and Environmental Effects. 2019. 'Sustainable drilling operations by utilizing waste biomass as a lost circulation additive': **1-9**.
- Gómez-Merino, Ana Isabel, Jesús Javier Jiménez-Galea, Francisco José Rubio-Hernández, and Isidro María, Journal of Cleaner Production Santos-Ráez. 2022. 'Experimental assessment of thermal and rheological properties of coconut oil-silica as green additives in drilling performance based on minimum quantity of cutting fluids', **368**: 133104.
- Igwilo, Kevin Chinwuba, Emeka Emmanuel Okoro, Okorie Agwu, Christopher Onedibe, Sabinus I Ibeneme, and Nnanna, International Journal of Engineering Research in Africa Okoli. 2019. 'Experimental analysis of Persea Americana as filtration loss control additive for non-aqueous drilling fluid', **44**: 8-21.
- Ismail, Abdul R, Noorul MNA Mohd, Nurul F Basir, Jeffrey O Oseh, Issham Ismail, Shafeeg O, Journal of Petroleum Exploration Blkoor, and Production Technology. 2020. 'Improvement of rheological and filtration characteristics of water-based drilling fluids using naturally derived henna leaf and hibiscus leaf extracts', **10**: 3541-56.
- Li, Mei-Chun, Qinglin Wu, Kunlin Song, Sunyoung Lee, Chunde Jin, Suxia Ren, Tingzhou, ACS applied materials Lei, and interfaces. 2015. 'Soy protein isolate as fluid loss additive in bentonite–water-based drilling fluids', **7**: 24799-809.
- Mech, Deepjyoti, Sidharth Murali, T Roshan, and Vankala Jai Sphoorthi. 2024. "Experimental Investigation of Non-Damaging Drilling Fluid (NDDF) Using Sustainable Additives for Gas Hydrate Prevention and Shale Stability." In ISOPE Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium, ISOPE-P-24-175. ISOPE.

Moslemizadeh, Aghil, and Seyed Reza Shadizadeh. 2017. 'A natural dye in water-based drilling fluids: Swelling inhibitive characteristic and side effects', **3**: 355-66.

Movahedi, Hamed, Mehrdad Vasheghani Farahani, Saeid Journal of Petroleum Science Jamshidi, and Engineering. 2017. 'Application of Hydrated Basil Seeds (HBS) as the herbal fiber on hole cleaning and filtration control', **152**: 212-28.

Okon, Anietie N, Julius U Akpabio, and Kilaliba W Heliyon Tugwell. 2020. 'Evaluating the locally sourced materials as fluid loss control additives in water-based drilling fluid', **6**.