

Performance Evaluation of a High-Temperature/ High-Pressure Water-Based Drilling Fluid Using an Environmentally Friendly Hybrid of Modified Starch/ Sulfonated Polyacrylamide

Abdolamir Ostovari, Leila Noein*, and Shirin Shokoohi

Chemical, Polymeric and Petrochemical Technology Development Research Division, Research
Institute of Petroleum Industry, Tehran, 14665-137, Iran

Received: 27 August 2025, accepted: 9 May 2026

ABSTRACT

Hypothesis: The hybrid polymer system of modified starch and sulfonated polyacrylamide (SPAM) in water-based drilling fluids, compared to natural starch, utilizes the synergistic effect of the two polymers to enhance thermal stability, maintaining optimal rheological stability under HPHT conditions, and significantly minimize fluid loss by forming a compact, low-permeability filter cake.

Methods: A hybrid polymer system composed of sulfonated polyacrylamide (SPAM) and starch, in native and chemically modified forms, was investigated aiming to improve the drilling fluid performance.

Findings: Thermogravimetric analysis (TGA) revealed that the modified starch exhibited a significantly lower degradation rate compared to the native form, which is due to its compact crosslinked structure that enhances the thermal resistance. Rheological analysis demonstrated that the combination of modified starch and SPAM provided higher shear stability and exhibited a smaller viscosity drop after thermal aging, which indicates improved resistance of the polymer chains to mechanical and thermal degradation. The drilling fluid formulated with the modified starch-SPAM blend showed marked improvements in thermal and rheological stability. Filtration tests further confirmed its superior performance as the filter cake thickness was reduced to approximately 2 mm, compared to the thicker and more irregular cakes formed in the formulations containing native starch. Additionally, the fluid loss (FL) reduced to 2.2 mL, which reflects the formation of a dense, uniform, and low-permeability filter cake, which is critical for effective wellbore sealing and fluid control. In fact, synergistic effects of the two polymers, in addition to improving the fluid's physical and chemical properties, have increased its stability against harsh operational conditions.

Keywords:

water-based drilling fluid,
sulfonated polyacrylamide,
modified starch,
rheology,
thermal stability

(*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: Noeinl@ripi.ir

Please cite this article using:

Ostovari A., Noein L., and Shokoohi Sh., Performance Evaluation of a High-Temperature/High-Pressure Water-Based Drilling Fluid Using an Environmentally Friendly Hybrid of Modified Starch/Sulfonated Polyacrylamide, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **38**, 341-352, 2026.

کارایی سیال حفاری پایه آبی در فشار و دمای زیاد با استفاده از ترکیب زیست پایه نشاسته اصلاح شده/پلی آکریل آمید سولفون دار

عبدالامیر استواری، لیلا نوئین*، شیرین شکوهی

تهران، پژوهشگاه صنعت نفت، پژوهشکده توسعه فناوری های شیمیایی، پلیمری و پتروشیمی، صندوق پستی ۱۳۷-۱۴۶۶۵

دریافت: ۱۴۰۴/۶/۵، پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۱۹

چکیده

فرضیه: به کارگیری سامانه پلیمری ترکیبی شامل نشاسته اصلاح شده و پلی آکریل آمید سولفون دار (SPAM) در سیال حفاری پایه آبی، در مقایسه با نشاسته، از اثر هم افزایی دو پلیمر موجب افزایش پایداری گرمایی و حفظ مطلوب پایداری رئولوژیکی شده و پس از مواجهه با شرایط فشار و دمای زیاد به کاهش قابل توجه اتلاف سیال از تشکیل کیک فیلتر فشرده و کم تخلخل منجر می شود. **روش ها:** در این پژوهش، ترکیبی از پلی آکریل آمید سولفون دار (SPAM) و نشاسته، در دو حالت طبیعی و اصلاح شده با هدف بهبود کارایی سیال حفاری پایه آبی ارزیابی شد. **یافته ها:** نتایج آزمون گرماوزن سنجی (TGA) نشان داد، سرعت تخریب نشاسته اصلاح شده به طور قابل توجهی کمتر از نشاسته طبیعی است که این پایداری گرمایی بیشتر را می توان به ساختار شبکه ای متراکم نشاسته اصلاح شده نسبت داد. در آزمون رئولوژیکی محلول های آبی، ترکیب نشاسته اصلاح شده با SPAM نسبت به سایر نمونه ها، رفتار برشی پایداری و کاهش گرانروی کمتری پس از پیرسازی گرمایی نشان داد که حاکی از مقاومت بیشتر زنجیرهای پلیمری در برابر برش مکانیکی و گرماست. نتایج آزمون رئولوژیکی سیال حفاری نشان داد، ترکیب نشاسته اصلاح شده با SPAM به بهبود قابل توجه پایداری گرمایی و گرانروی سیال حفاری منجر می شود. افزون بر این، نتایج آزمون اتلاف سیال نشان داد، ضخامت کیک فیلتر در نمونه دارای نشاسته اصلاح شده و SPAM به حدود ۲ mm کاهش یافت، در حالی که نمونه های دارای نشاسته طبیعی کیک هایی ضخیم تر و نامنظم ایجاد کردند. همچنین، مقدار اتلاف سیال در این نمونه به ۲/۲ mL کاهش یافت که بیانگر تشکیل کیک فشرده، یکنواخت و کم تخلخل است که در کاهش مقدار اتلاف سیال و افزایش گرفتگی مؤثر سازند نقش دارد. در واقع، آثار هم افزایی دو پلیمر افزون بر بهبود ویژگی های فیزیکی و شیمیایی سیال، پایداری آن را در برابر شرایط عملیاتی دشوار افزایش داده اند.

واژه های کلیدی

سیال حفاری پایه آبی،

پلی آکریل آمید سولفون دار،

نشاسته اصلاح شده،

رئولوژی،

پایداری گرمایی

* مسئول مکاتبات، پیام نگار:

Noeinl@ripi.ir

مقدمه

سیالات حفاری از ارکان اصلی عملیات حفاری چاه‌های نفت و گاز به‌شمار می‌آیند. از جمله کارکردهای مهم این سیالات می‌توان به کنترل فشار سازندهای زیرسطحی، جلوگیری از چسبیدن کنده‌ها به تجهیزات درون‌چاهی، حفظ پایداری دیواره چاه، خنک‌سازی و روان‌کاری تجهیزات حفاری و انتقال کنده‌های حفاری به سطح اشاره کرد. ترکیب این سیالات به‌طور معمول شامل مایعات پایه، ذرات جامد، مواد آلی، نمک‌های محلول و افزودنی‌های ویژه است که هر یک برای افزایش کارایی سیال در شرایط عملیاتی متنوع طراحی شده‌اند. از جمله چالش‌های رایج در سیالات حفاری پایه‌آبی، می‌توان به رفتار رئولوژیکی و کارایی آن‌ها در کنترل اتلاف سیال (fluid loss) اشاره کرد. اتلاف سیال فرایندی است که طی آن به دلیل اختلاف فشار بین سیال حفاری و سازند، فاز مایع سیال به درون سازند نفوذ کرده و موجب ایجاد کیک فیلتر روی دیواره چاه می‌شود. اگر این کیک دارای ضخامت یا نفوذپذیری زیاد باشد، مشکلاتی نظیر افزایش گشتاور حفاری، نوسان‌های فشار، گیرکردن لوله‌ها و حتی آسیب به سازند رخ می‌دهد. از این‌رو، مهندسی دقیق ترکیب سیال به‌منظور تشکیل کیک نازک و یکنواخت با نفوذپذیری کم برای کاهش افت فشار و حفظ بهره‌وری چاه ضروری است.

پلیمرها یکی از اجزای کلیدی در فرمول‌بندی سیال حفاری به‌شمار می‌روند و نقش مهمی در کنترل اتلاف سیال، اصلاح گرانروی و پایداری سازندهای شیلی دارند [۱]. در این میان، پلی‌آکریل‌آمید (PAM) به دلیل وزن مولکولی زیاد، قابلیت تشکیل شبکه پلیمری پایدار و کارایی مؤثر در کاهش حجم اتلاف سیال کاربرد گسترده‌ای در سیالات پایه‌آبی دارد [۳،۴]. با وجود مزایای نام‌برده، محدودیت‌هایی نظیر حساسیت به یون‌های چندظرفیتی، کاهش پایداری گرمایی در دماهای زیاد و نگرانی‌های زیست‌محیطی مرتبط با ماندگاری بلندمدت آن در محیط، کاربرد آن را در برخی شرایط عملیاتی با چالش‌هایی مواجه کرده است [۵،۶]. افزون بر این، نشاسته به‌عنوان پلیمر طبیعی، زیست‌تخریب‌پذیر، ارزان و در دسترس جایگاه مهمی در ترکیب سیالات حفاری سازگار با محیط زیست یافته است [۷،۸]. با وجود این، محدودیت‌هایی همچون پایداری گرمایی کم، مقاومت کم در برابر تنش برشی و آسیب‌پذیری در برابر تخریب میکروبی موجب شده است که استفاده مستقل از نشاسته در شرایط عملیاتی دشوار چاه‌های عمیق با چالش‌های قابل توجهی همراه باشد [۴]. با توجه به وجود گروه‌های هیدروکسیل فراوان در ساختار نشاسته، اصلاحات شیمیایی مختلفی مانند استرسازی، اترسازی، اتصال شاخه‌ای، پلیمر شدن و شبکه‌ای شدن به‌منظور بهبود خواص فیزیکی و

شیمیایی آن تاکنون انجام شده است [۹-۱۲]. اصلاح شیمیایی نشاسته با ایجاد تغییر در کارایی آن در مقایسه با نشاسته طبیعی زمینه را برای گسترش دامنه کاربردی این پلیمر در حوزه‌های مختلف فراهم می‌کند.

در مطالعات متعددی اثربخشی نشاسته‌های طبیعی و اصلاح‌شده در بهبود کارایی سیالات حفاری بررسی شده است [۱۳-۱۶]. علی و همکاران [۱۷] اثر نشاسته تاپیوکا (Tapioca) بر رفتار رئولوژیکی و اتلاف سیال را در سیالات حفاری پایه‌آبی در شرایط مختلف دما و فشار بررسی کردند. نتایج نشان داد، استفاده از این نشاسته در مجاورت ضمع زانتان و سلولوز پلی‌آنیونی (PAC)، به‌ویژه در ترکیب‌های با درصد جامد کم، به بهبود رفتار رئولوژیکی و کاهش مؤثر اتلاف سیال منجر می‌شود. نمونه‌های دارای نشاسته تاپیوکا رفتار روان‌شوندگی برشی (shear thinning) قابل توجهی نشان دادند و داده‌ها به‌خوبی با مدل قانون توان تطابق داشتند. همچنین تصاویر میکروسکوپی تشکیل کیک‌های فشرده و یکنواخت در دمای زیاد را تأیید کرد. این یافته‌ها نشان‌دهنده کارایی زیاد افزودنی‌های زیست‌پایه در بهینه‌سازی کارایی سیالات حفاری هستند. Assi و همکاران [۱۸]، ویژگی‌های سیالات حفاری تهیه‌شده از نشاسته سیب‌زمینی را با افزودنی‌های رایج کنترل اتلاف سیال بررسی کردند. نتایج نشان داد، ترکیب نشاسته سیب‌زمینی و سلولوز پلی‌آنیونی با نسبت تقریباً مساوی، کارایی مطلوبی در بهینه‌سازی خواص رئولوژیکی و کاهش اتلاف سیال در سیالات حفاری دارد. Sulaimon و همکاران [۱۹]، از نشاسته‌های اصلاح‌شده و استخراج‌شده از منابع مختلف مانند کاساوا (Cassava) و ذرت برای بهبود خواص سیالات حفاری آب‌پایه در شرایط فشار و دمای زیاد استفاده کردند. نتایج نشان داد، سیالات حفاری دارای نشاسته استیل‌دار شده کاساوا و ذرت کارایی بهتری نسبت به کربوکسی‌متیل سلولوز (CMC) نشان دادند. این سیالات کمترین حجم و کاهش صافاب را در محدوده مشخصات API داشته و توانستند در شرایط سخت فشار و دمای زیاد پایداری خود را حفظ کنند.

با وجود پیشرفت‌های قابل توجه در بهره‌گیری از نشاسته‌های طبیعی و اصلاح‌شده در سیالات حفاری، همچنان نیاز به توسعه افزودنی‌های زیست‌پایه با پایداری گرمایی زیاد و کارایی مؤثر در شرایط فشار و دمای زیاد احساس می‌شود. در این مطالعه، کارایی سیال حفاری پایه‌آبی دارای ترکیب نشاسته اصلاح‌شده و پلی‌آکریل‌آمید سولفون‌دار (SPAM) ارزیابی شد. هدف از این ترکیب، بهره‌گیری از ویژگی‌های مکمل دو پلیمر، شامل تشکیل شبکه پایدار با SPAM و زیست‌سازگاری و ساختار فیزیکی مناسب نشاسته و استفاده از اثر هم‌افزایی آن‌هاست؛ به‌طوری که سامانه پلیمری حاصل موجب بهبود

۱۱۳ g کلسیم کربنات، ۹۰۰ g باریت و ۱۲۷ g نمک سدیم کلرید به ۳۵۰ mL از محلول‌های پلیمری (نشاسته خالص یا آمیخته) افزوده شد. سپس، ترکیب حاصل به کمک همزن مکانیکی با سرعت ۵۰۰ rpm به مدت ۱ h همگن‌سازی شد. به منظور تنظیم pH سیال در محدوده قلیایی (حدود ۱۰)، چند قطره محلول آب‌آهک با غلظت ۱٪ وزنی به مخلوط اضافه شد. در ادامه، سیالات حفاری دارای نشاسته‌های خالص، اصلاح‌شده و محلول‌های ترکیبی دارای نشاسته‌های خالص و اصلاح‌شده به ترتیب DF-Blend-N، DF-Starch-M، DF-Starch-N و DF-Blend-M نام‌گذاری شدند. فرایند پیرسازی سیال حفاری در دمای ۱۲۰ °C و به مدت ۸ h با استفاده از آون دوار (hot rolling oven) انجام شد.

آزمون‌ها و دستگاه‌های شناسایی

طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوری (FTIR) با طیف‌سنج Bruker مدل ALPHA در محدوده اعداد موجی $4000-400\text{ cm}^{-1}$ به دست آمد. برای انجام آزمون گرماوزن‌سنجی (TGA) از دستگاه Mettler Toledo مدل TGA/STDA 851 استفاده شد. آزمون‌ها از دمای ۳۰ °C تا ۶۰۰ °C با سرعت گرمادهی $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ در جو نیتروژن انجام شدند. رفتار رئولوژیکی محلول‌های پلیمری خالص و ترکیبی، پیش و پس از آزمون پیرشدگی، با رئومتر مدل MCR 501 مجهز به سامانه استوانه-سیلندر در دو دمای ۲۵ °C و ۹۰ °C ارزیابی شد. آزمون‌های رئولوژی سیال حفاری با گرانش‌سنج دوار OFITE مدل ۹۰۰ انجام شد.

جدول ۱- شناسه نمونه‌ها و سیالات حفاری بررسی شده.

Table 1. The codes of the samples and the drilling fluids under investigation.

Sample code	Composition/Explanation of the sample
Starch-N	Native Corn Starch
Starch-M	Modified starch
SPAM	Sulfonated polyacrylamide
Blend-N	of native starch and SPAM Blend
Blend-M	of modified starch and SPAM Blend
DF-Starch-N	Drilling fluid containing native starch
DF-Starch-M	Drilling fluid containing modified starch
DF-Blend-N	Drilling fluid containing of native starch and SPAM Blend
DF-Blend-M	of modified starch and SPAM Drilling fluid containing blend

پایداری گرمایی و پایداری در رفتار رئولوژیکی، کاهش اتلاف سیال و تشکیل کیک فیلتر یکنواخت و کم‌تخلخل شود. این موضوع تمایز این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین است و ارائه سامانه پلیمری پایدار و دوست‌دار محیط زیست برای کاربرد در شرایط عملیاتی دشوار را فراهم می‌سازد.

تجربی

مواد

نشاسته اصلاح‌شده RESISTAMYL® 347 از شرکت Tate & Lyle تهیه شد. این نشاسته بر پایه ذرت مومی بوده و با دو نوع اصلاح شیمیایی شامل استیل‌دار شدن و شبکه‌ای شدن قرار گرفته است. مقادیر رطوبت این نشاسته ۱۱-۱۴٪، خاکستر $\geq 0.4\%$ و pH حدود ۷-۴/۵ گزارش شده است. گرانش‌سنجی این پلیمر در دمای ۹۵ °C در محدوده ۸۵۰-۱۰۵۰ BU قرار دارد. نشاسته طبیعی از نشاسته ذرت شرکت زرنام با بیشینه رطوبت ۱۴٪ تهیه شد. کوپلیمر پلی (آکریل‌آمید-۲-متیل پروپان سولفونیک اسید) با نام تجاری Drisac D200، محصول شرکت Shaanxi چین به کار گرفته شد. سدیم کلرید از شرکت اسپیدان و کلسیم هیدروکسید از شرکت Merck تهیه شده و به عنوان نمک معدنی و قلیایی‌ساز برای تنظیم ویژگی‌های شیمیایی و رئولوژیکی سیال حفاری به کار گرفته شدند. کربنات کلسیم نیز از شرکت نفت گستر تهیه شد.

دستگاه‌ها و روش‌ها

تهیه محلول‌های پلیمری

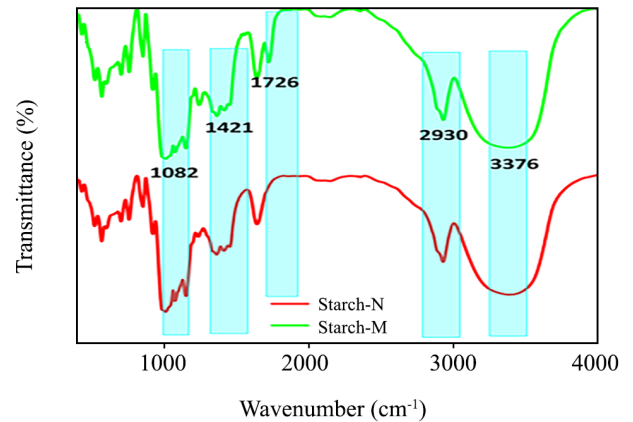
به منظور انحلال کامل و غلبه بر پیوندهای قوی هیدروژنی بین مولکول‌های نشاسته، نیاز است تا نشاسته در زمان محدودی که به تخریب گرمایی آن منجر نشود، در دمای زیاد حل شود. بدین منظور، ابتدا حدود ۳۵۰ mL آب شهری به آرامی به ظرف دارای ۵ g نشاسته افزوده شده و هم‌زده شد. سپس تعلیق حاصل به مدت ۱۵ min در دمای ۸۰ °C هم‌زده شد تا پیش‌ژل نشاسته حاصل شود. پلی‌آکریل‌آمید سولفون‌دار (SPAM) در دمای محیط به مدت ۱ h هم‌زده شد و سپس با نسبت ۵۰٪ وزنی به محلول نشاسته اضافه شد. فرایند پیرسازی گرمایی محلول‌های پلیمری در دمای ۸۰ °C به مدت ۸ h انجام شد. نشانه‌گذاری نمونه‌ها و سیالات حفاری استفاده‌شده در جدول ۱ آمده است.

تهیه نمونه‌های سیال حفاری

برای تهیه نمونه‌های سیال حفاری با وزن ویژه ۸۵ pcf مقدار

FTIR (شکل ۱) نشان می‌دهد، در طیف نشاسته طبیعی، پیک‌های مشخص در ناحیه 2900 و $3300-3400$ cm^{-1} به ترتیب به ارتعاش کششی پیوندهای C-H و گروه‌های هیدروکسیل نسبت داده می‌شود. همچنین پیک جذبی در ناحیه $1150-950$ cm^{-1} به ارتعاش کششی C-O و C-C ساختار پلی‌ساکاریدی نشاسته مرتبط است که در هر دو نمونه مشاهده می‌شود. پیک‌ها در ناحیه 1082 و 1421 cm^{-1} به ترتیب به ارتعاش خمشی گروه‌های C-H و ارتعاش کششی پیوندهای C-O-C نسبت داده می‌شود. با وجود این، در طیف نشاسته اصلاح شده، پیک جدید و مشخصی در ناحیه 1726 cm^{-1} ظاهر شده که در طیف نشاسته طبیعی مشاهده نشده است [۲۰]. این پیک به ارتعاش کششی گروه‌های کربونیل مرتبط است. این گروه‌های کربونیل می‌توانند حاصل استیل‌دارشدن یا شبکه‌ای شدن با عوامل دارای کربونیل نظیر آدیپیک انیدرید باشند. افزون بر این، پیک‌های جدید در محدوده $1240-1260$ cm^{-1} مربوط به ارتعاش‌های C-O و تغییرات شدت پیک‌های C-O-C در حدود 1080 cm^{-1} نیز مشاهده شد. این تغییرات طیفی، به همراه شواهد قبلی، وجود گروه‌های آدیپات و استیل در ساختار نشاسته اصلاح شده را تأیید می‌کند.

پایداری گرمایی و دمای تخریب نشاسته طبیعی و اصلاح شده براساس نتایج آزمون TGA (شکل ۲) نشان داد، در مرحله اول تخریب که در گستره دمایی $100-300$ $^{\circ}\text{C}$ رخ داده است، حدود ۶٪ وزنی کاهش وزن به دلیل تبخیر آب رخ داده است. کاهش وزن مشاهده شده در نمونه Starch-M در دمای کمتر از 100 $^{\circ}\text{C}$ ، با وجود آب‌گریزتر بودن آن نسبت به Starch-N، می‌تواند به جذب سطحی بخشی از آب درون ساختار زل‌مانند و وجود گروه‌های استری قطبی در نشاسته اصلاح شده مرتبط باشد. همچنین، همان‌طور که در شکل ۲ (a)



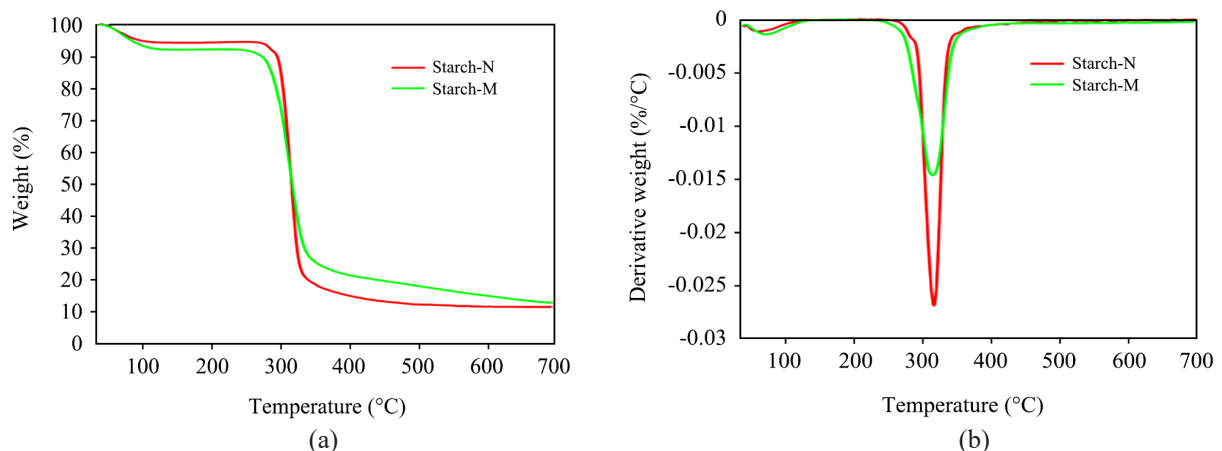
شکل ۱- طیف FTIR نمونه‌های Starch-N و Starch-M.

Fig. 1. FTIR spectra of samples Starch-N and Starch-M.

این دستگاه امکان اندازه‌گیری ویژگی‌های رئولوژیکی سیال، از جمله گرانروی پلاستیک، نقطه تسلیم و رفتار جریان را فراهم می‌سازد. اندازه‌گیری اتلاف سیال با روش استاندارد API در فشار 100 psi و دمای اتاق به مدت 30 min با استفاده از دستگاه صافی پرس انجام شد. پس از آزمون اتلاف سیال، گل باقی‌مانده روی صافی کاغذی پس از دو بار شست‌وشو با آب معمولی، درون آون گرمایی در دمای 90 $^{\circ}\text{C}$ خشک شد. سپس، ضخامت کیک تشکیل شده اندازه‌گیری شد. از گرم‌کننده دوار شرکت طب آزما برای ارزیابی پایداری سیالات حفاری در برابر گرما و دمای زیاد استفاده شد.

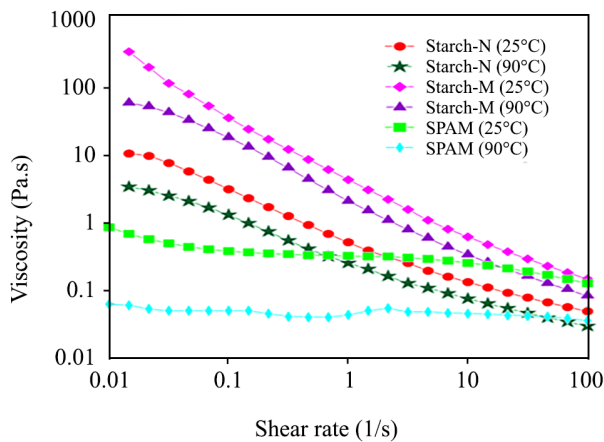
نتایج و بحث

مقایسه ساختار شیمیایی نشاسته طبیعی و اصلاح شده براساس نتایج



شکل ۲- نمودارهای: (a) TGA و (b) DTG نمونه‌های نشاسته طبیعی و نشاسته اصلاح شده.

Fig. 2. TGA (a) and DTG (b) curves for samples Starch-N and Starch-M.



شکل ۳- گرانروی برشی نشاسته طبیعی و اصلاح‌شده و پلی‌آکریل آمید سولفون‌دار در دمای ۲۵ و ۹۰ °C.

Fig. 3. Shear viscosity of native starch (Starch-N), modified starch (Starch-M), and SPAM at 25 and 90 °C.

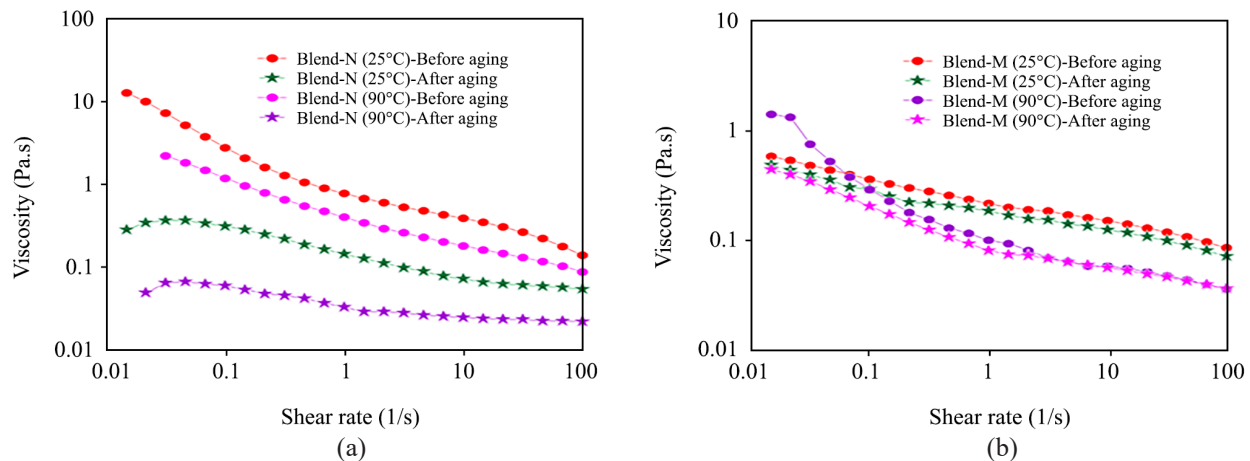
می‌شود [۱۲]. در واقع، نشاسته اصلاح‌شده، با وجود داشتن ساختار شبکه‌ای، در مجاورت آب متورم شده و با ایجاد پیوندهای هیدروژنی با مولکول‌های آب، حجم مؤثر فاز پلیمری را افزایش می‌دهد و رفتار ژل‌مانند محلول را تقویت می‌کند.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، نشاسته در هر دو حالت طبیعی و اصلاح‌شده، نسبت به SPAM رفتار روان‌شوندگی برشی در برابر برش نشان داده است. ساختار مولکولی شاخه‌ای و درهم‌تنیده نشاسته تحت نیروی برشی در راستای جریان هم‌راستا شده و در نتیجه، مقاومت در برابر جریان با افزایش سرعت برش کاهش می‌یابد. در مقابل، پلیمر SPAM ساختاری خطی دارد و زنجیرهای آن در محلول ساختاری انعطاف‌پذیر با درهم‌تنیدگی کمتر تشکیل می‌دهند. افزون بر این، وجود گروه‌های سولفونات (SO_3^-) روی زنجیرها به ایجاد بار منفی زیاد و دافعه الکتروستاتیکی میان زنجیرها منجر می‌شود. این دافعه موجب باز شدن زنجیرها و کاهش درهم‌تنیدگی فیزیکی میان آنها می‌شود. بدین ترتیب، گرانروی پایه محلول SPAM کمتر از نشاسته است، اما پایداری ساختاری در برابر برش بیشتر و روان‌شوندگی برشی آن کمتر است [۱۲].

گرانروی برشی آمیخته نشاسته طبیعی و اصلاح‌شده با پلی‌آکریل‌آمید سولفون‌دار پیش و پس از پیرسازی گرمایی در دو دمای ۲۵ و ۹۰ °C در شکل ۴ نشان داده شده است. در مقایسه با آمیخته نشاسته طبیعی و SPAM، گرانروی ترکیب نشاسته اصلاح‌شده با SPAM به‌طور نسبی کمتر است. این تفاوت را می‌توان به کاهش دسترسی گروه‌های عاملی آزاد در ساختار نشاسته اصلاح‌شده نسبت داد. پیوندهای عرضی به کاهش تعداد گروه‌های هیدروکسیل آزاد

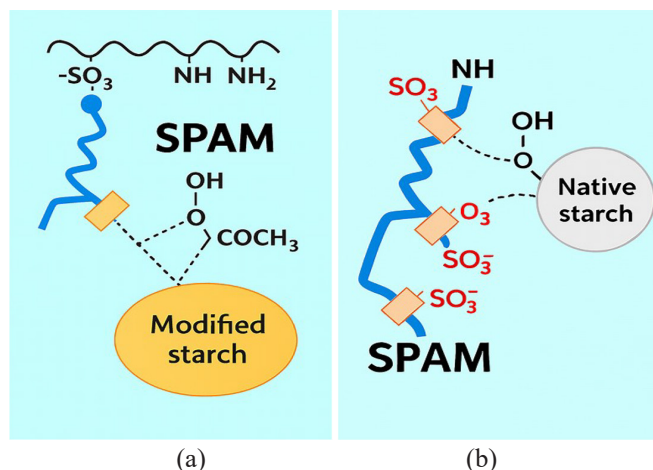
مشاهده می‌شود، نشاسته اصلاح‌شده، با وجود کاهش وزن نهایی کمتر، دمای آغاز تخریب کمتری نسبت به نشاسته طبیعی دارد. این تخریب اولیه زود هنگام می‌تواند به وجود بخش‌های کوچک اصلاح‌نشده نشاسته و باقی‌مانده عوامل شبکه‌ای‌ساز مرتبط باشد [۲۱، ۲۲]. با وجود این، در دماهای بیشتر، ساختار شبکه‌ای شده آدیپاتی به افزایش انسجام زنجیرها و کاهش سرعت تخریب منجر می‌شود و در نتیجه کاهش وزن نهایی Starch-M کمتر از Starch-N است. پس از آن، مرحله اصلی تخریب در بازه دمایی ۳۷۰-۲۴۰ °C با بیشینه تخریب ۳۱۰ °C رخ داده است که به تجزیه پیکره پلی‌ساکاریدی از راه شکستن پیوندهای گلیکوزیدی و تخریب ساختار حلقوی واحدهای گلوکوز نسبت داده می‌شود. در این مرحله، کاهش وزن شدیدی رخ داده و ترکیبات فراری نظیر آب، کربن دی‌اکسید و محصولات تجزیه آلی آزاد می‌شوند [۲۱، ۲۲]. با وجود این، مقدار کاهش وزن در این بازه دمایی برای نشاسته اصلاح‌شده کمتر از نشاسته طبیعی بوده است. کاهش مقدار تخریب را می‌توان به وجود پیوندهای عرضی در ساختار نشاسته اصلاح‌شده نسبت داد که موجب افزایش انسجام ساختاری و محدود شدن حرکت زنجیرهای پلیمری می‌شود. شبکه سه‌بعدی متراکم مقاومت بیشتری در برابر شکست گرمایی نشان داده و روند تجزیه را کند می‌سازد [۲۱، ۲۲]. در نتیجه، نشاسته اصلاح‌شده پایداری گرمایی بیشتری در مقایسه با نشاسته طبیعی نشان می‌دهد. در دمای بیش از ۷۰۰ °C، حدود ۱۱٪ وزنی از وزن اولیه باقی‌مانده که ناشی از کربنی شدن بقایای پیکره پلیمر است.

گرانروی برشی نمونه‌های نشاسته طبیعی (Starch-N) و اصلاح‌شده (Starch-M) و پلی‌آکریل‌آمید سولفون‌دار (SPAM) در دو دمای ۲۵ و ۹۰ °C در شکل ۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود، با افزایش دما، گرانروی هر سه نمونه کاهش یافته است. این کاهش را می‌توان به تضعیف پیوندهای هیدروژنی بین زنجیرهای پلیمری و افزایش تحرک زنجیرها در دماهای بیشتر نسبت داد. همچنین، نشاسته اصلاح‌شده گرانروی به مراتب بیشتری نسبت به نشاسته طبیعی نشان داده است. این افزایش را می‌توان به وجود پیوندهای عرضی در ساختار نشاسته اصلاح‌شده نسبت داد که با تقویت برهم‌کنش‌های بین‌زنجیری و کاهش آزادی حرکتی زنجیرها، به ایجاد شبکه‌ای منسجم و پایدار در برابر تنش‌های مکانیکی و گرمایی منجر می‌شود. افزون بر این، اصلاح شیمیایی ساختار نشاسته موجب افزایش ظرفیت جذب و نگهداری آب و افزایش تورم در محیط آبی می‌شود. در نتیجه، با افزایش حجم مؤثر فاز پلیمری و تقویت شبکه ژل‌مانند حاصل از زنجیرهای متورم، مقاومت بیشتری در برابر جریان ایجاد شده و در نهایت به افزایش قابل توجه گرانروی منجر



شکل ۴- گرانروی برشی آمیخته (a) نشاسته طبیعی و (b) اصلاح‌شده با پلی‌آکریل‌آمید سولفون‌دار پیش و پس از پیرسازی در دو دمای ۲۵ و ۹۰ °C. Fig. 4. Shear viscosity of SPAM/Starch-N and SPAM/Starch-M blends before and after aging at 25 and 90 °C.

می‌شوند که از بازآرایی زنجیرها و گسیختگی و تخریب ساختار در دماهای زیاد جلوگیری می‌کند. همچنین، این پیوندها تحرک زنجیرهای پلیمری را کاهش داده و پایداری ترکیب را در برابر تغییرات دمایی افزایش می‌دهند [۱۲]. پایداری ساختاری آمیخته دارای نشاسته اصلاح‌شده موجب کاهش چشمگیر افت گرانروی در طول زمان می‌شود. پایداری رئولوژیکی در شرایط دمایی و زمانی سخت، به حفظ کارایی یکنواخت سیال در طول عملیات حفاری منجر شده و از بروز مشکلاتی مانند ته‌نشینی ذرات، کاهش ظرفیت حمل براده‌ها و نوسانات فشار جلوگیری می‌کند. در نتیجه، سامانه پایدارتری برای فرایند حفاری فراهم می‌کند.

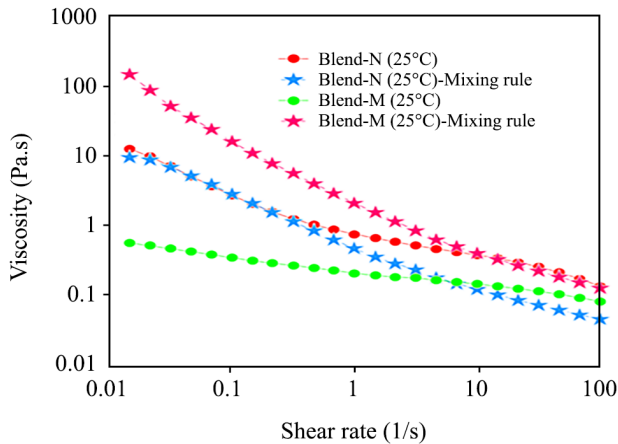


طرح ۱- برهم‌کنش بین زنجیرهای SPAM با (a) نشاسته طبیعی و (b) نشاسته اصلاح‌شده.

Schem 1. Interaction between SPAM chains with (a) native starch and (b) modified starch.

در دسترس در ساختار نشاسته اصلاح‌شده منجر می‌شود. از آنجا که پیوندهای هیدروژنی بین گروه‌های عاملی نشاسته و پلی‌آکریل‌آمید نقش مهمی در افزایش گرانروی ایفا می‌کنند، کاهش دسترسی این گروه‌ها، برهم‌کنش بین دو پلیمر را محدود می‌کند. افزون بر این، ساختار متراکم‌تر نشاسته اصلاح‌شده، قابلیت آن را برای ایجاد برهم‌کنش فیزیکی با زنجیرهای پلی‌آکریل‌آمید کاهش می‌دهد. در نتیجه، اگرچه نشاسته اصلاح‌شده به‌تنهایی گرانروی بیشتری دارد، اما در مخلوط با پلی‌آکریل‌آمید سولفون‌دار، اثر هم‌افزایی کمتری نسبت به نشاسته طبیعی در افزایش گرانروی محلول آمیخته نشان می‌دهد. همچنین، با وجود اینکه نشاسته در هر دو حالت طبیعی و اصلاح‌شده رفتار روان‌شوندگی برشی قابل‌توجهی نشان می‌دهد، اما پس از ترکیب با SPAM، کاهش محسوسی در این رفتار مشاهده شده است. این پدیده را می‌توان به برهم‌کنش‌های میان‌زنجیری بین گروه‌های عاملی نشاسته و SPAM، به‌ویژه پیوندهای هیدروژنی و برهم‌کنش‌های دوقطبی-دوقطبی میان گروه‌های سولفوناتی و آمیدی برهم‌کنش‌ها به تشکیل اتصالات فیزیکی و الکتروستاتیکی موقت میان زنجیرهای پلیمری منجر می‌شود که حرکت آزاد زنجیرها را در برابر تنش‌های برشی محدود می‌سازند [۱۲]. در نتیجه، موجب کاهش رفتار روان‌شوندگی برشی در سامانه آمیخته می‌شود.

پس از پیرسازی گرمایی، آمیخته نشاسته اصلاح‌شده با SPAM کاهش گرانروی کمتری نسبت به آمیخته دارای نشاسته طبیعی نشان داده است. در آمیخته دارای نشاسته اصلاح‌شده، مقاومت بیشتر در برابر تخریب گرمایی به دلیل ایجاد پیوندهای عرضی در ساختار نشاسته است. این پیوندها به ایجاد شبکه سه‌بعدی مستحکم منجر



شکل ۵- گرانروی برشی ترکیب نشاسته طبیعی و اصلاح شده با پلی آکریل آمید سولفون دار در دمای ۲۵ °C و پیش بینی با قانون مخلوط‌ها.

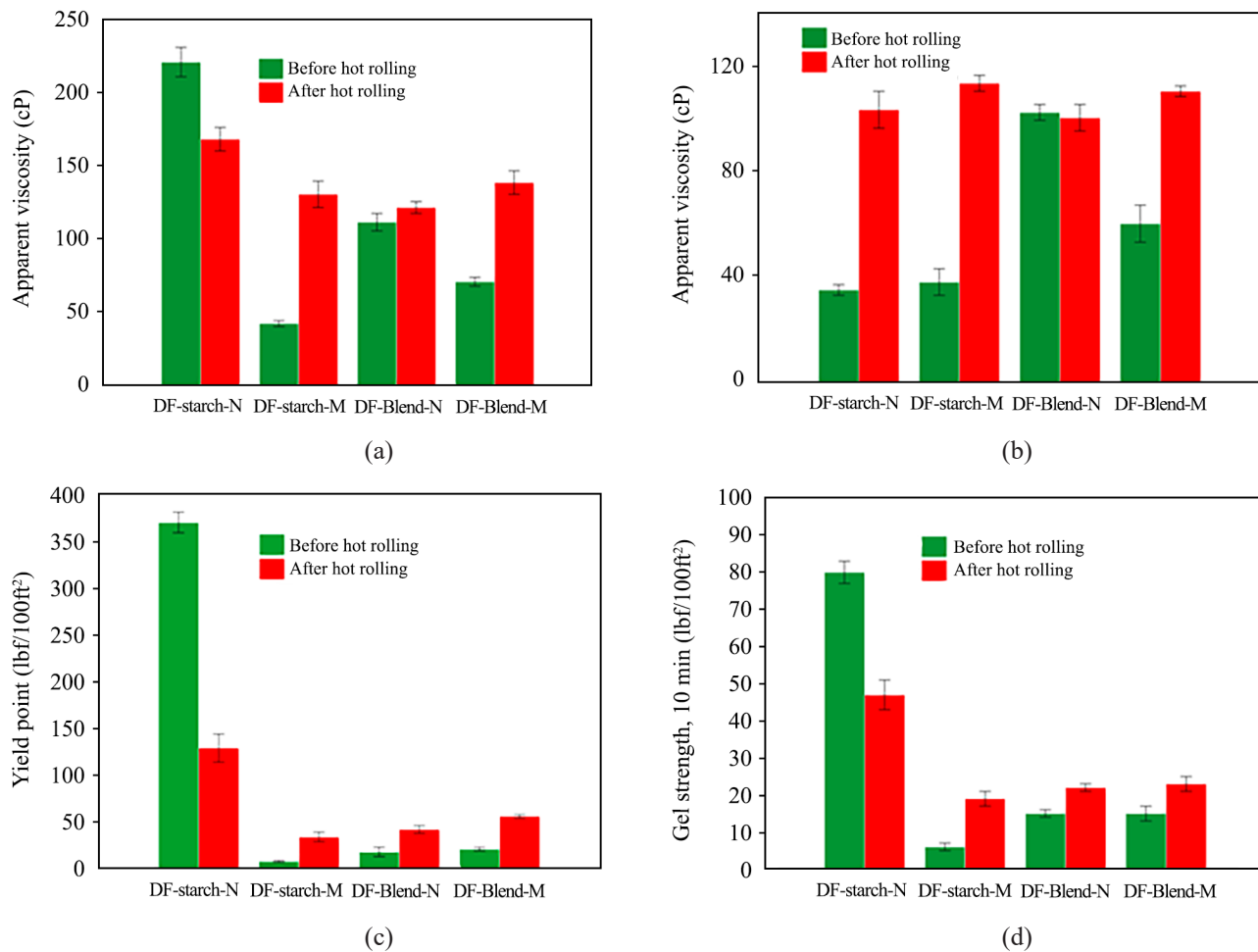
Fig. 5. Shear viscosity of SPAM/Starch-N and SPAM/Starch-M blends before and after aging at 25 and prediction according to the mixing rule.

دارای نشاسته اصلاح شده مقدار گرانروی ظاهری بسیار کمتری نشان داده (۴۲ cP) که با ساختار متراکم، پیوندهای عرضی و محدودیت در تحرک زنجیرها مرتبط است. در سیالات حفاری دارای آمیخته‌ها نیز گرانروی ظاهری، به‌ویژه در نمونه دارای نشاسته اصلاح شده پس از پیرسازی گرمایی افزایش یافته است. این پدیده را می‌توان به برهم‌کنش‌های الکتروستاتیکی و هیدروژنی بین SPAM و نشاسته اصلاح شده نسبت داد که موجب بهبود ساختار سیال در برابر دما شده است. از سوی دیگر، گرانروی پلاستیک در سیالات دارای آمیخته‌ها، به‌ویژه در سیال دارای نشاسته اصلاح شده پس از پیرسازی گرمایی، با افزایش قابل توجهی (از ۶۰ به ۱۱۰ cP) همراه بوده که بیانگر افزایش مقاومت ساختار سیال در برابر برش است و به ایجاد ساختارهای شبکه‌ای نیمه‌پایدار میان زنجیرهای نشاسته و SPAM در اثر فرایند پیرسازی نسبت داده می‌شود. به عبارت دیگر، نشاسته طبیعی در دمای محیط به دلیل زنجیرهای آزادتر و گروه‌های هیدروکسیل بیشتر، برهم‌کنش قوی‌تری با SPAM برقرار می‌کند. اما در دماهای زیاد، ساختارهای نیمه‌بلوری نشاسته طبیعی تخریب شده و نظم ساختاری آن کاهش می‌یابد که موجب تضعیف این برهم‌کنش‌ها می‌شود. در مقابل، نشاسته اصلاح شده به دلیل وجود پیوندهای عرضی، در دماهای زیاد یکپارچگی ساختاری خود را حفظ کرده و گروه‌های عاملی آن پس از باز شدن محدود شبکه، قابلیت برقراری برهم‌کنش‌های پایدارتر و تقویت شده‌تری را با SPAM پیدا می‌کند.

نتایج آزمون‌های TGA، FTIR و رئولوژی نشان می‌دهد، اصلاح استیل‌دار شدن موجب کاهش تورم زنجیرهای نشاسته و بهبود یکنواختی جریان در محدوده برش‌های مختلف می‌شود و بنابراین سهم قابل توجهی در ایجاد رفتار شبه‌پلاستیک در سیال حفاری دارد. در مقابل، وجود پیوندهای عرضی آدیپاتی به افزایش انسجام ساختاری و پایداری گرمایی پلیمر در شرایط HPHT منجر می‌شود و از تخریب زودهنگام زنجیرها جلوگیری می‌کند. با ترکیب این دو اثر، نشاسته با اصلاح دوگانه قابلیت برقراری تعادل مناسبی را میان پایداری گرمایی و حفظ رفتار رئولوژیکی دارد.

در ادامه، به منظور بررسی مقدار برهم‌کنش آمیخته‌های مختلف نشاسته (طبیعی و اصلاح شده) با پلی آکریل آمید سولفون دار، گرانروی مخلوط آن‌ها با قانون مخلوط‌ها ارزیابی شد که نتایج در شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مخلوط نشاسته طبیعی با SPAM به‌طور دقیق، به‌ویژه در سرعت برش کم، از قانون مخلوط‌ها پیروی کرده و گرانروی آن به‌طور خطی با مقدار SPAM مرتبط است. این رفتار را می‌توان به ساختار انعطاف‌پذیرتر نشاسته طبیعی نسبت داد. این موضوع موجب برهم‌کنش مؤثر زنجیرهای پلیمری نشاسته و SPAM و در نتیجه افزایش گرانروی می‌شود. در مقابل، آمیخته نشاسته اصلاح شده با SPAM گرانروی کمتری در مقایسه با پیش‌بینی قانون مخلوط‌ها نشان داده است که به پیوندهای عرضی حاضر در ساختار نشاسته مرتبط است. پیوندهای عرضی در نشاسته اصلاح شده، ساختاری متراکم ایجاد می‌کند و به کاهش برهم‌کنش بین زنجیرهای پلیمری نشاسته و SPAM منجر می‌شود. در نتیجه، گرانروی مخلوط کاهش نشان می‌دهد. به منظور شبیه‌سازی شرایط عملیاتی گل در هنگام حفاری رفتار رئولوژیکی سیالات حفاری دارای نشاسته طبیعی (Starch-N)، نشاسته اصلاح شده (Starch-M) و آمیخته آن‌ها (Blend-N و Blend-M)، پارامترهای مهم از جمله گرانروی ظاهری، گرانروی، نقطه تسلیم و استحکام ژل در دو حالت پیش و پس از پیرسازی گرمایی ارزیابی شدند. نتایج حاصل در شکل ۶ آمده است.

گرانروی ظاهری سیال حفاری دارای نشاسته طبیعی پیش از فرایند پیرسازی گرمایی بیشترین مقدار (۲۲۰ cP) را نشان داد که بیانگر تشکیل ساختار سه‌بعدی گسترده و ساختار کلونیدی قابل توجه در محیط سیال است [۹]. این رفتار را می‌توان به برهم‌کنش‌های هیدروژنی میان زنجیرهای پلی‌ساکارید نشاسته نسبت داد. پس از قرارگیری در معرض پیرسازی گرمایی، این مقدار به‌طور قابل توجهی کاهش یافته و به ۱۶۷ cP رسیده است که می‌تواند ناشی از تخریب نسبی ساختار نشاسته در اثر گرما باشد [۱۲]. در مقابل، سیال حفاری



شکل ۶- (a) گرانروی ظاهری، (b) گرانروی پلاستیک، (c) نقطه تسلیم و (d) استحکام ژل سیالات حفاری مختلف پیش و پس از پیرسازی گرمایی. Fig. 6. (a) Apparent viscosity, (b) plastic viscosity, (c) yield point, and (d) gel strength of various drilling fluids before and after hot rolling.

دارای آمیخته اصلاح شده، استحکام ژل پس از پیرسازی گرمایی به $23 \text{ lbf } 100/\text{ft}^2$ رسیده است که حاکی از ساختار پایدار، مقاومت در برابر دما و برهم کنش بین مولکولی مؤثر میان نشاسته و SPAM دارد. در نتیجه، سیال DF-Blend-M به دلیل بهبود پایداری در ویژگی‌های رئولوژیکی مانند گرانروی و نقطه تسلیم انتخاب مناسبی برای استفاده در سیال حفاری با کارایی پایدار در شرایط دمایی و فشار زیاد است. به منظور ارزیابی کارایی سیالات حفاری در کنترل اتلاف مایع سیال و تشکیل کیک فیلتر یکنواخت، دو عامل مهم شامل ضخامت کیک گل و مقدار اتلاف سیال بررسی شدند. این دو عامل در تعیین قابلیت سیال در گرفتگی منذهای سازند، کاهش نفوذپذیری ناحیه مجاور چاه و جلوگیری از کاهش فشار حین عملیات حفاری اهمیت دارد. داده‌های مرتبط برای نمونه‌های مختلف در جدول ۲ آمده است. سیال دارای نشاسته طبیعی ضخیم‌ترین کیک گل را پیش از پیرسازی گرمایی

پس از پیرسازی گرمایی، نقطه تسلیم DF-Starch-N از مقدار زیاد اولیه $370 \text{ lbf } 100/\text{ft}^2$ به $129 \text{ lbf } 100/\text{ft}^2$ کاهش یافته است که این کاهش ناشی از تخریب ساختار سه‌بعدی اولیه در اثر پیرسازی گرمایی است [۱۲]. از سوی دیگر، در سیال حفاری دارای Blend-M، افزایش نقطه تسلیم از $21 \text{ lbf } 100/\text{ft}^2$ به $56 \text{ lbf } 100/\text{ft}^2$ پس از پیرسازی گرمایی بیانگر افزایش قابلیت شبکه سیال در حفظ ذرات جامد و مقابله با ته‌نشینی است که نقش اساسی در کارایی بهینه سیال حفاری ایفا می‌کند.

در سیال حفاری دارای نشاسته طبیعی، استحکام ژل اولیه پیش از گرمادهی زیاد بوده اما پس از پیرسازی گرمایی دچار افت شدید شده است. این رفتار احتمالاً به دلیل از هم پاشیدگی شبکه ژل در اثر گرماست [۱۲]. در مقابل، سیالات حفاری مخلوط‌های دارای SPAM، پایداری نسبی بیشتری از خود نشان داده‌اند. به ویژه در سیال حفاری

جدول ۲- مقادیر اتلاف سیال و ضخامت کیک گل در نمونه‌های سیال حفاری مختلف پیش (B) و پس از عملیات پیرسازی گرمایی (A).

Table 2. Fluid loss and filter cake thickness (B) before and (A) after hot rolling.

Sample	DF-Starch-N		DF-Starch-M		DF-Blend-N		DF-Blend-M	
	A	B	A	B	A	B	A	B
FL (mL/30min)	0.8±0.1	>100	2.8±0.3	>100	3±0.2	7.2±0.3	2.2±0.1	9.8±0.5
Filter cake Thickness (mm)	2.5±0.2	10±0.7	2.6±0.3	5±0.1	3.6±0.6	5.1±0.2	2±0.2	3.3±0.4

SPAM به هر دو نوع نشاسته سبب شده است که مقدار اتلاف سیال به‌طور قابل توجهی کاهش یابد. این کاهش به‌دلیل افزایش انسجام ساختار سیال است که مانع نفوذپذیری زیاد می‌شود. اتلاف در سیال دارای Blend-M پس از پیرسازی گرمایی به ۲/۲ mL رسیده است. این مقدار بیانگر تشکیل کیک فیلتر نازک، یکنواخت و کم‌تخلخل در مجاورت نشاسته اصلاح‌شده و SPAM است. این موضوع بیانگر هم‌افزایی ساختاری میان دو پلیمر است به‌گونه‌ای که SPAM دارای زنجیره‌های باردار و نشاسته اصلاح‌شده، به‌صورت مکمل یکدیگر عمل کرده و با ایجاد برهم‌کنش‌های فیزیکی، انسجام ساختاری کیک را افزایش داده و تخلخل و نفوذپذیری آن را به‌طور مؤثری کاهش داده‌اند. بنابراین، وجود SPAM به‌ویژه در کنار نشاسته اصلاح‌شده، تعادل مناسبی میان پایداری ساختاری و کاهش اتلاف ایجاد کرده است. در مقابل، نشاسته به‌تنهایی (Starch-M یا Starch-N) پیش

ایجاد کرده و پس از گرمادهی به‌صورت چشم‌گیری کاهش یافته است. این کاهش ناشی از تجزیه و عدم پایداری ساختار نشاسته در دمای زیاد است [۹]. این در حالی است که سیال DF-Blend-M ضخامت کیک یکنواخت‌تر و پایداری بیشتری ایجاد کرده است که به پخش مناسب فاز جامد، برهم‌کنش مؤثر با SPAM و انسجام ساختاری بیشتر در دماهای زیاد مرتبط است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار اتلاف سیال برای DF-Starch-M و DF-Starch-N پیش از پیرسازی گرمایی زیاد بوده که نشان‌دهنده عدم تشکیل کیک فیلتر مؤثر در ساختار اولیه است. اما پس از پیرسازی گرمایی، کاهش چشمگیر برای هر دو سیال دارای نشاسته خالص و اصلاح‌شده مشاهده می‌شود. این کاهش احتمالاً ناشی از ژلاتینه‌شدن و افزایش چسبندگی ذرات نشاسته در اثر گرماست که موجب تشکیل لایه فیلتر یکنواخت‌تر می‌شود. افزودن

جدول ۳- مقایسه نتایج پژوهش حاضر با مطالعات پیشین در زمینه افزودنی‌های نشاسته‌ای سیالات حفاری.

Table 3. Comparative summary of the present formulation with previously reported starch-based drilling fluids.

Starch type	Test conditions	Fluid loss (mL/30min)	Filter cake thickness (mm)	Reference
Starch + Tea Polyphenol + Lignosulfonate, cross-linked with glutaraldehyde	120°C 16 h aging	6-7	Not reported	[12]
MBA Modified Starch	120°C 16 h aging	6-7	0.1-5	[12]
Acetylated Cassava Starch	120°C 16 h aging	10-12	6-7	[12]
Carboxymethylated Cassava Starch	120°C 16 h aging	22-23	4-5	[12]
Native Wheat Starch	120°C 16 h aging	7-8	2.2-2.3	[12]
Native Corn Starch	120°C 16 h aging	7-8	2-2.1	[12]
Native Potato Starch	120°C 16 h aging	4-5	1.2-1.3	[12]
Current Research	120°C 8 h aging	2-2.5	1.5-2	-

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد، اصلاح ساختاری نشاسته و ترکیب آن با پلی‌آکریل‌امید سولفون‌دار، اثر قابل‌توجهی بر افزایش کارایی سیالات حفاری پایه‌آبی دارد. آزمون TGA نشان داد، اصلاح شیمیایی نشاسته موجب بهبود پایداری گرمایی و ایجاد ساختارهای شبکه‌ای پایدارتر می‌شود. این ویژگی، در کنار ساختار آنیونی SPAM، به ایجاد برهم‌کنش‌های بین‌زنجیری مؤثر در سامانه پلیمری منجر شد. رفتار رئولوژیکی نمونه‌ها پیش و پس از پیرسازی گرمایی نیز نشان داد، آمیخته نشاسته و SPAM، به‌طور ویژه نشاسته اصلاح‌شده، از کاهش گران‌روی در شرایط دمایی زیاد جلوگیری کرده و موجب حفظ مشخصه‌های جریان سیال می‌شود. همچنین، ترکیب نشاسته اصلاح‌شده با SPAM به تشکیل کیک فیلتر یکنواخت، فشرده و کم‌تخلخل منجر شد که به‌وضوح در کاهش مقدار اتلاف سیال به کمتر از ۳ mL و افزایش گرفتگی مؤثر سازند نقش دارد. این رفتار را می‌توان به آثار هم‌افزایی دو پلیمر نسبت داد که افزون بر بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی سیال، پایداری آن را در برابر شرایط عملیاتی دشوار افزایش می‌دهد.

مراجع

- Gautam S., Guria C., and Rajak V., A State of the Art Review on the Performance of High-Pressure and High-Temperature Drilling Fluids: Towards Understanding the Structure-Compatibility Behavior Property Relationship of Drilling Fluid Additives, *J. Petroleum Sci. Eng.*, **213**, 110318, 2022.
- Davoodi S., Soleimani A., Ramazani S.A.A., and Fellah Jahromi A., Application of a Novel Acrylamide Copolymer Containing Highly Hydrophobic Comonomer as Filtration Control and Rheology Modifier Additive in Water-Based Drilling Mud, *J. Petroleum Sci. Eng.*, **180**, 747-755, 2019.
- Ma J., Xia B., Yu P., and Yuxiu A., Comparison of an Emulsion- and Solution-Prepared Acrylamide/AMPS Copolymer for a Fluid Loss Agent in Drilling Fluid, *ACS Omega*, **5**, 12892-12904, 2020.
- Ostovari A., Aalaie J., Bazgir S., and Sepehri S., Study of the Rheological and of Sulfonated Acrylamide Copolymer/Wheat Starch Blends in Aqueous Media, *J. Appl. Res. Chem.-Polym. Eng.*, **3**, 15-27, 2019.
- Davoodi S., Al-Shargabi M., Wood D., Rukavishnikov V., and Minaev K., Synthetic Polymers: A Review of Applications in Drilling Fluids, *Petroleum Sci.*, 2023.
- Li J., How Z., and El-Din M., Aerobic Degradation of Anionic Polyacrylamide in Oil Sands Tailings: Impact Factor, Degradation Effect, and Mechanism, *Sci. Total Environ.*, **856**, 159079, 2022.
- Li X., Jiang G., He Y., and Chen G., Novel Starch Composite Fluid Loss Additives and Their Applications in Environmentally Friendly Water-Based Drilling Fluids, *Energy Fuels*, **35**, 2506-2513, 2021.
- Rashedi Z., Mawhinney R., Gao W., Salaghi A., and Fatehi P., Crosslinked Lignin Starch Copolymer as a Sustainable and Thermally Stable Drilling Fluid Controller, *Carbohydr. Polym.*, **350**, 123044, 2024.
- Karim M., Alimi M., Sho S., and Fazeli F., Effect of Long-Chain Inulin and Modified Starch on the Physicochemical and Rheological Properties of Doogh (Iranian Yogurt Drink), *Acta Alimentaria*, **46**, 51-60, 2017.
- Mohammadi S., Alimi M., Shahidi S-A., and Shokoohi S.,

- Physicochemical and Functional Properties of Modified Amaranth Starch with Adipic Acid and Acetic Anhydride Mixture, *J. Food Sci. Technol. (Iran)*, **19**, 197-212, 2022.
11. Ouraji M., Alimi M., Motamedzadegan A., and Sho S., Faba Bean Protein in Reduced Fat/Cholesterol Mayonnaise: Extraction and Physico-Chemical Modification Process. *J. Food Sci. Technol.*, **57**, 1774-1785, 2020.
 12. Zakeri S.M., Alimi M., Shokoohi S., and Shahidi S.A., Acetylated Distarch Adipate Quinoa Starch in Tomato Ketchup: Modification Process and Functional Characteristics, *Appl. Food Res.*, **5**, 100708, 2025.
 13. Adewumi C., Joy J., Ogwuda U., and Ezebuiro V., Chemical Modification and Characterization of Starches from Soursop as Potential Water-Based Drilling Fluid Additives, *J. Petroleum Sci. Technol.*, **14**, 31-41, 2024.
 14. Okoro E., John I., John B., Sanni S., and Ogali O., Performance Evaluation of Chemically Modified Starch-Based Additives for Enhanced Water-Based Mud Formulations in High-Temperature and Salinity Drilling Operations, *Polym. Bull.*, **82**, 8115-8145, 2025.
 15. Ricky E., Mpelwa M., Wang C., Hamad B., and Xu X., Modified Corn Starch as an Environmentally Friendly Rheology Enhancer and Fluid Loss Reducer for Water-Based Drilling Mud, *SPE J.*, **27**, 1064-1080, 2022.
 16. Zhong H., Kong X., Chen S., Grady B., and Qiu Z., Preparation, Characterization and Filtration Control Properties of Crosslinked Starch Nanospheres in Water-Based Drilling Fluids, *J. Molecul. Liquids*, **325**, 115221, 2020.
 17. Ali I., Ahmad M., and Ganat T., Development of a New Formulation for Enhancing the Rheological and Filtration Characteristics of Low-Solids WBMs, *J. Petroleum Sci. Eng.*, **205**, 108921, 2021.
 18. Assi A., Potato Starch for Enhancing the Properties of the Drilling Fluids, *Iraqi J. Chem. Petroleum Eng.*, **19**, 33-40, 2018.
 19. Sulaimon A.A., Akintola S.A., Mohd Johari M.A.B., and Isehunwa S.O., Evaluation of Drilling Muds Enhanced with Modified Starch for HPHT Well Applications, *J. Petroleum Exploration and Production Technol.*, **11**, 203-218, 2021.
 20. Zhuang Y., Wang Y., and Yang H., Characterizing Digestibility of Potato Starch with Cations by SEM, X-ray, LF-NMR, FTIR, *Food Chem.*, **424**, 136396, 2023.
 21. do Rosário R.C., Pires MB, do Nascimento FdCA, Ribeiro Costa R.M., Faial KdCF, and da Costa Nunes E., Teixeira-Costa BE, Santos OVD: Novel Low-Amylose Starch from White Variety of Peach Palm (*Bactris gasipaes* Kunth) Fruit– Nutritional, Functional and Pasting Properties, *LWT*, **218**, 117531, 2025.
 22. Liu X., Yu L., Liu H., Chen L., and Li L., Thermal Decomposition of Corn Starch with Different Amylose/Amylopectin Ratios in Open and Sealed Systems, *Cereal Chemistry*, **6**, 383-385, 2009.