

# بررسی آزمایشگاهی تشدید پذیری تشکیل لجن اسیدی در انگیزش مخازن نفتی آسفالتینی

، احمد عباسی<sup>۱</sup>، محمدرضا ملایری<sup>۲\*</sup>، اسماعیل هدایتی<sup>۱</sup>، میثم محمدزاده شیرازی<sup>۱</sup>

۱- بخش مهندسی نفت، دانشکده مهندسی شیمی نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

۲- بخش مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی نفت و گاز، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

## چکیده

اسیدکاری سبب افزایش بهره‌دهی چاه‌های نفت و گاز می‌شود اما طراحی نامناسب آن باعث تشکیل رسوب لجن اسیدی و آسیب سازندی جدی می‌گردد. در این پژوهش، پارامترهای سرعت اختلاط نفت و اسید (به‌عنوان نماینده نرخ تزریق اسید به‌درون سازند)، نسبت اسید به کل سیستم (به‌عنوان نماینده حجم تزریق اسید به‌درون سازند)، دما و خصوصیات نفت خام (گرانروی، شاخص ناپایداری کلئیدی و میزان آسفالتین) بر پدیده تشکیل رسوب لجن اسیدی بررسی شده است. بدین منظور، از آزمایش سازگاری استاندارد RP-42 با اصلاحات کمک گرفته شده است. نمونه‌های نفت بر اساس روند تغییر خصوصیات شامل گرانروی، محتوی آسفالتین و شاخص ناپایداری کلئیدی انتخاب شدند تا وابستگی مقدار لجن اسیدی تشکیل شده با نوع نفت بررسی گردد. هم‌چنین، به‌منظور مطالعه دقیق‌تر تأثیر گرانروی نفت بر میزان تشکیل لجن اسیدی، تعدادی آزمایش با استفاده از نفت سنتزی انجام شد. به‌جای انحلال آسفالتین در مخلوط تولوئن و هپتان، نفت سنتزی توسط رقیق‌سازی نفت خام با تولوئن و هپتان تهیه شده است به‌طوری که شاخص ناپایداری کلئیدی ثابت باقی بماند. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که سرعت اختلاط تأثیر محسوسی دارد و با افزایش آن از ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ rpm، میزان رسوب لجن اسیدی در سه نمونه نفت خام A، B و C که از نظر گرانروی، محتوی آسفالتین و شاخص ناپایداری کلئیدی به‌ترتیب نزولی کدگذاری شده‌اند، ۲/۱، ۱/۵۸ و ۱/۴۹ برابر افزایش یافته است. این مشاهدات می‌تواند ناشی از افزایش سطح تماس قطرات اسید و نفت باشد. با تغییر نسبت حجمی اسید از ۰/۲ تا ۰/۸ در نمونه‌های A، B و C، تشکیل رسوب لجن به‌ترتیب به‌میزان ۱/۲۷، ۲/۳۷ و ۳ برابر افزایش یافته است. افزایش دما از ۳۰ تا ۸۵ °C نیز رفتار مشابهی داشته و به‌ترتیب ۲/۷، ۱/۵۷ و ۱/۸۴ برابر میزان رسوب لجن افزایش یافته است. نفت‌های مختلف، تمایل به تشکیل لجن متفاوتی را نشان دادند. نفت A در مقایسه با نفت‌های B و C به‌ترتیب، ۶/۱ و ۳۷/۷ برابر رسوب لجن بیشتری تشکیل داده است که ناشی از بیشتر بودن شاخص ناپایداری کلئیدی و مقدار آسفالتین آن بوده است. مقایسه نتایج نفت خام B و نفت سنتزی حاصل از آن نشان داد که کاهش گرانروی در نفت سنتزی سبب کاهش ۱/۶۸ برابر رسوب لجن شده است.

**واژگان کلیدی:** اسیدکاری، آسیب سازند، لجن اسیدی، سرعت اختلاط، نسبت حجمی اسید به کل سیستم، دما.

\* مسئول مکاتبات

m.mohammadzadeh@shirazu.ac.ir آدرس الکترونیکی

امروزه با توجه به افزایش نیاز به نفت و گاز به عنوان منبع اصلی تولید انرژی، افزایش تولید و بهره‌وری از میادین هیدروکربوری جهان امری ضروری است. یکی از روش‌های افزایش تولید چاه محور، انگیزش چاه به وسیله اسیدکاری می‌باشد. اسیدکاری زمانی به کار گرفته می‌شود که به دلیل وجود آسیب سازندی، میزان تولید از چاه کمتر از مقدار مورد انتظار باشد (Akbarzadeh et al., 2007; Kalfayan, 2008). طراحی نامناسب اسیدکاری منجر به از دست رفتن اثربخشی آن و القای آسیب‌های سازندی جدیدی می‌گردد. یکی از این موارد، تشکیل ناخواسته امولسیون اسید و نفت و تشکیل رسوب لجن اسیدی می‌باشد. در واقع اسید در تماس با برخی از نفت‌های آسفالتینی مسبب تشکیل لجن اسیدی شدید می‌گردد که در ادامه، کاهش نفوذ پذیری و انسداد حفره‌های درون محیط متخلخل، تغییر ترشوندگی و کاهش سرعت واکنش اسید و سنگ را به همراه دارد. این موضوع می‌تواند باعث شکست عملیات اسیدکاری گردد (AlMubarak et al., 2015; Becker, 1997; Civan, 2016). همان‌طور که گفته شد، اسیدکاری برای حذف آسیب‌های سازندی و افزایش تولید مورد استفاده قرار می‌گیرد اما در بعضی مواقع، می‌تواند سبب ایجاد آسیب‌های جدید در عملیات اسیدکاری شود (Civan, 2016; Mohammadzadeh-Shirazi et al., 2019). نظیر: تزریق سهوی ذرات جامد، استفاده از افزایش‌های ناسازگار یا روش‌های نامناسب مخلوط کردن، رسوب مجدد محصولات ناخواسته واکنش اسید و سنگ، مسدود شدن آبی<sup>۱</sup>، تشکیل امولسیون‌ها، تغییر ترشوندگی<sup>۲</sup>، از بین رفتن مقاومت تراکمی سازند نزدیک به دهانه چاه، تشکیل لجن، بسته شدن کانال‌ها با ژل شکسته نشده<sup>۳</sup> (در اسیدکاری سازند کربناته)، و مهاجرت ذرات ریز پس از عملیات. در پدیده تشکیل لجن اسیدی، پارامترهایی در هر دو فاز اسید و نفت اثرگذارند. طبق پژوهش‌های پیشین، پارامترهایی هم‌چون افزایش‌های اسیدی (Krueger, 1988; Xu, 2013)، نوع و غلظت اسید (Moore et al., 1965)، دما (Figuroa-Ortiz et al., 1996)، مدت زمان مجاورت اسید و نفت (Rietjens, 1997)، نسبت حجمی اسید به نفت و سرعت اختلاط (Mohammadzadeh-Shirazi et al., 2019)، و نیز خصوصیات نفت شامل چگالی و گرانیروی (Kharisov et al., 2012)، کشش بین سطحی اسید و نفت (Houchin & Hudson, 1986)، و میزان ترکیبات نفت می‌تواند بر تشکیل لجن اسیدی مؤثر باشد (Kudrashou & Nasr-El-Din, 2019; Rogel et al., 2001; Tokunaga & Hakuta, 2002).

لجن اسیدی، در واقع رسوب ترکیبات کلوئیدی موجود در نفت خام است که در اثر تماس با اسید و یا تغییر شرایط محیطی مانند دما و فشار ایجاد می‌گردد؛ لجن در اکثر حلال‌های شیمیایی<sup>۴</sup> نامحلول است (Moore et al., 1965). در پژوهش کلهری و همکاران، تأثیر انواع ترکیبات نفت (آسفالتین، آروماتیک و پارافین‌ها)، میزان غلظت آسفالتین و نسبت اسید به کل سیستم بررسی و مشخص شد که آسفالتین بازیگر اصلی تشکیل لجن بوده و با افزایش غلظت آسفالتین از ۵۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ ppm میزان لجن اسیدی ۱۳ درصد افزایش یافته است. هم‌چنین، افزایش نسبت اسید به کل سیستم تأثیر قابل توجهی در میزان لجن اسیدی دارد (Kalhori et al., 2022). محمدزاده و همکاران تأثیر غلظت اسید، نسبت اسید به کل سیستم (AMR<sup>۵</sup>)، نوع نفت و یون آهن را بر تشکیل لجن اسیدی بررسی کردند (Mohammadzadeh-Shirazi et al., 2019). غلظت اسید، حضور یون فریک و نسبت اسید به مخلوط به عنوان عوامل اصلی مؤثر بر مقدار لجن مشخص شدند. نتایج نشان داد که کنترل حضور یون آهن، و تنظیم و

<sup>1</sup> water blocking

<sup>2</sup> wettability

<sup>3</sup> unbroken Gel

<sup>4</sup> chemical treating

<sup>5</sup> acid to mixture volumetric ratio

انتخاب بهترین غلظت اسید و نسبت اسید به مخلوط، احتمال تشکیل امولسیون و لجن را بدون حضور افزایش‌دهنده‌های پیشگیرانه (شامل ضد لجن، ضد امولسیون و کاهنده یون آهن) به شدت کاهش می‌دهد. میر خوشحال و همکاران، توسط آزمایش تزریق به میکرومدل، تأثیر نوع و غلظت اسید را بر تشکیل لجن اسیدی و امولسیون بررسی کردند و نشان دادند که افزایش غلظت اسید زنده<sup>۱</sup> (اسیدی که هنوز با مواد دیگر تماس پیدا نکرده و واکنش نداده، پس خاصیت خوردگی و واکنش‌دهندگی خود را حفظ کرده است) از ۱۵ به ۲۸ درصد وزنی باعث ایجاد ۵/۲۷ درصد آسیب نفوذ پذیری بیشتر به دلیل پر شدن شدید منافذ<sup>۲</sup> می‌شود، و این در حالی است که اسید مصرفی<sup>۳</sup> (اسیدی که در اثر واکنش با مواد دیگر، تا حدی خنثی شده و pH آن افزایش یافته است) منجر به رسوب لجن اسیدی نمی‌شود (Mirkhoshhal et al., 2021).

تشکیل لجن به وسیله رسوب ذرات کلوئیدی موجود در نفت خام می‌باشد و سپس در بررسی آزمایشگاهی، باردار بودن ترکیب لجن اسیدی تأیید و مشخص شد که تماس اسید با نفت، بار الکتریکی طبیعی مواد کلوئیدی را برهم می‌زند و این عامل می‌تواند دلیل رسوب ذرات آسفالتین باشد (Moore et al., 1965). در تماس اسید و نفت، اسید بار منفی سطح کلوئیدها را خنثی می‌کند. این خنثی‌سازی توسط یون  $H_3O^+$  و یا به کمک یون‌های  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  که توسط اسید در هنگام عملیات منتقل می‌شود، اتفاق می‌افتد که سبب می‌شود رزین‌های پایدارکننده از آسفالتین جدا شوند (Hinojosa, 1996). ریتجنس و همکاران دریافتند هنگامی که مایسل‌های پایدار آسفالتین و رزین به وسیله تماس با اسید منقطع گردند، نتیجه آن رسوب آسفالتین به وسیله دو مکانیسم انحلال رزین‌ها و هم‌چنین، خنثی‌سازی بار آسفالتین‌ها به وسیله یون‌های پروتون ( $H^+$ ) خواهد شد (Rietjens, 1997). یون‌های آهن فریک در نقش کاتالیزگر به انتقال گونه‌های اسید به فاز نفت و تسهیل واکنش‌های مربوطه میان آن‌ها با آسفالتین و احتمالاً رزین باعث تشدید برهم‌کنش‌های اسید-باز می‌شود (Abdollahi et al., 2014).

به منظور بررسی تأثیر ترکیبات نفت بر پدیده تشکیل لجن، شاخص‌های نسبت آسفالتین به رزین (A/R) و نسبت ترکیبات اشباع به آروماتیک (S/Ar) به کار گرفته شد. تجزیه و تحلیل آماری به کمک مدل هوش مصنوعی توسعه یافته حکایت از قابلیت پیش‌بینی به میزان دقت ۹۰ درصد داشته است (Pourakaberian et al., 2021). آزمایش‌های تجربی انگیزش اسید بر روی نمونه نفت خام میدان نفتی مارون برای تعیین کمیت میزان تشکیل لجن انجام شد و پتانسیل رسوب لجن توسط پارامترهای غلظت یون آهن، افزایش‌های حلال دوگانه<sup>۴</sup>، بازدارنده خوردگی، کمکی ضد خوردگی، معلق نگه‌دارنده و مواد فعال سطحی، حساسیت سنجی شد (Abdollahi et al., 2014). نتایج نشان داد که با افزایش غلظت اسید و یون آهن، پتانسیل تشکیل لجن افزایش می‌یابد. آستانه غلظت اسید برای تشکیل لجن شدید، ۱۷ درصد برای اسید کلریدریک و نسبت ۱۲ به ۳ درصد (هیدروکلریک اسید به هیدروفلوئوریک اسید) برای اسید گل است و یون‌های آهن باعث افزایش تشکیل لجن می‌شوند. بر این اساس، آستانه تشکیل لجن ناشی از اسید برای نفت مارون در غلظت ۷۵۰۰ ppm یون آهن رخ داد و مقدار استاندارد کلیه افزایش‌های مورد استفاده در مطالعه مذکور باعث تشکیل لجن شد.

در اغلب پژوهش‌های پیشین، تأثیر غلظت اسید، یون آهن و افزایش‌های شیمیایی بر روی تشکیل رسوب لجن اسیدی بررسی شده است در حالی که اثرگذاری برخی از پارامترهای عملیاتی نظیر دما و سرعت اختلاط فازهای اسید و نفت در نسبت‌های حجمی متفاوت فازها نیاز به مطالعه بیشتری دارد. پژوهش حاضر با استفاده از نمونه‌های مختلف نفت در پی پاسخ به یک سوال اساسی است که آیا می‌توان با تنظیم پارامترهای عملیاتی (به جای استفاده از افزایش‌های شیمیایی)، تشکیل لجن اسیدی را

<sup>1</sup> live acid

<sup>2</sup> pore-bridging

<sup>3</sup> spent acid

<sup>4</sup> mutual solvent

کنترل نمود. به همین منظور در پژوهش حاضر که تمرکز بر تشکیل لجن ناشی از اسیدکاری بوده است، پارامترهای عملیاتی سرعت اختلاط نفت و اسید (به عنوان نماینده نرخ تزریق اسید به درون سازند)، و دما در نسبت‌های مختلف اسید به کل سیستم (به عنوان نماینده حجم تزریق اسید به درون سازند) مورد بررسی قرار گرفته است. از طرف دیگر، نوع نفت‌های مورد آزمایش که از چاه‌های جنوب غربی ایران نمونه برداری شده، به گونه‌ای انتخاب شده است که اثر تفاوت در گرانی، میزان آسفالتین و ناپایداری آن در نفت بر روی میزان تشکیل لجن اسیدی مشهود باشد. هم‌چنین، به منظور بررسی بیشتر اثرگذاری گرانی نفت بر میزان تشکیل لجن اسیدی، آزمایش‌های شاخصی با استفاده از نفت سنتزی حاصل از رقیق‌سازی نفت خام با تولوئن و هپتان با حفظ شاخص ناپایداری کلوئیدی نفت انجام شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- مواد

در این پژوهش، از سه نمونه نفت خام مربوط به میادین جنوب غربی ایران استفاده شده که خصوصیات آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است. انتخاب این نمونه‌ها بر اساس تفاوت در گرانی، مقدار آسفالتین موجود در نفت و شاخص ناپایداری کلوئیدی<sup>۱</sup> انجام گرفته است. متناسب با اسید کاری سازندهای کربناته، از محلول هیدروکلریک اسید (HCl) ۱۵ درصد وزنی، تهیه شده از طریق رقیق کردن محلول فوق خالص HCl ۳۷ درصد وزنی (دکتر مجللی)، استفاده شده است. هم‌چنین، برای آماده‌سازی نفت سنتزی از تولوئن (۹۵ درصد خلوص) و هپتان (۹۹/۵ درصد خلوص) تهیه شده از شرکت کیمیا اکسیر استفاده شده است.

جدول ۱ - خصوصیات نفت‌های مورد مطالعه

| خصوصیات                   | نفت A | نفت B | نفت C |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| چگالی (درجه API)          | ۲۰/۳۰ | ۲۷/۸۶ | ۳۰/۰۶ |
| ترکیبات اشباع (% جرمی)    | ۴۷/۵  | ۴۷    | ۴۵/۵  |
| ترکیبات آروماتیک (% جرمی) | ۳۷    | ۳۸    | ۴۰/۷  |
| رزین (% جرمی)             | ۶/۵   | ۷     | ۸     |
| آسفالتین (% جرمی)         | ۸/۵   | ۷/۵   | ۵/۴   |
| گرانی (cp) در دمای ۲۵ °C  | ۱۴۰   | ۵۶    | ۱۷    |
| گرانی (cp) در دمای ۶۰ °C  | ۲۳    | ۲/۳   | ۱/۵   |

### ۲-۲- آماده سازی نفت سنتزی

۵۰ گرم هپتان و ۴۰ گرم تولوئن به ۱۰۰ گرم نفت خام B اضافه شد به گونه‌ای که شاخص ناپایداری کلوئیدی قبل و بعد از رقیق‌سازی بر اساس معادله (۱)  $1/21$  ثابت نگه داشته شد (Ashoori et al., 2017). این کار به بررسی اثر تغییر گرانی بدون تغییر در کلیت ترکیبات نفت خام کمک می‌کند. هم‌چنین، گرانی نفت سنتزی در دمای محیط و دمای ۶۰ °C (برای جلوگیری از تبخیر شدید هپتان و تولوئن و تغییر ناخواسته درصد ترکیبات آن) توسط ویسکومتر مدل DV-II PRO extra اندازه‌گیری شد

<sup>1</sup> colloidal instability index (CII)

و به ترتیب، مقادیر ۲/۵ cp و ۱/۵ cp به دست آمد که مطابق انتظار، مقدار آن نسبت به گرانیوی نفت خام اولیه کاهش محسوسی یافته است.

$$CII = \frac{\text{Saturate} + \text{Asphaltene}}{\text{Aromatic} + \text{Resin}} \quad (1)$$

### ۲-۳- نحوه انجام آزمایش اندازه‌گیری تشکیل لجن اسیدی

برای بررسی میزان رسوب لجن تشکیل شده، آزمایش‌های سازگاری اسید و نفت خام بر مبنای استاندارد (API RP-42) به همراه برخی اصلاحات (Mohammadzadeh-Shirazi et al., 2019) طراحی و انجام شد. ابتدا حجم معین (بر اساس طراحی آزمایش) از اسید و نفت درون ظروف شیشه‌ای جداگانه ریخته و توسط آون با دمای ۸۵ °C پیش گرمایش انجام شد. سپس اسید به ظرف حاوی نفت افزوده شد و با استفاده از همزن مکانیکی مجهز به تیغه شیشه‌ای به مدت ۳۰ ثانیه با سرعت اختلاط مشخص (بر اساس طراحی آزمایش) مخلوط گردید. پس از آن، نمونه مورد نظر به مدت دو ساعت تحت دمای ۸۵ °C درون آون قرار گرفت. از توری برای جداسازی لجن تشکیل شده استفاده گردید. پس از سپری شدن زمان ماند دو ساعته مخلوط اسید و نفت، این مواد بر روی توری استیل ضد زنگ با اندازه حفرات ۱۰۰ میکرون تخلیه شدند. مواد باقی‌مانده روی توری توسط گازوئیل و آب گرم شست و شو داده شدند تا امولسیون و مواد پارافینی همراه لجن حذف گردند و صرفاً لجن اسیدی باقی بماند. توری به مدت ۲۴ ساعت درون آون قرار گرفت تا لجن کاملاً خشک شود. در پایان، توری همراه با لجن خشک شده توزین شد و با محاسبه اختلاف جرم توری خالی با توری حاوی لجن، جرم رسوب لجن تشکیل شده مشخص گردید. در شکل ۱ شمای کلی از روند انجام آزمایش ارائه شده است.



شکل ۱ - شماتیک مراحل انجام آزمایش

### ۳- طراحی آزمایش سازگاری اسید و نفت خام

در این پژوهش، اثر تغییر سرعت اختلاط (۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ دور در دقیقه)، نسبت حجمی اسید به کل امولسیون (بین ۰/۲ تا ۰/۸)، دما (از دمای محیط تا ۸۵ °C)، نوع نفت (بر اساس گرانیوی در مقادیر ۱۷، ۵۶ و ۱۴۰ سانتی‌پویز) بررسی شده است. سه فاکتور نسبت اسید به کل سیستم، سرعت اختلاط و نوع نفت در سه سطح و دما در چهار سطح مورد بررسی قرار گرفته شده است. در طراحی آزمایش، آزمون مینا در شرایط نسبت اسید به کل سیستم ۰/۵، دمای ۸۵ °C و سرعت اختلاط ۱۵۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. شرایط آزمایش‌های طراحی شده به‌طور خلاصه در جدول ۲ ارائه گردیده است.

جدول ۲ - طراحی آزمایش‌های سازگاری و بررسی تمایل نفت خام به میزان تشکیل رسوب لجن

| شماره تست | نسبت اسید به کل سیستم | سرعت اختلاط (rpm) | دما (°C) |
|-----------|-----------------------|-------------------|----------|
| ۱         | ۰/۲                   | ۱۵۰۰              | ۸۵       |
| ۲         | ۰/۵                   | ۱۵۰۰              | ۸۵       |
| ۳         | ۰/۸                   | ۱۵۰۰              | ۸۵       |
| ۴         | ۰/۵                   | ۵۰۰               | ۸۵       |
| ۵         | ۰/۵                   | ۱۰۰۰              | ۸۵       |
| ۶         | ۰/۵                   | ۱۵۰۰              | ۸۵       |
| ۷         | ۰/۵                   | ۱۵۰۰              | ۳۰       |
| ۸         | ۰/۵                   | ۱۵۰۰              | ۵۰       |
| ۹         | ۰/۵                   | ۱۵۰۰              | ۷۰       |
| ۱۰        | ۰/۵                   | ۱۵۰۰              | ۸۵       |

#### ۴- طراحی آزمایش سازگاری اسید و نفت سنتزی

طراحی آزمایش‌های نفت سنتزی با هدف بررسی تأثیر تک پارامتر گرانی (به تنهایی) از میان دیگر خصوصیات نفت انجام شده است. در واقع با ثابت نگه‌داشتن پارامتر ماهیت پایداری نفت (مقادیر تولوئن و هپتان بر اساس CII نفت تعیین شده)، تنها اثر پارامتر گرانی سنجدیده می‌شود. آزمایش‌های مربوط به نفت سنتزی در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳ - آزمایش‌های بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی تشکیل لجن ناشی از تماس اسید و نفت سنتزی

| شماره آزمایش | نسبت اسید به کل سیستم | سرعت اختلاط (rpm) | دما (°C) |
|--------------|-----------------------|-------------------|----------|
| ۱            | ۰/۲                   | ۱۵۰۰              | ۶۰       |
| ۲            | ۰/۵                   | ۱۵۰۰              | ۶۰       |
| ۳            | ۰/۸                   | ۱۵۰۰              | ۶۰       |
| ۴            | ۰/۵                   | ۵۰۰               | ۶۰       |
| ۵            | ۰/۵                   | ۱۰۰۰              | ۶۰       |
| ۶            | ۰/۵                   | ۱۵۰۰              | ۶۰       |
| ۷            | ۰/۵                   | ۱۵۰۰              | ۳۰       |
| ۸            | ۰/۵                   | ۱۵۰۰              | ۶۰       |

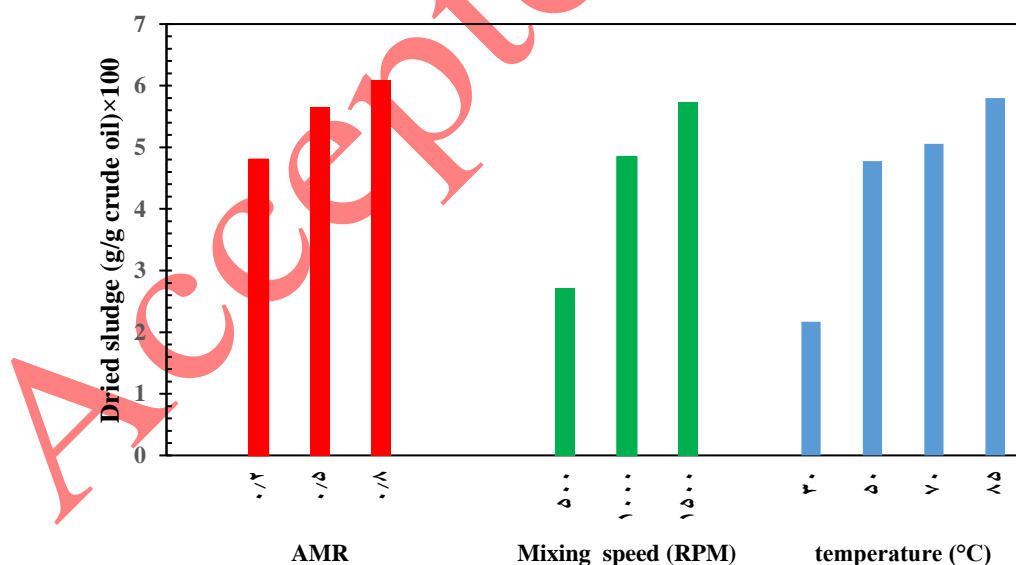
#### ۵- نتایج

##### ۵-۱- بررسی تمایل نفت خام به تشکیل لجن اسیدی

یکی از پارامترهای آزمایش استاندارد سازگاری اسید و نفت، سرعت اختلاط آن‌ها می‌باشد. در عملیات اسیدکاری، این پارامتر معادل نرخ تزریق اسید به درون مخزن نفتی و معادل سازی تنش برشی هنگام تماس و اختلاط دو سیال است. هم‌چنین، نسبت اسید به کل سیستم (AMR) نیز به‌عنوان پارامتر مهم دیگر آزمایش سازگاری، توسط تغییر حجم اسید تزریقی و هم‌چنین،

استفاده و یا عدم استفاده از سیال پیش تزریق، قابل تغییر است. در ادامه، اثر هر یک از پارامترهای اشاره شده، و نیز دمای مخزن بر میزان تشکیل لجن اسیدی بررسی شده است.

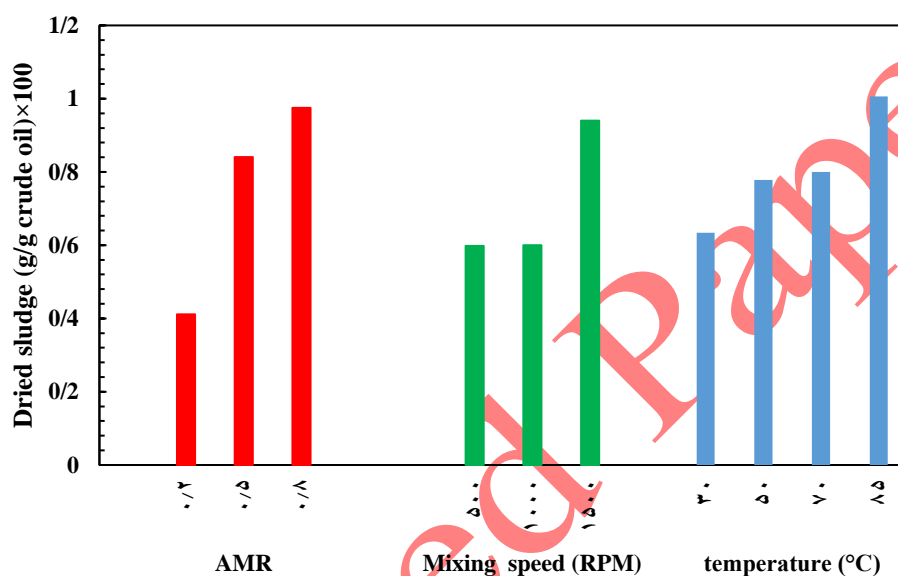
در شکل ۲، تأثیر پارامترهای سرعت اختلاط، نسبت اسید به کل سیستم و دما در نمونه نفت خام A بر میزان رسوب لجن اسیدی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت اختلاط از ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ rpm، میزان رسوب لجن اسیدی ۲/۱ برابر افزایش یافته است که تأیید می‌کند سرعت اختلاط، پارامتر تأثیرگذاری بر تشکیل لجن است. مطابق مکانیسم ذکر شده در پیشینه (Abbasi & Malayeri, 2022)، علت این موضوع می‌تواند تشکیل امولسیون با قطرات کوچک‌تر ناشی از افزایش تنش برشی و اعمال انرژی بیشتر در مرحله امولسیون‌سازی باشد که متعاقب آن، سطح تماس قطرات اسید و نفت و میزان تشکیل رسوب افزایش یافته است. از سوی دیگر، با افزایش دما از ۳۰ تا ۸۵ °C، میزان رسوب لجن ۲/۷ برابر افزایش یافته است که این موضوع می‌تواند ناشی از افزایش تمایل یون‌های هیدرونیوم اسید به واکنش با حلقه‌های پیریدین و پیرول (بخش بازی آسفالتین‌های نفت خام) در دماهای بالاتر باشد. البته باید در نظر داشت که به‌طور عمده، سرعت واکنش‌ها با دما افزایش می‌یابد و از طرف دیگر در پژوهش حاضر، افزایش دما منجر به کاهش قابل‌توجه گرانیوی نفت و اختلاط بهتر آن با اسید می‌گردد. مقادیر گرانیوی در دماهای محیط و ۶۰ °C در جدول ۱ گزارش شده است که تأیید کننده همین موضوع می‌باشد. هم‌چنین، با تغییر نسبت اسید به کل سیستم از ۰/۲ تا ۰/۸، تشکیل رسوب به‌میزان ۱/۲۷ برابر افزایش یافته است. از آنجایی که لجن اسیدی در سطح تماس اسید و نفت تشکیل می‌شود، پس میزان سطح مشترک و دیگر خصوصیات سطح می‌تواند بر تشکیل آن اثرگذار باشد. به‌همین دلیل، با افزایش AMR، میزان رسوب بیشتری شکل می‌گیرد. دلیل دیگر می‌تواند ناشی از افزایش انتقال فازی اسید در فاز هیدروکربنی و تشکیل لجن باشد. (Bancroft, 2002; Mohammadzadeh-Shirazi et al., 2019; Ruckenstein, 1996);



شکل ۲ - تأثیر پارامترهای مورد مطالعه بر میزان رسوب لجن اسیدی در آزمایش سازگاری اسید و نفت خام A

در شکل ۳، میزان رسوب لجن ناشی از تغییر پارامترهای مختلف در نفت B نشان داده شده است. در سرعت‌های اختلاط ۵۰۰ و ۱۰۰۰ rpm تفاوتی در میزان تشکیل لجن دیده نشد اما مطابق انتظار، با افزایش سرعت اختلاط تا ۱۵۰۰ rpm، میزان

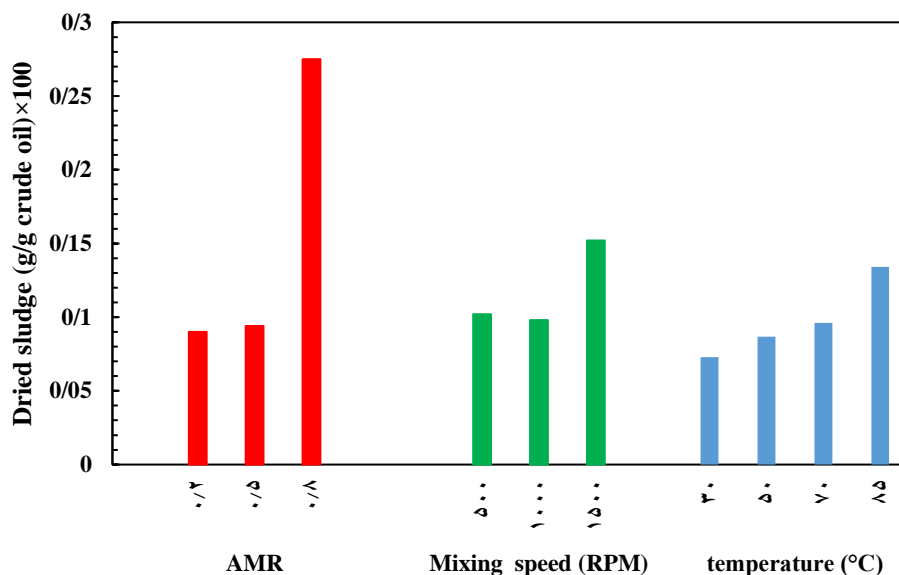
رسوب لجن ۱/۵۸ برابر شده است. از آن جا که تنش یا سرعت اختلاط به طور مستقیم بر رفتار رئولوژی این پدیده اثر می گذارد، می توان گرانروی نسبتاً کم تر نمونه B را در مقایسه با نمونه A به عنوان علت تشکیل لجن یکسان در این دو سرعت اختلاط مطرح نمود اما در سرعت ۱۵۰۰ rpm، انرژی بالاتر و قابل توجهی اعمال شده و تشکیل لجن را ارتقا داده است. با افزایش دما از ۳۰ تا ۸۵ °C، میزان رسوب لجن ۱/۵۷ برابر شده که رفتاری مشابه با نمونه A است. هم چنین، میزان رسوب با افزایش AMR به شدت افزایش یافته و به میزان ۲/۳۷ برابر رسیده است و مکانیسم مطرح شده برای نمونه A در این حالت نیز کاربردی است.



شکل ۳ - تأثیر پارامترها بر میزان رسوب لجن اسیدی در آزمایش سازگاری اسید و نفت خام B

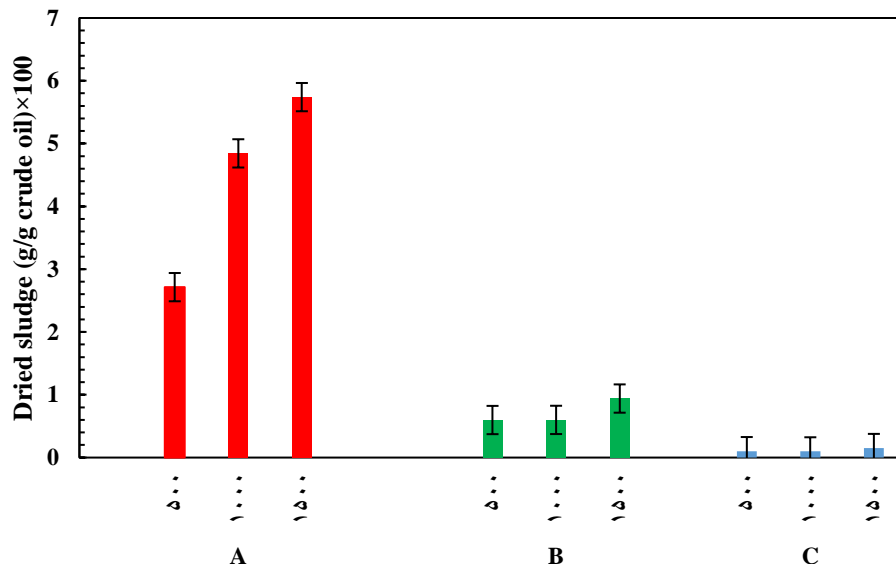
در بین پارامترهای مورد بررسی برای نمونه نفت C، همان طور که در شکل ۴ مشخص است، افزایش AMR به شدت بر میزان رسوب لجن تأثیر گذار بوده است به طوری که با افزایش آن از ۰/۲ تا ۰/۸، میزان لجن بیش از ۳ برابر شده است. هم چنین، با افزایش سرعت اختلاط و دما، به ترتیب میزان لجن ۱/۴۹ و ۱/۸۹ برابر شده است. اما به طور کلی، با توجه به این که درصد لجن تشکیل شده در نمونه C در غالب موارد کمتر از ۰/۱۵ درصد است، این نفت تمایل چندانی به تشکیل لجن نداشته است. با در نظر گرفتن خواص گزارش شده در جدول ۱ برای نمونه های نفت مورد مطالعه، می توان علت تمایل ناچیز نمونه C را به تشکیل لجن اسیدی به مقدار محتوی کمتر آسفالتین، بیشتر بودن نسبت رزین (به عنوان پایدار کننده آسفالتین در نفت) به آسفالتین، و مقدار بیشتر آروماتیک (به عنوان حلال آسفالتین) در این نمونه نسبت به نمونه های A و B ارتباط داد.





شکل ۴ - تأثیر پارامترها بر میزان رسوب لجن اسیدی در آزمایش سازگاری اسید و نفت C

در شکل ۵، تأثیر سه نوع نفت مورد مطالعه به صورت مقایسه‌ای بر میزان رسوب لجن در سرعت‌های اختلاط متفاوت بررسی شده است. در سرعت اختلاط ۱۵۰۰ rpm، نمونه A در مقایسه با نمونه‌های B و C به ترتیب ۶/۱ و ۳۷/۷ برابر رسوب لجن بیشتری تشکیل داده است. این موضوع ناشی از نوع ترکیبات و خصوصیات نفت است. هرچه میزان آسفالتین (یکی از پارامترهای اساسی در شدت تشکیل لجن اسیدی) در نفت خام بیشتر باشد، تشکیل لجن اسیدی شدت می‌یابد. به علاوه، نفت دارای آسفالتین با شاخص ناپایداری کلوییدی بیش از حدود ۰/۹ تا ۱ به سمت ناپایداری میل می‌کند و شرایط برای تشکیل لجن اسیدی مساعدتر می‌گردد. داده‌های شکل ۵ نشان می‌دهد که در نفت A با گرانیوی بالاتر و شاخص ناپایداری کلوییدی (CII) بیشتر، لجن بیشتری تشکیل شده است (Kharisov et al., 2012)، در حالی که در نفت C با کمترین میزان گرانیوی و CII، کمترین میزان لجن تشکیل شده است. نظر به این که پارامترهای متعددی در خصوصیات نفت خام مؤثر می‌باشند، نتیجه‌گیری دقیق و عمومی‌تر نیازمند بررسی نمونه نفت‌های بیشتر با دامنه خواص گسترده‌تری است. تصاویر لجن تشکیل شده برای سه نمونه نفت خام در شکل ۶ ارائه شده است که نشان‌دهنده شدت تأثیرپذیری تشکیل لجن اسیدی از خصوصیات نفت است..



شکل ۵ - تأثیر نوع نفت بر میزان رسوب لجن اسیدی در سرعت‌های اختلاط ۵۰۰ rpm تا ۱۵۰۰ rpm

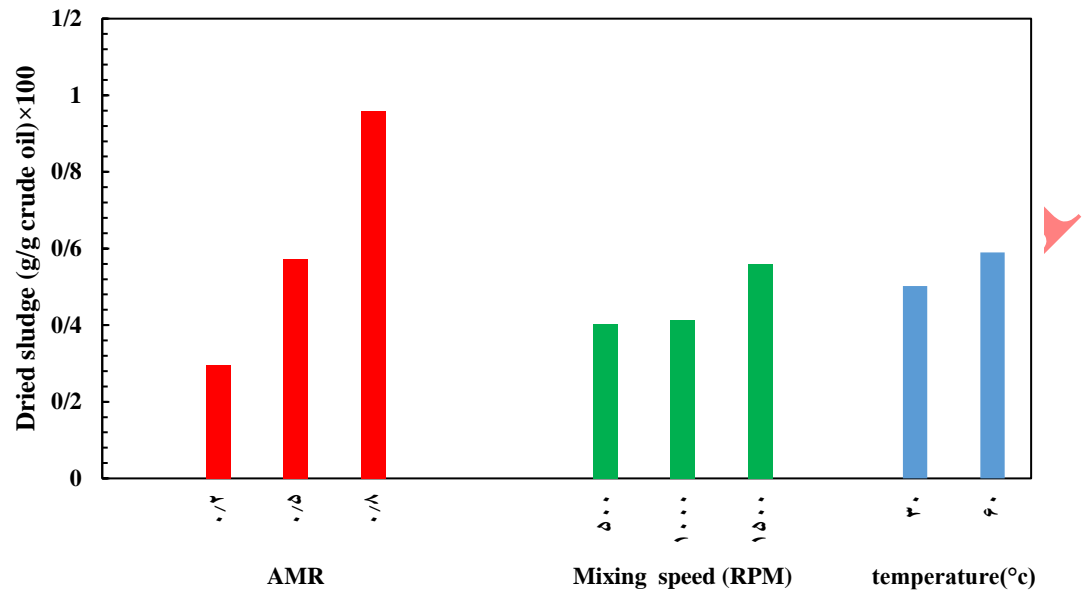


شکل ۶ - تصویر لجن تشکیل شده در سه نمونه A، B و C در سرعت اختلاط ۱۵۰۰ rpm و دمای ۸۵ °C

#### ۵-۲- بررسی تمایل نفت سنتزی به تشکیل لجن اسیدی

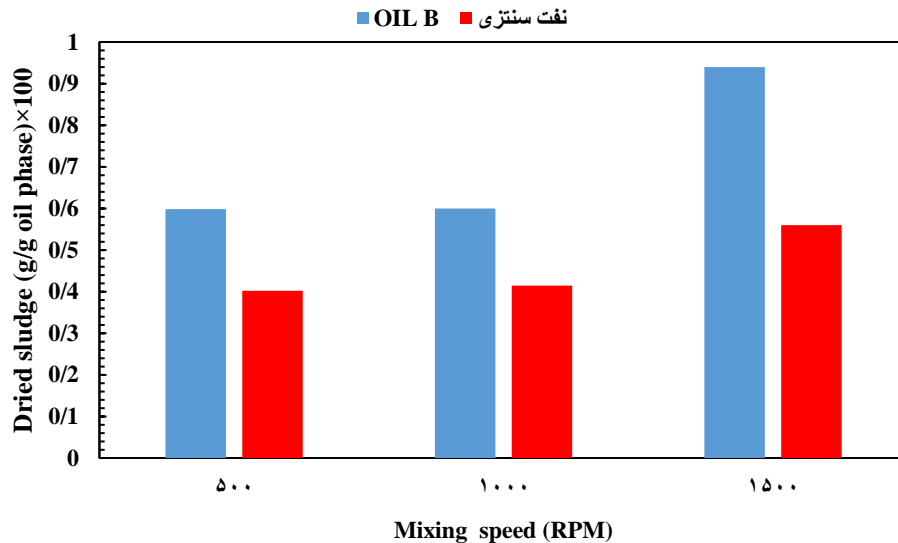
تأثیر پارامترهای مختلف بر میزان لجن در اثر تماس نفت سنتزی با محلول هیدروکلریک اسید در شکل ۷ نشان داده شده است. همانند رفتار مشاهده شده در مورد نفت خام B، در نفت سنتزی (که از رقیق‌سازی نمونه B با نسبت‌های مشخصی از تولوئن و هپتان تهیه شده است) نیز با افزایش AMR از ۰/۲ تا ۰/۸، میزان افزایش تشکیل لجن نیز تا ۳/۲ برابر بوده است. همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز توضیح داده شده است، علت این شدت بیشتر تشکیل لجن به افزایش یافتن انتقال یون‌های اسید به فاز هیدروکربنی در نسبت‌های بالاتر AMR ارتباط دارد. هم‌چنین، افزایش سرعت اختلاط از ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ rpm، و دما (از ۳۰ تا ۶۰ °C) نیز به ترتیب، باعث تشکیل ۱/۴ و ۱/۲ برابر رسوب لجن اسیدی شده است. این تغییرات نسبت به میزان افزایش لجن تشکیل شده برای نمونه نفت B در شرایط مشابه آزمایشگاهی، با توجه به یکسان بودن نوع آسفالتین و رقیق‌سازی نفت با ثابت نگه داشتن شاخص ناپایداری آسفالتین در نفت سنتزی، به گرانی ارتباط می‌یابد. به بیان بهتر، نفت سنتزی به مراتب گرانی کمتری نسبت به نفت خام اولیه دارد، پس با افزایش شدت اختلاط، تغییر شدید مقاومت فاز هیدروکربنی در برابر تغییر شکل و درهم آمیخته شدن فازها رخ نمی‌دهد. به‌شيوه مشابه، افزایش دما منجر به کاهش چشم‌گیر گرانی نفت سنتزی همانند نفت خام (از ۵۶ سانتی‌پویز در دمای ۲۵ °C به ۲/۳ سانتی‌پویز در دمای ۶۰ °C بر اساس داده‌های جدول ۱) نمی‌شود و می‌توان

ارتقای ناچیز مقدار لجن تشکیل شده در نفت سنتزی را فقط به افزایش تحرکات مولکولی در سیستم و افزایش نسبی سرعت واکنش‌های درگیر در تشکیل لجن اسیدی ارتباط داد.



شکل ۷ - تأثیر پارامترهای پژوهش بر میزان رسوب لجن اسیدی در آزمایش سازگاری اسید و نفت سنتزی

استفاده از نفت سنتزی این امکان را فراهم آورد تا بتوان تأثیر تغییر پارامتر گرانیوی فاز نفتی را بر پدیده تشکیل لجن اسیدی با حفظ نوع آسفالتین و شرایط پایداری آن در توده فاز نفتی بررسی نمود. در دو نمونه نفت (خام و سنتزی)، CII ثابت تنظیم شد و تفاوت اصلی، گرانیوی کمتر نفت سنتزی نسبت به نفت اولیه بود. در شکل ۸ میزان رسوب لجن ناشی از اختلاط نفت سنتزی و نفت خام B مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان لجن در نفت سنتزی در همه سرعت‌های اختلاط نسبت به نفت B پایین‌تر می‌باشد. با این‌که در اثر رقیق‌سازی نفت خام با تولوئن و هپتان، غلظت آسفالتین در نفت سنتزی کاهش یافته است، اما باید توجه کرد که از طرفی، نسبت رزین به آسفالتین و CII ثابت نگه داشته شده است، و از طرف دیگر، ارزیابی لجن بر اساس مقدار بدون بعد لجن (درصد نسبت جرم لجن خشک شده به جرم فاز نفتی اولیه) انجام گرفته است. نکته قابل توجه در شکل ۸، تغییرات کمتر و وابستگی ضعیف‌تر مقدار لجن اسیدی به شدت اختلاط برای نفت سنتزی نسبت به نفت خام است.



شکل ۸ - نمودار مقایسه سرعت اختلاط بر میزان رسوب لجن میان نفت سنتزی و نفت B

## ۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

تنظیم پارامترهای عملیات اسیدکاری (نظیر نرخ و حجم تزریق اسید) می‌تواند تا حد مناسبی در کاهش تشکیل رسوب ناخواسته لجن اسیدی مؤثر باشند. همچنین، خصوصیات نفت و دمای مخزن بر این پدیده به‌صورت جدی تأثیر گذار هستند. در این پژوهش، با انتخاب نمونه‌های نفت بر اساس روند مقادیر گرانروی، محتوی آسفالتین و شاخص ناپایداری کلوئیدی، وابستگی مقدار لجن اسیدی تشکیل شده با نوع نفت بررسی گردید. به‌علاوه، در مطالعه تأثیر گرانروی نفت بر تشکیل لجن اسیدی، از نفت سنتزی حاصل از نفت خام رقیق شده با تولوئن و هپتان به‌جای انحلال آسفالتین در مخلوط تولوئن و هپتان استفاده شده است به‌طوری که شاخص ناپایداری کلوئیدی ثابت باقی بماند. نتایج به‌دست آمده را می‌توان به‌صورت زیر به اختصار بیان نمود:

۱- افزایش سرعت اختلاط در محدوده ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ rpm، سبب افزایش ۲/۱، ۱/۵۸ و ۱/۴۹ برابری تشکیل لجن اسیدی در نمونه‌های A، B و C، شده است. در حقیقت، با افزایش سرعت اختلاط، سطح تماس قطرات امولسیون اسید و نفت افزایش یافته و تشکیل لجن تشدید شده است. بنابراین به‌طور عمومی، کاهش سرعت تزریق اسید در شرایط عملیاتی، ریسک آسیب‌سازندی ناشی از تشکیل لجن را کاهش می‌دهد.

۲- با تغییر نسبت اسید به نفت (AMR) از ۰/۲ تا ۰/۸، تشکیل رسوب لجن به‌ترتیب به‌میزان ۱/۲۷، ۲/۳۷ و ۳ برابر افزایش یافته است. این موضوع می‌تواند به‌دلیل شرایط مساعدتر تشکیل لجن در سطح مشترک اسید-نفت باشد زیرا در نسبت بالاتر اسید به نفت، انتقال فازی یون‌های اسید در فاز نفتی شدت می‌یابد.

۳- افزایش دما از ۳۰ تا ۸۵ °C نیز به‌ترتیب، ۲/۷، ۱/۵۷ و ۱/۸۴ برابر میزان رسوب لجن را برای سه نمونه نفت خام افزایش داده است. بنابراین مخازن با دمای بالاتر، ریسک تشکیل لجن بیشتری دارند.

۴- خصوصیات نفت شامل مقدار آسفالتین و شاخص CII و میزان گرانروی بر تمایل به تشکیل لجن مؤثرند. نفت A در مقایسه با نفت‌های B و C به‌ترتیب، ۶/۱ و ۳۷/۷ برابر لجن بیشتری تشکیل داده است. ماهیت نفت A با گرانروی بالاتر، و همچنین

شاخص ناپایداری کلئیدی (CII) و مقدار آسفالتین بیشتر، لجن بیشتری تشکیل داده است و در نفت C که دارای کمترین میزان گرانی و CII و مقدار آسفالتین می‌باشد، کمترین لجن تشکیل شده است.

۵- بررسی پارامتر گرانی فاز هیدروکربنی به‌تنهایی توسط انجام آزمایش بر روی نفت خام B و نفت سنتزی حاصل از آن، نشان داد که کاهش گرانی در نفت سنتزی نسبت به نفت خام، سبب کاهش ۱/۶۸ برابر میزان رسوب لجن شده است و حساسیت و شدت یافتن تشکیل لجن اسیدی را نسبت به تغییرات شرایط عملیاتی کاهش می‌دهد.

۶- تأثیر پارامترهای عملیاتی در آزمایش‌های سازگاری بر روی نفت سنتزی نشان داد که با افزایش ۴ برابری AMR، میزان لجن ۳/۲ برابر افزایش یافته است. همچنین، افزایش سرعت اختلاط به‌میزان ۱۰۰۰ rpm و دما به‌میزان ۳۰ °C در نفت سنتزی به‌ترتیب، ۱/۴ و ۱/۲ برابر بر میزان افزایش تشکیل لجن تأثیرگذار بوده است.

## منابع

- Abbasi, A., & Malayeri, M. R. (2022). Stability of acid in crude oil emulsion based on interaction energies during well stimulation using HCl acid. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 212, 110317.
- Abdollahi, R., Shadizadeh, S., & Zargar, G. (2014). Experimental investigation of acid-induced sludge precipitation: using acid additives in Iran. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 36(16), 1793-1799.
- Akbarzadeh, K., Hammami, A., Kharrat, A., Zhang, D., Allenson, S., Creek, J., Kabir, S., Jamaluddin, A., Marshall, A. G., & Rodgers, R. P. (2007). Asphaltenes—problematic but rich in potential. *Oilfield review*, 19(2), 22-43.
- Almehaideb, R. A. (2004). Asphaltene precipitation and deposition in the near wellbore region: a modeling approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 42(2-4), 157-170.
- AlMubarak, T., AlKhalidi, M., AlMubarak, M., Rafie, M., Al-Ibrahim, H., & AlBokhari, N. (2015). Investigation of acid-induced emulsion and asphaltene precipitation in low permeability carbonate reservoirs. SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition,
- API, R. 42: "Laboratory Testing of Surface Active Agents for Well Stimulation, Section 1: Emulsion Tests for Characterization of Surface Active Agents in Acid, Brine or Oil. In: Section.
- Ashoori, S., Sharifi, M., Masoumi, M., & Salehi, M. M. (2017). The relationship between SARA fractions and crude oil stability. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(1), 209-213.
- Bancroft, W. D. (2002). The theory of emulsification, V. *The Journal of Physical Chemistry*, 17(6), 501-519.
- Becker, J. (1997). *Crude oil waxes, emulsions, and asphaltenes*. Pennwell Books Tulsa, OK.
- Civan, F. (2016). *Reservoir Formation Damage: Fundamentals, Modeling, Assessment, and Mitigation*. (3 ed.). Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier.
- Figuerola-Ortiz, V., Cazares-Robles, F., & Fragachan, F. (1996). Controlling organic deposits and sludge in a severe hostile environment. SPE Formation Damage Control Symposium,
- Garrouch, A. A., Malallah, A. H., & Al-Enizy, M. (2006). An empirical model for predicting crude sludging potential caused by acidizing. SPE Annual Technical Conference and Exhibition?,
- Hinojosa, R. A. (1996). *Asphaltene damage in matrix acidizing Texas A&M University*].
- Houchin, L., & Hudson, L. (1986). The Prediction, Evaluation, and Treatment of Formation Damage Caused by Organic Deposition. SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control,
- Jacobs, I. (1989). Chemical systems for the control of asphaltene sludge during oilwell acidizing treatments. SPE International Conference on Oilfield Chemistry?,
- Kalfayan, L. (2008). *Production Enhancement with Acid Stimulation* (second ed.). Tulsa, Oklahoma: PennWell Corporation.

- Kalhari, P., Abbasi, A., Malayeri, M. R., & Shirazi, M. M. (2022). Impact of crude oil components on acid sludge formation during well acidizing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 110698.
- Kharisov, R. Y., Folomeev, A. E., Sharifullin, A. R., Bulgakova, G. T., & Telin, A. G. (2012). Integrated approach to acid treatment optimization in carbonate reservoirs. *Energy & fuels*, 26(5), 2621-2630.
- Krueger, R. F. (1988). An overview of formation damage and well productivity in oilfield operations: An update. SPE California Regional Meeting,
- Kudrashou, V. Y., & Nasr-El-Din, H. A. (2019). Formation damage and compatibility issues associated with use of corrosion inhibitors in well acidizing-A review. SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition,
- Mirkhoshhal, S. M., Mahani, H., Ayatollahi, S., & Shirazi, M. M. (2021). Pore-scale insights into sludge formation damage during acid stimulation and its underlying mechanisms. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 107679.
- Mirvakili, A., Rahimpour, M. R., & Jahanmiri, A. (2012). Effect of a cationic surfactant as a chemical destabilization of crude oil based emulsions and asphaltene stabilized. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 57(6), 1689-1699.
- Mohammadzadeh-Shirazi, M., Ayatollahi, S., & Ghotbi, C. (2019). Damage evaluation of acid-oil emulsion and asphaltic sludge formation caused by acidizing of asphaltenic oil reservoir. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 174, 880-890.
- Moore, E., Crowe, C., & Hendrickson, A. (1965). Formation, effect and prevention of asphaltene sludges during stimulation treatments. *Journal of Petroleum Technology*, 17(09), 1023-1028.
- Pourakaberian, A., Ayatollahi, S., Shirazi, M. M., Ghotbi, C., & Sisakhti, H. (2021). A systematic study of asphaltic sludge and emulsion formation damage during acidizing process: Experimental and modeling approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 207, 109073.
- Rietjens, M. (1997). Sense and non-sense about acid-induced sludge. SPE European Formation Damage Conference and Exhibition,
- Rogel, E., Leon, O., Espidel, Y., & Gonzalez, Y. (2001). Asphaltene stability in crude oils. *SPE Production & Facilities*, 16(02), 84-88.
- Ruckenstein, E. (1996). Microemulsions, macroemulsions, and the Bancroft rule. *Langmuir*, 12(26), 6351-6353.
- Tokunaga, S., & Hakuta, T. (2002). Acid washing and stabilization of an artificial arsenic-contaminated soil. *Chemosphere*, 46(1), 31-38.
- Xu, L. (2013). Weakly Emulsifying Surfactant Reduces Formation Damage and Enhances Well Productivity in Acid Stimulation. SPE Western Regional & AAPG Pacific Section Meeting 2013 Joint Technical Conference,

## **Intensification of acid-induced sludge formation during stimulation of asphaltenic oil reservoirs: an experimental study**

### **Abstract**

The acidizing process increases the productivity of oil and gas wells, but its improper design can inevitably cause the formation of acid-induced sludge as a serious formation damage. In this research, the effect of main parameters such

as crude oil-acid mixing speed (as a representative of acid injection rate), acid-crude oil mixture ratio (as a representative of acid injection volume), temperature, and crude oil characteristics (colloidal instability index and asphaltene content) were examined on sludge formation. Standard compatibility test of RP-42 with some modifications was utilized for this purpose. Three crude oil samples were chosen according to their distinct properties in terms of viscosity, asphaltene content, and colloidal instability index, to discern sludge formation dependency on the type of crude oil. These samples were named as A, B, and C, in descending order of their viscosity, asphaltene content, and colloidal instability index. Several experiments were also conducted using synthetic oil to investigate the impact of viscosity. The synthetic oil was prepared by diluting the crude oil with toluene and heptane, keeping the colloidal instability index intact, instead of dissolving asphaltene in a mixture of toluene and heptane. The results showed the noticeable effect of mixing speed, where changes from 500 to 1500 rpm led to higher amount of sludge in three crude oils of A, B, and C by 2.1, 1.58, and 1.49 times, respectively. This propensity can be attributed to higher interface area of acid and crude oil droplets under higher shear conditions. Furthermore, changing the acid mixture ratio from 0.2 to 0.8 in crude oil samples of A, B, and C, caused intense sludge formation by 1.27, 2.37, and 3 times, respectively. Changes in temperature from 30 to 85 °C produced similar behavior for sludge formation by increasing 2.7, 1.57, and 1.84 times, respectively. The crude oil samples also showed different tendencies for sludge formation. Sample A formed 6.1 and 37.7 times more sludge than B and C oils, respectively. The composition of sample A with a higher colloidal instability index and asphaltene content led to formation of more sludge. Comparing the results of crude oil B with its synthetic oil showed 1.68-fold less sludge due to the lower viscosity of its synthetic oil.

**Keywords:** Acidizing, acid mixture ratio, acid-induced sludge, formation damage, mixing speed, temperature.

Accepted Manuscript