

مروری بر روش انجام آزمایش سازگاری اسید و نفت خام به منظور پیشگیری از تشکیل امولسیون و لجن اسیدی و بازبینی آن بر اساس شرایط میدانی

محمد رضا ملایری^{۱*} احمد عباسی^۱، میثم محمدزاده شیرازی^۲

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

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

چکیده

ارزیابی آسیب سازندی احتمالی ناشی از ناسازگاری میان اسید تزریقی با نفت خام درون سازند، یکی از بررسی‌های ضروری پیش از آغاز انگیزش اسیدی است که طی آن، پایداری امولسیون اسید-نفت، مقدار لجن تشکیل شده و عملکرد افزایش‌های کنترل کننده بر اساس دستورالعمل RP-42 ارزیابی می‌شود. در آخرین دستورالعمل موجود (سال ۱۹۹۰)، به دلیل نامشخص بودن جزئیات دقیق انجام آزمایش‌ها نظیر شدت اختلاط و عدم کمی سازی داده‌ها، امکان مقایسه نتایج آزمایش‌های مختلف وجود ندارد. همچنین، صراحتاً ذکر شده است که قطعیت نتایج آن تضمین نمی‌شود و صرفاً توصیه‌هایی برای افزایش دقت آزمایش‌ها ارائه شده است. در این مقاله، ضمن تحلیل دقیق دستورالعمل RP-42 موجود و بررسی پیشینه پژوهش، ابهاماتی در شرایط آزمایشگاهی هم‌چون اعمال نکردن دمای واقعی مخزن در مرحله تشکیل امولسیون، مبهم بودن شرایط اختلاط اسید و نفت و تنش حاصل از آن، عدم قطعیت در اندازه‌گیری لجن و شیوه شست و شوی آن شناسایی شد. بر این اساس، شیوه انجام آزمایش‌های بررسی سازگاری اسید و نفت بر اساس مطالعه منابع و مشاهدات آزمایشگاهی بازبینی شد. مهم‌ترین تغییرات لازم شامل پیش‌گرمایش فازهای اسید و نفت و ظرف اختلاط تا دمای مخزن، اختلاط با شدت مشابه با تنش تزریق سیالات به سازند، انجام یک‌باره و هم‌زمان آزمایش امولسیون و لجن، استفاده از توری‌های چند مرحله‌ای و با اندازه حفرات مختلف برای دسته‌بندی مقدار لجن، بررسی میکروسکوپی اندازه قطرات امولسیون و مقایسه آن با اندازه حفرات سازند به منظور ارزیابی احتمال گرفتگی، معرفی سیالات مناسب برای شست و شوی لجن، در نظر گرفتن اثرات مخرب یون‌های آهن و تکمیل بررسی‌ها با انجام موازی آزمایش‌های تزریق در نمونه‌های میکرومدل و مغزه بودند. دستورالعمل بازبینی شده بر اساس این تغییرات برای ارزیابی دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تر میزان تشکیل امولسیون و لجن اسیدی در آزمایشگاه به مهندسان در طراحی مؤثرتر عملیات اسیدکاری میدانی نفتی کمک می‌کند و باعث صرفه‌جویی در هزینه و منابع می‌گردد.

واژگان کلیدی: آسیب سازند، اسیدکاری، آزمایش سازگاری اسید و نفت، امولسیون، لجن اسیدی.

* مسئول مکاتبات

با گذشت زمان و بهره‌برداری از میادین نفتی، به تدریج فشار مخزن افت می‌کند، درصد ترکیبات سبک در آن کاهش می‌یابد، مسیر نفوذ و حرکت نفت در سازند به دلیل رسوب کردن مواد مختلف دچار گرفتگی می‌شود و مواردی از این دست منجر به کاهش قابل توجه تولید می‌گردد. یکی از روش‌هایی که برای برطرف نمودن این مشکل و بازیابی توان تولید به کار گرفته می‌شود، انگیزش سازند توسط تزریق اسید است. در اسیدکاری ماتریسی^۱، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روش‌ها، محلول اسید با فشاری پایین‌تر از فشار سازند تزریق می‌گردد و هدف، حل نمودن مواد موجود در سنگ است (شیخی بوجانی و همکاران، ۱۴۰۰؛ Hamberg & Samuelsson, 1974). با این کار، خلل و فرج موجود در سنگ بزرگ‌تر می‌شود و نفوذپذیری سنگ مخزن افزایش می‌یابد.

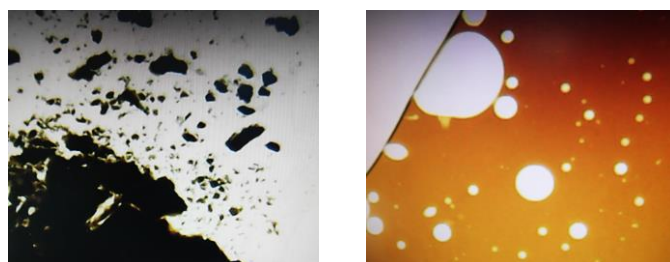
تا پیش از این، مهم‌ترین چالش عملیات اسیدکاری، معضل خوردگی تجهیزات و لوله‌ها و به‌دنبال آن، حضور یون آهن در اسید تزریقی به مخزن بود. در اولین موارد اجرای اسیدکاری در میادین ایالت اوهایو در آمریکا، با وجود موفقیت آمیز بودن عملیات، خوردگی تجهیزات ناشی از اسیدهای HCl و H₂SO₄ باعث شد که این روش کنار گذاشته شود (Coulter et al., 1987). هم‌چنین، استفاده از سولفوریک اسید منجر به تولید رسوبات نامحلول می‌شود که خود، عامل آسیب بیشتر به سازند است. نیتریک اسید نیز گازهای سمی متصاعد می‌کند که کاربرد آن را محدود می‌نماید (صیادنژاد و همکاران، ۱۳۸۶؛ زارعیان، ۱۳۹۰). در ادامه، تلاش شد با استفاده از عوامل ضد خوردگی و استفاده از اسیدهای ضعیف‌تر، کنترل بیشتری بر عملکرد اسید در حین عملیات صورت پذیرد (سنندجی و همکاران، ۱۳۹۹). هم‌چنین، سورفکتانت‌های مورد استفاده باید از تشکیل امولسیون پایدار و لجن آسفالتینی جلوگیری نمایند. استفاده از اسیدهای آلی که خوردگی کمتری نسبت به اسیدهای معدنی دارند، تا حدی شرایط را بهبود می‌دهد (Van Domelen et al., 1992). با این حال، کالتر و گوگلر (1984) بر اساس نتایج میدانی در ایلات متحده گزارش دادند که غلظت یون فریک در دهانه چاه تا حدود ۳۵۴۰ ppm می‌رسد و حتی پس از فرآیند شست و شوی لوله‌ها قبل از عملیات اصلی، ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ ppm یون فریک شناسایی شده است درحالی‌که اسید تولید شده در کارخانه نهایتاً ۵ ppm از این یون دارد. علت استفاده از افزایش‌دهنده‌های متنوع شیمیایی در اسید تزریقی، جلوگیری از مشکلات درون مخزن یا برطرف کردن آن‌ها و کنترل بیشتر عملیات است و تمایل بر آب‌دوست شدن سنگ مخزن برای تولید بهتر نفت می‌باشد (سنندجی و همکاران، ۱۳۹۹). با این حال، این مواد افزودنی در دمای بالای مخزن، خواص مطلوب خود را از دست می‌دهند و عملکردشان مختل می‌شود (Amro, 2006).

در برخی موارد، برهم‌کنش اسید با سنگ مخزن و یا بعضی از اجزای نفت با قابلیت فعالیت سطحی نظیر آسفالتین و رزین که عمدتاً دارای عناصر اکسیژن، نیتروژن و سولفور (هترو اتم^۲) در مولکول شیمیایی خود هستند، منجر به ایجاد سیستم بسیار پایداری از قطرات اسید در نفت خام، نظیر شکل ۱ (الف)، به‌صورت امولسیون اسید-نفت می‌گردد (Alves et al., 2022). در این شکل مشاهده می‌شود که حتی قطرات اسید در حال تماس، به دلیل وجود یک لایه مشترک مستحکم حتی با ضخامت کم در مرز آن‌ها، امکان به هم پیوستن وجود ندارد و به همین علت، امولسیون پایدار باقی می‌ماند. تشکیل امولسیون از تماس بیشتر اسید با سازند ممانعت می‌کند و راندمان عملیات اسیدکاری را کاهش می‌دهد. به علاوه، گرانیوی بالا و در برخی موارد، شکل نسبتاً جامد یا خمیری آن منجر به مسدود شدن مسیر متخلخل توسط قطرات به‌دام افتاده می‌شود و حتی می‌تواند منجر به توقف کامل تولید گردد (Fredd & Fogler, 1998; Greene et al., 1974; Mirkhoshhal et al., 2021; Mohammadzadeh-Shirazi et al., 2019). در موارد حادثه که برهم‌کنش یون‌های اسید با اجزای قطبی نفت و ذرات سازندی شدید است، جذب سطحی مواد مختلف نظیر کلوخه‌های آسفالتین، واکس و حتی ذرات جامد محلی بر روی

¹ matrix acidizing

² heteroatom

سطح قطرات اسید شدت می‌یابد. در این شرایط، امولسیون فیلم سختی به حالت جامد ایجاد می‌شود و همانند شکل ۱ (ب)، لجن تشکیل می‌دهد (Jacobs & Thorne, 1986; Mohammadzadeh-Shirazi et al., 2019; Moore et al., 1965).



(ب)

(الف)

شکل ۱- آسیب‌های سازندی اسیدکاری؛ (الف) امولسیون پایدار اسید-نفت، و (ب) لجن اسیدی (عباسی، ۱۴۰۱)

عدم انطباق شرایط آزمایشگاهی مطالعات امولسیون و لجن اسیدی با شرایط واقعی میدانی و ابهام در جزئیات مراحل آزمایش باعث شده است که نتایج آزمایش‌های مرتبط با ارزیابی اولیه و پیش از اجرای عملیات اسیدکاری قابل مقایسه نباشد. روش انجام آزمایش‌های سنجش احتمال تشکیل و پایداری امولسیون و لجن اسیدی تا کنون مورد توجه نبوده است و پژوهشگران بنا به ضرورت، با اعمال تغییراتی در رویکرد مرسوم RP-42³، سعی در رفع نواقص موجود در پژوهش خود نموده‌اند. در این مقاله، ضمن معرفی و تحلیل دقیق مراحل روش مرسوم اجرای این آزمایش‌ها، مرور تغییراتی که در روش کار پژوهش‌های پیشین انجام شده است و مشاهدات آزمایشگاهی مرتبط، مشکلات موجود در دستورالعمل RP-42 معرفی و راهکارهایی برای برطرف نمودن آن‌ها یا نزدیک شدن به نتایج واقع‌بینانه‌تر ارائه شده است. بر این اساس و با توجه به گذشت مدت زمان زیادی از تولید میداین و لزوم اجرای اسیدکاری به‌عنوان یک روش رایج و مؤثر برای رفع گرفتگی‌های سازند و بازیابی توان تولید، بازبینی اساسی این دستورالعمل به نیاز جدی صنعت نفت تبدیل شده است.

۲- دستورالعمل فعلی آزمایش سازگاری اسید و نفت

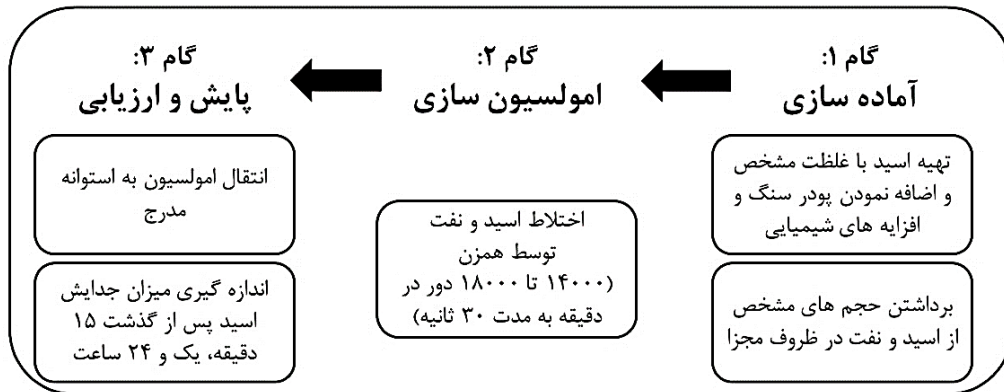
ارزیابی‌های مربوط به سازگاری اسید تزریقی و نفت موجود در مخزن به‌همراه تعیین اثربخشی استفاده از انواع افزاینده‌های شیمیایی از مدت‌ها پیش طبق دستورالعمل RP-42 انجام می‌شده است (نسخه اولیه در نوامبر ۱۹۶۲ و اصلاح شده در فوریه ۱۹۹۰) و بر اساس بازخوردهای جدید، مورد بازبینی و اصلاح قرار نگرفته است (API RP-42, 1990). هم‌چنین، در متن این سند صراحتاً ذکر شده است که قطعیتی در مورد نتایج آن تضمین نمی‌شود و تنها شامل توصیه‌هایی برای افزایش دقت آزمایش‌های مربوطه می‌باشد. این دستورالعمل به‌طور خلاصه از چهار بخش تشکیل شده است که بخش اول آن به آزمایش‌های امولسیون و لجن اختصاص دارد.

۲-۱- ارزیابی پایداری امولسیون

این بخش به مشخص کردن اثربخشی افزاینده ضد امولسیون در شکستن امولسیون از آب شور-نفت و یا اسید-نفت اختصاص دارد (که توصیه شده است حتماً در حضور افزاینده‌های شیمیایی دیگر مورد بررسی قرار گیرد) درحالی‌که تشکیل و ماندگاری امولسیون در شرایط میدانی اسیدکاری ارزیابی نمی‌شود. در شکل ۲، مراحل کلی انجام این آزمایش و بخش‌های هر مرحله به‌طور خلاصه نشان داده شده است. لازم به‌ذکر است که بررسی تشکیل امولسیون و لجن در آزمایش‌های کاملاً مجزا انجام

³ API Recommended Practice 42

می‌شود که در ادامه، به جزئیات هر یک پرداخته می‌شود.



شکل ۲ - مراحل آزمایش امولسیون در بررسی سازگاری اسید و نفت بر اساس دستورالعمل مرسوم

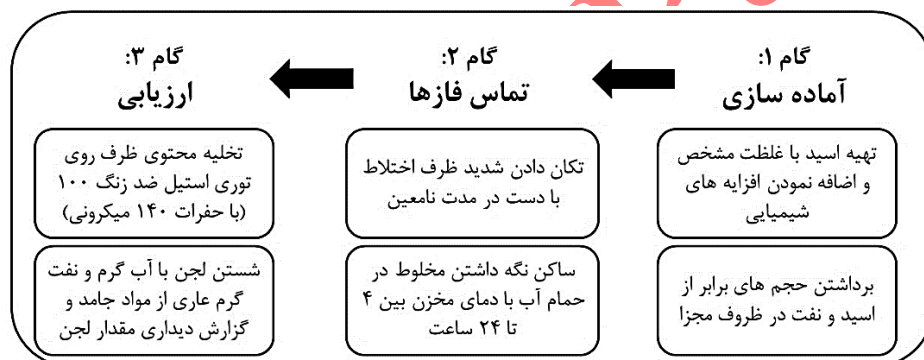
اسید زنده^۴ مرسوم جهت تماس دادن با نمونه نفت، هیدروکلریک اسید ۱۵ و در برخی مواد، ۲۸ درصد وزنی است. در مورد سازندهای ماسه سنگی، اسید مصرفی^۵ با ترکیب نمودن دو حجم از اسید گل^۶ و یک حجم ذرات جامد سازندی یا جایگزین آن و زمان تماس حداقل ۲۴ ساعت، تهیه می‌شود و افزایه‌های ضد خوردگی و سایر مواد شیمیایی مدنظر به آن افزوده می‌گردد. ذرات جامد سازندی یا مواد جایگزین آن که مخلوط پودر ذرات جامد سیلیس^۷ و بنتونیت^۸ با نسبت جرمی برابر است، در همه آزمایش‌ها به کار می‌رود. برای آزمایش‌های مربوط به سازندهای کربناته، اسید زنده از ترکیب نمودن ۵۰ میلی لیتر هیدروکلریک اسید و ۲/۵ گرم از مخلوط جامد متشکل از ۹۰ درصد جرمی سیلیس و ۱۰ درصد جرمی بنتونیت تهیه می‌شود. بقیه مراحل مشابه قبل است با این تفاوت که نسبت‌های حجمی مختلف اسید و نفت نیز مورد آزمایش قرار می‌گیرند. اسید مصرف شده در این مورد با افزودن نمک کلسیم کلراید به محلول اسید، تنظیم pH در محدوده ۱ تا ۵، و سپس افزودن ذرات جامد سازندی طبق نسبت‌های اعلام شده به دست می‌آید. لازم به توضیح است که اسید زنده پس از تماس یافتن با سنگ مخزن و انحلال بخشی از آن که یکی از اهداف اسیدکاری است، مصرف می‌شود. در حین این فرآیند، بخشی از ذرات جامد سازندی در محیط رها می‌شوند و می‌توانند در تشکیل امولسیون و لجن اسیدی مداخله نمایند. این ذرات از یک سو در تشکیل امولسیون‌های پایدار شده با ذرات جامد^۹ مشارکت دارند و از سوی دیگر، سطح آن‌ها، مستعد جذب سایر گونه‌های فعال سطحی نظیر آسفالتین و نیز مواد رسوب دهنده شامل واکس است و به‌عنوان سایت‌های اولیه تشکیل رسوبات لجن نیز ایفای نقش می‌کنند. این مکانیزم‌ها برای هر دو نوع اسید زنده و مصرف شده، و نیز در هر دو نوع محیط سازندی ماسه سنگی و کربناتی قابل وقوع است. بنابراین، برای مشابه‌سازی این پدیده در آزمایشگاه، دستورالعمل مرسوم پیشنهاد کرده است که پودر سنگ یا معادل آن با محلول اسید مخلوط گردد.

برای اختلاط فازهای اسید و نفت در این آزمایش‌ها، استفاده از هم‌زن مکانیکی Hamilton Beach مدل ۹۳۶ یا معادل آن با سرعت بالا (۱۴۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ rpm) توصیه شده است. ارزیابی امولسیون تهیه شده در حضور و غیاب ماده امولسیون - شکن با مشاهده و ثبت جدایش فازها در یک استوانه مدرج ۱۰۰ میلی لیتری (شیشه‌ای برای هیدروکلریک اسید و پلاستیکی برای اسید گل) در زمان‌های ۱۵ دقیقه، یک و ۲۴ ساعت پس از امولسیون سازی و در دمای محیط صورت می‌گیرد.

⁴ Live acid
⁵ Spent acid
⁶ Mud acid
⁷ Silica flour
⁸ Sodium bentonite
⁹ Pickering emulsions

۲-۲- ارزیابی تشکیل لجن

در این بخش نیز صراحتاً ذکر شده است که تمایل به تشکیل لجن و اثربخشی افزایه ضد لجن در شرایط عملیاتی با این روش تعیین نمی‌شود. اختلاط حجم‌های برابر از اسید و نفت در یک بطری در بسته از طریق تکان دادن شدید با دست انجام می‌شود و هم‌زن در این مرحله به کار گرفته نشده است. سپس، این مخلوط در مدت زمانی بین ۴ تا ۲۴ ساعت درون حمام آب نگهداری می‌شود. پس از آن، مخلوط بر روی یک توری استیل ضد زنگ با حفرات ۱۴۰ میکرونی (توری ۱۰۰) تخلیه می‌گردد و در صورت مشاهده مواد جامد بر روی آن، از آب داغ و نفت عاری از ذرات جامد برای شست و شوی متناوب مواد روی توری استفاده می‌شود تا امولسیون و مواد پارافینی چسبیده به لجن اسیدی، شسته و حذف شوند. سرانجام، حجم باقی مانده بر روی توری با مشاهده دیداری به صورت کیفی (عدم تشکیل لجن، کم، متوسط، زیاد)، ارزیابی و در برگه اطلاعات آزمایش ثبت می‌شود. در صورت مشاهده تشکیل لجن، همین آزمایش با افزودن عامل ضد لجن به محلول اسید، تکرار می‌گردد و اثربخشی آن در ممانعت از تشکیل لجن با حالت قبل مقایسه می‌شود. استفاده از افزایه ضد لجن ممکن است بر تشکیل امولسیون اثر داشته باشد و در این حالت، باید پایداری امولسیون نیز ارزیابی شود. مراحل این آزمایش به اختصار در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ - مراحل آزمایش لجن در بررسی سازگاری اسید و نفت بر اساس دستورالعمل مرسوم

۳- مروری بر پژوهش‌های پیشین و تغییرات صورت گرفته در روش انجام آزمایش‌ها

در این بخش به منظور درک و مقایسه دقیق‌تر تلاش‌های پیشین، تغییرات اعمال شده در رویکرد آزمایشگاهی انجام تست - های سازگاری اسید-نفت به صورت جدول ۱ به طور خلاصه گردآوری شده که یکی از مهم‌ترین منابع تهیه این اطلاعات، پژوهش انجام شده توسط پورا کابریان و همکاران (2021) بوده است. با مطالعه خلاصه پژوهش‌های پیشین در جدول ۱، می‌توان به وجود ابهامات و نواقصی در اجرای آزمایش‌های مربوطه پی برد که در ادامه به طور مختصر معرفی می‌گردد. در برخی از این پژوهش‌ها و نیز در دستورالعمل RP-42 مشخص است که ارزیابی پایداری امولسیون و لجن طی آزمایش‌های مجزا و در شرایط متفاوتی صورت گرفته است در حالی که این دو پدیده نامطلوب به صورت هم‌زمان و یا در پی یکدیگر رخ می‌دهند. موضوع لجن اسیدی بیش از امولسیون مورد بررسی و توجه بوده و مطالعات پیرامون امولسیون اسید-نفت علی‌رغم مشکلات قابل توجه، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. از آن‌جا که اسید و نفت سازندگی در دما و فشار مخزن با هم تماس می‌یابند، اختلاط آن‌ها در دما و فشار محیط باعث دور شدن نتایج از شرایط واقعی میدانی و عدم قطعیت آن‌ها می‌شود. مرحله پیش‌گرمایش به‌ویژه برای ارزیابی امولسیون در برخی از پژوهش‌های قبل و دستورالعمل مرسوم نادیده گرفته شده است. اثرگذاری دما بر پایداری سه نمونه امولسیون اسید-نفت در شکل ۴ نشان داده شده است که طبق آن، اعمال شرایط دقیق دمایی از ابتدای آزمایش بر میزان جداسازی فازهای امولسیون اسید-نفت با در نظر گرفتن خواص نفت ضروری است.

مشاهده می‌گردد که امولسیون شماره ۱ حساسیتی به دما ندارد زیرا اجزای آن تمایلی به برهم‌کنش با اسید ندارند درحالی‌که در نمونه‌های ۲ و ۳ قادرند در دماهای بالاتر، امولسیون پایدارتری تشکیل دهند و چنانچه آزمایش در دمای نزدیک مخزن انجام نشود، نتایج واقع‌بینانه‌ای حاصل نمی‌شود. هم‌چنین، اثرگذاری فشار بر پدیده‌های امولسیون و لجن اسیدی مبهم است که ضمن نادیده گرفته شدن این موضوع در بسیاری از پژوهش‌های قبل، کمبود اطلاعات در این زمینه وجود دارد. البته انجام آزمایش‌های فشار بالا نیازمند طراحی تجهیزات ویژه و پرهزینه است.

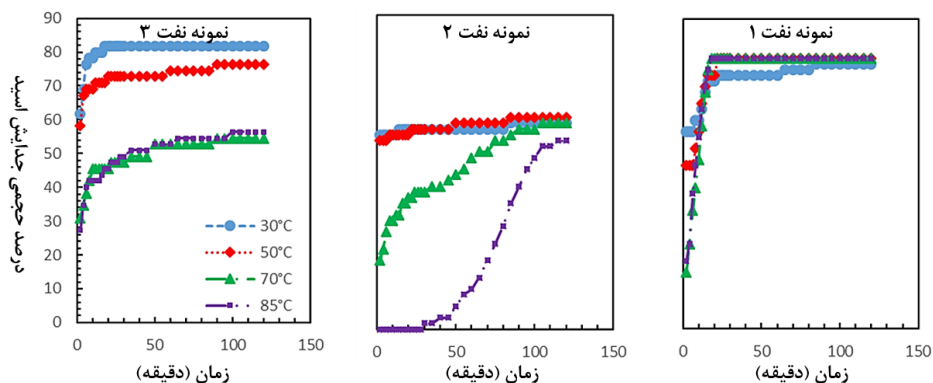
Accepted Paper

جدول ۱ - تغییرات اعمالی در آزمایش‌های ارزیابی سازگاری اسید-نفت و شرایط آن‌ها در پژوهش‌های پیشین

ردیف	مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	منبع
۱	استفاده از حجم یکسان فازهای هیدروکلریک اسید ۰/۵ تا ۱۵ درصد وزنی و نفت گرم شده در دمای °C ۶۵	مخلوط کردن فازها به مدت یک دقیقه	۴ ساعت نگهداری امولسیون در دمای بالا و خنثی‌سازی اسید با آمونیوم هیدروکسید در انتهای آزمایش؛ استفاده از سانتریفیوژ و توری ۱۰۰ برای جداسازی لجن به‌همراه مشاهده میکروسکوپی رسوبات آسفالتین در فاز نفت	(Moore et al., 1965)
۲	استفاده از افزایش ضد لجن	زمان اختلاط متغیر فازها از ۱ دقیقه تا ۴ ساعت	۴ ساعت نگهداری مخلوط در حمام آب در دمای سازند و خنثی‌سازی اسید با استفاده از آمونیوم هیدروکسید برای خاتمه واکنش؛ جداسازی لجن توسط توری ۱۰۰ و مشاهده میکروسکوپی آن؛ بررسی میکروسکوپی برهم‌کنش یک قطره اسید و نفت روی تیغه شیشه‌ای	(Crowe et al., 1966)
۳	استفاده از حجم یکسان فازهای گرم شده در دمای °C ۶۵ شامل نفت و هیدروکلریک اسید ۵ تا ۱۵ درصد وزنی	اختلاط فازها توسط مخلوط کن به مدت متغیر از ۱ تا ۶ ساعت	جداسازی لجن توسط ۱۵ دقیقه سانتریفیوژ با سرعت ۱۵۰۰ rpm و توری ۱۰۰؛ کمی‌سازی داده‌ها با تقسیم جرم لجن بر جرم آسفالتین موجود در نفت اولیه	(Lichaa & Herrera, 1975)
۴	استفاده از حجم برابر نفت خام تازه نمونه‌گیری شده بدون جداسازی ناخالصی‌ها و اسید مصرفی تهیه شده از انحلال کلسیم کربنات بدون فیلتر کردن اسید نهایی؛ گرمایش تا دمای مخزن و استفاده از افزایش‌های ضد لجن و ضد خوردگی	اختلاط فازها توسط shaker با سرعت متغیر به مدت ۲ دقیقه	۳۰ دقیقه پایش جدایش فازهای امولسیون؛ خشک کردن توری پیش از جداسازی لجن و شست و شوی آن با گازوئیل داغ	(Delorey & Taylor, 1985)
۵	استفاده از حجم برابر فازها و به کار بردن مواد ضد لجن و ضد خوردگی	اختلاط شدید فازها به مدت ۳۰ ثانیه	۳۰ دقیقه زمان ته‌نشینی در حمام آب °C ۹۰ و جداسازی لجن با توری ۲۰۰؛ شست و شوی لجن با ایزوپروپیل الکل و خشک کردن آن به مدت یک شب	(Jacobs & Thorne, 1986)
۶	استفاده از نفت تازه (۳ ساعت از زمان نمونه‌گیری) و ۴۵ دقیقه پیش گرمایش در دمای °C ۸۲		زمان ته‌نشینی ۴۵ دقیقه‌ای و جداسازی لجن توسط کاغذ صافی ۸ میکرونی	(Houchin et al., 1990)
۷	استفاده از نفت خام تازه نمونه‌گیری شده (کمتر از ۴ ساعت) و ۳۰ دقیقه نگهداری برای جدا شدن آب و امولسیون همراه؛ استفاده از یون آهن و افزایش‌های ضد لجن و ضد خوردگی	اختلاط فازها توسط تزریق اسید	بررسی هم‌زمان امولسیون و لجن به‌دلیل حضور افزایش ضد لجن که قابلیت امولسیون‌سازی نیز دارد؛ ۱۵ دقیقه زمان ماند فازها برای تعیین دقیق‌تر مقدار لجن تشکیل شده.	(Suzuki, 1993)

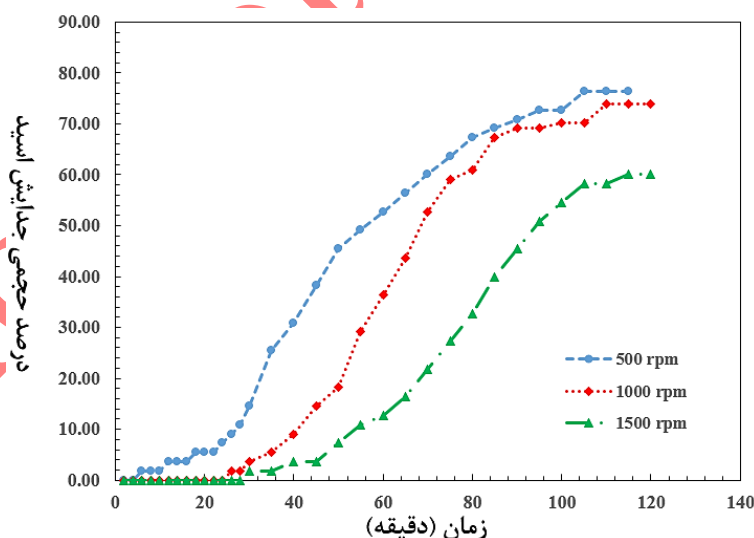
۸	استفاده از افزایش ضد لجن و کنترل کننده یون آهن	طبق روش استاندارد	زمان ته‌نشینی ۴ ساعته و استفاده از توری پلی استر ۱۰۰ (Vinson, 1996)
۹	پیش‌گرمایش تا نزدیک دمای مخزن و استفاده هم- زمان از یون‌های فروس و فریک	هم‌زدن فازها با تکان دادن دستی ظرف اختلاط به مدت ۳۰ ثانیه	۱۵ دقیقه نگهداری در حمام آب و ثبت مقدار جدایش فازها؛ ۳۰ دقیقه زمان ته‌نشینی در حمام آب و استفاده از سانتریفیوژ ۱۵۰۰ rpm به مدت ۱۵ دقیقه و توری ۱۰۰ برای جداسازی لجن؛ شست و شوی لجن با حلال‌های مختلف و مخلوط تولوئن و ایزوپروپیل الکل؛ خشک کردن لجن و تعیین جرم آن و آنالیز اجزای آن با روش‌های FTIR و SARA
۱۰	فیلتر کردن نفت برای حذف ذرات جامد و امولسیون همراه؛ استفاده از ذرات جامد سازندی و افزایش ضد لجن	طبق روش استاندارد	نگهداری مخلوط در حمام آب به مدت ۲۴ ساعت و کمی‌سازی داده‌های ارزیابی امولسیون به صورت نسبت جرمی فاز اسید جدا شده؛ استفاده از توری ۱۰۰ برای جداسازی لجن؛ شست و شوی لجن با آب داغ، gas oil و پنتان و بررسی کیفی آن؛
۱۱	فیلتر کردن نفت برای جداسازی ذرات جامد و امولسیون همراه و استفاده از اسید با غلظت‌های مختلف؛ استفاده از یون آهن و افزایش‌های متنوع		نگهداری نمونه‌ها در دمای ۸۲ °C به مدت ۴۵ دقیقه؛ استفاده از سانتریفیوژ با سرعت ۳۰۰۰ rpm به مدت یک دقیقه و توری ۸ میکرونی برای جداسازی لجن؛ شست و شوی متناوب لجن با آب داغ و Soltrol oil
۱۲	حجم برابر نفت و اسید با غلظت‌های مختلف؛ حضور افزایش ضد امولسیون و ضد لجن	اختلاط فازها با سرعت ۱۰۰۰۰ rpm	نگهداری مخلوط در دمای ۷۵ °C و پایش جدا شدن فازهای امولسیون در مدت ۳۰ دقیقه؛ استفاده از توری ۱۰۰ برای جداسازی لجن پس از ۲ ساعت (دانشوند و همکاران، ۱۳۹۴)
۱۳	استفاده از اسید با غلظت‌های مختلف و حضور یون فریک؛ پیش‌گرمایش نفت در دمای ۹۶ °C توسط حمام آب	اختلاط فازها توسط هم- زن پره‌دار با سرعت ۱۲۰۰ rpm به مدت ۶۰ ثانیه	نگهداری مخلوط در حمام آب به مدت ۲ ساعت و ثبت جدایش فازها در مدت ۲ ساعت بعدی؛ استفاده از توری ۱۰۰ برای جدا سازی لجن و شست و شوی لجن با آب داغ و نفت non-plugging خشک کردن لجن به مدت ۲۴ ساعت در آن ۱۰۰ °C و کمی‌سازی لجن به صورت حجمی و وزنی
۱۴	فیلتر کردن نفت خام برای حذف ناخالصی‌های جامد توسط توری ۲۰ و سانتریفیوژ؛ اسید با غلظت- های مختلف در حضور یون فریک	اختلاط فازها توسط هم- زن آزمایشگاهی با سرعت ۱۲۰۰ rpm به مدت یک دقیقه	خشک کردن لجن در آن و توزین آن برای کمی‌سازی نتایج (Pourakaberian et al., 2021)
۱۵	تهیه اسید مصرفی با انحلال کلسیم کربنات در HCl در حضور یون فریک	تزریق اسید به میکرومدل شیشه‌ای اشباع شده با نفت توسط	۲ ساعت زمان تماس فازها درون میکرومدل در دما و فشار محیط؛ تصویر برداری از میکرومدل با دوربین و کمی‌سازی آسیب لجن توسط مقایسه تراوایی و (Mirkhoshhal et al., 2021)

		تخلخل میکرومدل قبل و پس از تزریق؛ شست و شوی لجن با گازوئیل؛ تصویر برداری از فازهای تماس یافته روی تیغه شیشه‌ای توسط دوربین دیجیتالی	پمپ سرنگی؛ تماس فازها بدون اختلاط روی اسلاید شیشه‌ای	
۱۶	(Kalhori et al., 2022)	۲۴ ساعت زمان ماند مخلوط در دما و فشار محیط؛ استفاده از کاغذ صافی ۲/۵ میکرون برای جداسازی لجن و خشک کردن آن در آون °C ۷۰ به مدت ۵ دقیقه؛ تعیین نسبت جرمی لجن به آسفالتین اولیه	اختلاط فازها با هم‌زن پره‌دار با سرعت rpm ۱۵۰۰ به مدت ۲ دقیقه	استفاده از حلال‌های آسفالتین، پارافین‌های مختلف و دو نمونه آسفالتین برای تهیه نفت سنتزی
۱۷	(Abbasi et al., 2023a)	انجام آزمایش در فشار محیط و دمای °C ۸۵ و پایش جدایش امولسیون در مدت ۲ ساعت؛ کمی‌سازی پایداری امولسیون بر مبنای حجمی و بررسی میکروسکوپی آن؛ جداسازی لجن با توری ۱۰۰ و شست و شوی لجن با آب داغ و گازوئیل داغ؛ کمی‌سازی نتایج لجن بر مبنای جرمی	اختلاط فازها توسط هم‌زن پره‌دار با سرعت rpm ۱۵۰۰ به مدت ۳۰ ثانیه	تهیه اسید مصرفی با رقیق‌سازی HCl و انحلال کلسیم کلراید؛ استفاده از یون فریک؛ پایش گرمایش فازها در آون °C ۸۵ به مدت ۱۵ دقیقه
۱۸	(Hedayati et al., 2023)	پایش جدایش امولسیون در مدت ۲ ساعت در فشار محیط و دمای متغیر؛ کمی‌سازی پایداری امولسیون بر مبنای حجمی و تصویر برداری میکروسکوپی از امولسیون؛ جداسازی لجن با توری ۱۰۰ و شست و شوی لجن با آب داغ و گازوئیل داغ؛ کمی‌سازی نتایج لجن بر مبنای جرمی	اختلاط فازها با هم‌زن پره‌دار با سرعت بین ۵۰۰ تا rpm ۱۵۰۰ به مدت ۳۰ ثانیه	پیش گرمایش فازها در آون °C ۸۵ به مدت ۱۵ دقیقه؛ استفاده از یک نمونه نفت سنتزی با افزودن تولوئن و هپتان به نفت خام
۱۹	(Silin et al., 2023)	اندازه‌گیری جدایش فازهای امولسیون در بشر در زمان‌های ۰، ۳۰ و ۶۰ دقیقه در دمای محیط؛ سنجش پایداری امولسیون بر مبنای روش‌های ترکیبی اندازه‌گیری گرانی، کشش سطح مشترک، پایداری ولتاژ و میکروسکوپی؛	اختلاط فازها با استفاده از هم‌زن پره‌دار با سرعت rpm ۵۰۰ به مدت ۲ دقیقه	استفاده از نسبت حجمی برابر نفت خام و اسید؛
۲۰	(Daghighi-Rouchi et al., 2023)	پایش جدایش امولسیون در مدت یک ساعت در فشار و دمای محیط و کمی‌سازی پایداری امولسیون بر مبنای حجمی	اختلاط فازها توسط هم‌زن پره‌دار با سرعت rpm ۱۵۰۰ به مدت ۳۰ ثانیه	استفاده از نسبت حجمی برابر نفت سنتزی حاوی آسفالتین در هپتول و سیستم‌های اسیدی مختلف شامل HCl، استیک اسید، اسیدهای هیبریدی و امولسیونی
۲۱	(Abbasi et al., 2023b)	پایش جدایش امولسیون در مدت ۲ ساعت در فشار محیط و دمای °C ۸۵؛ کمی‌سازی پایداری امولسیون بر مبنای حجمی و تصویر برداری میکروسکوپی از امولسیون؛ جداسازی لجن با توری ۱۰۰ و شست و شوی لجن با آب داغ و گازوئیل داغ؛ کمی‌سازی نتایج لجن بر مبنای جرمی	اختلاط فازها توسط هم‌زن پره‌دار با سرعت rpm ۱۵۰۰ به مدت ۳۰ ثانیه	استفاده از نسبت‌های حجمی مختلف سه نمونه نفت خام و اسیدهای HCl، استیک اسید، اسیدهای هیبریدی و امولسیونی حاوی افزاینده‌های معلق نگهدارنده، ضد خوردگی و کنترل‌کننده یون آهن



شکل ۴- تأثیر دما بر میزان پایداری امولسیون و میزان جدایش اسید و نفت (Hedayati et al., 2023)

نامشخص بودن شرایط اختلاط در مرحله امولسیون سازی و تماس اسید و نفت، نقصان بسیار بزرگی در دستورالعمل فعلی است به طوری که حتی برای ارزیابی لجن، به تکان دادن بطری حاوی مواد به صورت دستی اشاره و خطای آزمایشگر نادیده گرفته شده است. از طرف دیگر، در پژوهش‌هایی که اختلاط مواد توسط دستگاه انجام شده است، تنوع دستگاهی و شرایط اختلاط مشاهده می‌شود که همین باعث پیچیدگی مقایسه نتایج و یافتن ارتباط میان آن‌ها می‌شود. در شکل ۵ نشان داده شده است که میزان تشکیل قطرات پراکنده اسید در نفت و اندازه آن‌ها، علاوه بر گرانیوی نفت، می‌تواند به شدت تحت تأثیر تنش اعمال شده به سیستم باشد به طوری که تشکیل امولسیون پایدارتر در نفت‌های با گرانیوی بیشتر، در شرایط تنش بالاتری صورت می‌گیرد. بنابراین، تنظیم سرعت اختلاط فازها در آزمایش سازگاری بر اساس تنش واقعی اعمال شده از سوی سیال تزریقی به محیط، اهمیت بالایی دارد.



شکل ۵- حساسیت تشکیل امولسیون در سرعت‌های اختلاط متفاوت فازهای اسید و نفت (Hedayati et al., 2023)

رویکرد مرسوم، توجه بسیاری به استفاده از انواع افزایه ضد امولسیون و ضد لجن دارد و می‌توان گفت که هدف اصلی آن، تشخیص کارایی این افزایه‌ها در شرایط مختلف است. جداسازی لجن از مخلوط امولسیون به طور عمده توسط توری ۱۰۰

میکرونی توصیه و انجام شده است و این موضوع باعث نادیده گرفته شدن لخته‌های لجن تشکیل شده با اندازه‌های کوچک‌تر می‌شود. در شکل ۶ (تصاویر سمت چپ) نشان داده شده است که فقط لخته‌های ماکروسکوپی لجن اسیدی توسط توری ۱۰۰ (با حفرات ۱۴۰ میکرومتری) معرفی شده در روش استاندارد RP-42، قابل اندازه‌گیری است. از طرفی، تصویر سمت راست نشان دهنده به دام افتادن ذرات ریزتر لجن اسیدی روی کاغذ صافی با اندازه ۲/۵ میکرومتر است. در موارد حساسی نظیر بررسی تأثیر یون‌های فریک، ذرات بسیار کوچکی می‌توانند تشکیل شوند که در تصویر میکروسکوپی سمت راست نیز مشخص شده‌اند. نظر به این‌که اندازه حفرات و گلوگاه‌های محیط متخلخل در نمونه‌های مختلف سنگ مخزن متفاوت است (تراوایی متفاوت سنگ‌ها)، استفاده از توری با اندازه حفرات تا حد ۱۴۰ میکرومتر همواره به ارزیابی صحیح از آسیب‌سازندگی ناشی از لجن اسیدی منتج نمی‌شود و اندازه فیلتر انتخاب شده می‌تواند متناسب با شرایط واقعی سنگ مخزن تغییر کند. از طرف دیگر، برای شست و شوی لجن از انواع حلال‌ها و مایعات استفاده شده است درحالی‌که پدیده انحلال اجزای لجن در تماس با مواد مختلف نامشخص است.



شکل ۶ - ترسیب ذرات لجن اسیدی با مقادیر و اندازه متفاوت قابل عبور از توری ۱۰۰ (Abbasi et al., 2023a; Kalthori et al., 2022; Mohammadzadeh-Shirazi et al., 2019)

در دستورالعمل فعلی، همه آزمایش‌ها در حضور ذرات جامد سازندگی یا جامدات جایگزین آن انجام می‌شود و این موضوع باعث پیچیده‌تر شدن تحلیل حساسیت نفت خام به برهم‌کنش با اسید می‌شود. تشکیل امولسیون و لجن اسیدی تا حد زیادی وابسته به نمونه نفت خام است و بخشی از نتایج، قابل تعمیم به نمونه‌های دیگر نیست درحالی‌که عمده مطالعات حوزه اسیدکاری به تحقیقات نمونه‌های غیر ایرانی اختصاص دارد. به‌همین دلیل ضرورت دارد که تحقیقات متعددی بر اساس استاندارد نوین بر روی نمونه نفت خام‌های ایرانی انجام شود.

۴- بازبینی دستورالعمل فعلی

همان‌طور که در بخش قبل اشاره شد، تغییرات متعددی برای ارزیابی امولسیون و لجن اسیدی توسط پژوهشگران با هدف رفع ابهامات در دستورالعمل RP-42 اعمال شده است. برای رفع این نواقص و اصلاح روش انجام آزمایش‌های مربوطه، نکات زیر می‌بایست مد نظر قرار بگیرد:

- پدیده تشکیل لجن اسیدی و پایدار شدن امولسیون اسید-نفت مستقل از هم نیستند و می‌توانند هم‌زمان صورت بگیرند، پس به‌نظر می‌رسد که بر خلاف دستورالعمل استاندارد RP-42، بررسی آن‌ها در یک آزمایش جامع صحیح‌تر باشد. به بیان

دیگر، بدون انجام تست مجزا با مواد اولیه جدید، پس از بررسی پایداری امولسیون، جداسازی و کمی‌سازی لجن تشکیل یافته با امولسیون باقی مانده صورت پذیرد.

- به دلیل تماس یافتن اسید تزریقی به مخزن با نفت و نیز سنگ مخزن در دما و فشار سازندی، لازم است قبل از اختلاط فازها در محیط آزمایشگاه، پیش گرمایش فازهای اولیه تا نزدیک دمای مخزن صورت بگیرد. دمای مورد آزمایش می‌بایست با در نظر گرفتن محدودیت‌هایی ایمنی و فنی نظیر پایداری گرمایی فاز اسید و افزایش‌های ضروری، دمای جوش اسید، امکانات آزمایشگاهی و دمای واقعی مخزن مورد مطالعه تعیین گردد. برای این منظور می‌توان از حمام آب یا آون استفاده نمود.

- نکته‌ای که در عمده پژوهش‌های پیشین مغفول مانده بود، دمای ظرف مورد استفاده برای پایش امولسیون یا ماندگاری مخلوط پیش گرم شده بود. پیش‌گرمایش سیالات اولیه به‌تنهایی کافی نیست زیرا پس از تخلیه این مواد در استوانه شیشه‌ای که در دمای محیط بوده و پیش‌گرم نشده است، باعث یک شوک دمایی و کاهش دمای امولسیون در مجاورت دیواره ظرف می‌شود. در این شرایط، ضمن تغییر در دمای برخی از قسمت‌های امولسیون، احتمال تشکیل کریستال‌های واکس و ایجاد هسته‌های اولیه اضافی و غیر معمول برای تشکیل رسوبات و لجن می‌گردد و احتمال شکستن ظرف نیز در برخی موارد وجود دارد.

- دستورالعمل استاندارد و برخی از پژوهش‌های پیشین بر مبنای استفاده از افزایش‌های متعدد، طراحی و اجرا شده‌اند. در انتخاب و به‌کار بردن انواع افزایش‌ها باید دقت شود و تا حد امکان، موارد با ضرورت پایین یا قابل حذف توسط بازنگری در شرایط عملیاتی، از آزمایش‌ها کنار گذاشته شوند زیرا پیچیدگی‌های بسیاری در اثر ناسازگاری و برهم‌کنش برخی افزایش‌ها با یک‌دیگر و نیز با فازهای اسید و نفت و جامدات سازندی مشاهده و گزارش شده است (دانشوند و همکاران، ۱۳۹۴؛ فدایی و همکاران، ۱۴۰۰؛ Garrouch et al., 2006; Delorey & Taylor, 1985; Abbasi et al., 2023b).

- در مرحله امولسیون‌سازی، می‌توان بسته به هدف پژوهش و انجام آزمایش، از تزریق اسید توسط پمپ در محیط متخلخل نظیر سنگ یا میکرومدل و یا هم‌زن‌های مختلف استفاده نمود. نکته حساس در این مرحله، توجه به شدت اختلاط است. انرژی در دسترس برای امولسیون‌سازی، تنش میان فازهای اسید و نفت است که می‌تواند به‌شیوه‌های مختلفی هم‌چون چرخش پره‌های هم‌زن، امواج فراصوت توسط دستگاه اولتراسونیک و یا جریان یافتن توسط پمپ در محیط متخلخل اعمال شود اما مقدار آن باید در محدود تنش واقعی در عملیات میدانی باشد که توسط پمپاژ سیال اسید تزریقی اعمال می‌شود. در دستورالعمل استاندارد، سرعت اختلاط ۱۴۰۰۰ تا ۱۸۰۰۰ rpm پیشنهاد شده است اما بر اساس پیشینه پژوهش، سرعت منطقی و مناسب برای هم‌زن، در محدود ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ rpm است (Pourakaberian et al., 2021) که البته تنش حاصل از این مقادیر وابسته به دستگاه (هم‌زن پره‌دار و شکل پره، هم‌زن مغناطیسی، sonicator, homogenizer و shaker)، و شکل هندسی ظرف اختلاط است. در برخی از پژوهش‌ها، به تکان دادن دستی ظرف اشاره شده است که بستگی زیادی به آزمایشگر و شدت تکان دادن ظرف و نیز اندازه ظرف دارد و تکرارپذیری آزمایش را محدود می‌کند. استفاده از یک هم‌زن مشخص و تنظیم سرعت آن در محدوده معرفی شده به‌همراه محاسبه و گزارش تنش حاصل از آن برای مقایسه نتایج پژوهش‌های مختلف ضروری به‌نظر می‌رسد.

- مدت زمان پایش جدایش فازهای امولسیون می‌تواند وابسته به مورد باشد و بهتر است که بر اساس شرایط تخلخل و تراوایی سازند و سرعت واکنش فاز اسید با مواد مختلف تعیین شود. برای ارزیابی آسیب سازندی ناشی از تشکیل امولسیون،

می‌توان از روش‌های مکمل و ترکیبی نظیر اندازه‌گیری جدایش فازها قبل و پس از سانتریفیوژ، گرانروی امولسیون، کشش سطح مشترک فازها و بررسی میکروسکوپی استفاده نمود.

- پردازش تصاویر میکروسکوپی قطرات امولسیون پایدار اسید-نفت منجر به تعیین توزیع اندازه قطرات و قطر متوسط آن‌ها در شرایط مختلف آزمایش می‌شود. مقایسه این اندازه‌های به‌دست آمده با توزیع اندازه حفرات سنگ مخزن کمک می‌کند که احتمال گرفتگی محیط متخلخل توسط همین قطرات پایدار اسید-نفت نیز تشخیص داده شود. ضخامت لایه لجن تشکیل شده روی سطح قطرات امولسیون نیز به این شیوه قابل اندازه‌گیری است.

- ارزیابی لجن در روش استاندارد با توری استیل ضد زنگ ۱۰۰ (با حفرات ۱۴۰ میکرومتری) صورت می‌گیرد و در برخی از پژوهش‌های پیشین، به جایگزینی آن با کاغذ صافی ۸ و ۲/۵ میکرونی نیز اشاره شده است. با توجه به مشاهدات تجربی، مقدار موادی که باید روی کاغذ صافی تخلیه شوند، زیاد است و کاغذ صافی مقاومت کافی را در برابر این حجم و جرم زیاد و دمای بالای آن ندارد و گرفتگی شدید آن مانع ارزیابی صحیح لجن می‌شود. از طرف دیگر، توری ۱۰۰ نیز به ذرات لجن با اندازه کوچک‌تر امکان عبور می‌دهد و در تشخیص مقدار واقعی لجن، خطای زیادی می‌تواند ایجاد شود. برای رفع این مشکل، می‌توان از چندین توری با اندازه حفرات مختلف از بزرگ به کوچک استفاده نمود و داده‌های لجن به‌صورت دسته‌بندی شده بر اساس اندازه حفرات توری گزارش شوند. این کار باعث می‌شود که آسیب‌سازندگی لجن با مقایسه با اندازه حفرات سنگ مخزن به‌طور واقع‌بینانه‌تری ارزیابی گردد.

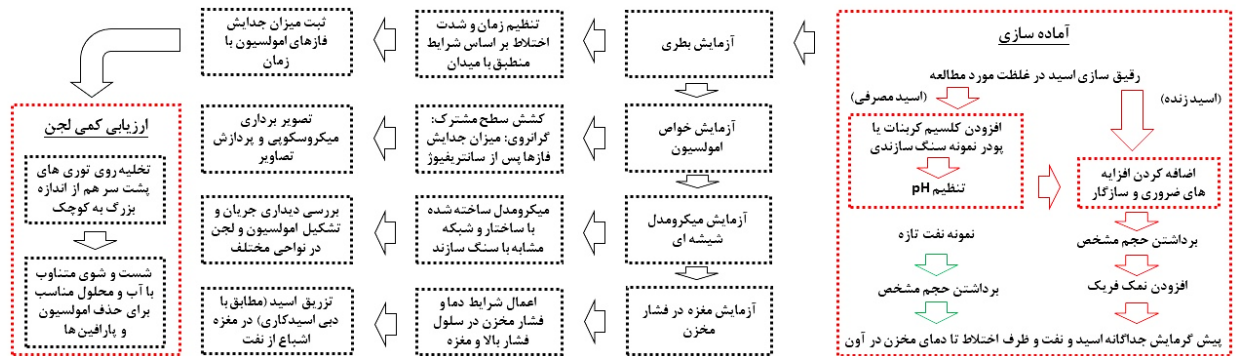
- شست و شوی لجن به‌دام افتاده روی توری با سیالات گوناگونی انجام شده است اما لازم است که انتخاب این سیالات بر اساس عملیات میدانی صورت بگیرد تا نتایج آزمایشگاهی با شرایط واقعی تطابق بیشتری پیدا کنند. ضمن این‌که امکان پذیری استفاده از این حلال‌ها در مقیاس صنعتی و در نظر گرفتن ملاحظات محیط‌زیستی حائز اهمیت است.

- آزمایش‌های ارزیابی امولسیون و لجن اسیدی در دو مرحله متوالی، یکی بر اساس اختلاط فازها و پایش مشابه با رویکرد اصلاح شده RP-42 و در ادامه، با ارزیابی تکمیلی تزریق اسید در محیط متخلخل تحت فشار بالا انجام گیرد. ترکیب نتایج این مراحل می‌تواند درک واقع‌گرایانه و نزدیک‌تری به شرایط میدانی حاصل کند.

- در شرایط میدانی، همواره مقداری یون فریک در اثر خوردگی تجهیزات و جداری چاه توسط اسید تزریقی، وارد اسید می‌شود که به‌عنوان یک اسید لوویس، اثر نامطلوب و تشدیدکننده‌ای در پایداری امولسیون و مقدار لجن تشکیل شده دارد. این موضوع در دستورالعمل RP-42 لحاظ نشده است و یکی از علل فاصله گرفتن شرایط آزمایش‌ها از شرایط واقعی سازند به‌حساب می‌آید. در نتیجه، ضرورت دارد که با افزودن نمک‌هایی نظیر فریک کلراید به اسید، یون‌های فریک را به اسید مورد آزمایش اضافه نمود.

- استفاده از برخی افزاینده‌های شیمیایی نظیر ضد خوردگی و کنترل‌کننده یون آهن همراه با اسید تزریقی به سازند اجتناب‌ناپذیر است. انحلال برخی از این افزاینده‌ها در محلول اسید و همگن شدن آن وابستگی شدیدی به شرایط آزمایش دارد به‌طوری‌که عدم تنظیم دما، رعایت نکردن سازگاری افزاینده‌ها با هم و غلظت اسید و نوع آن می‌تواند منجر به ترسیب آن‌ها شود. در رویکرد مرسوم، هیچ‌گونه جزئیاتی در این مورد ارائه نشده است و پژوهشگران و مهندسان بر اساس تجربه اقدام به افزودن افزاینده‌ها به اسید در آزمایشگاه می‌نمایند. به‌همین جهت لازم است در این زمینه نیز مطالعاتی صورت پذیرد و جزئیات ضروری به دستورالعمل اضافه گردد.

با لحاظ کردن موارد اصلاحیه شرح داده شده در این بخش در دستورالعمل آزمایشگاهی، می‌توان طرح کلی و پروسه جدید انجام آزمایش بررسی سازگاری اسید و نفت خام را با تمرکز بر تشکیل امولسیون و لجن اسیدی در قالب شکل؟ ارائه نمود.



شکل ۷- نمودار مراحل انجام آزمایش اصلاح شده سازگاری اسید و نفت خام (ارزیابی تشکیل امولسیون و لجن)

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

به کارگیری روش اصولی و استاندارد در انجام پژوهش‌ها، پیش نیاز دستیابی به نتایج علمی دقیق و معتبر است. در طراحی عملیات اسیدکاری میادین نفتی نیز یکی از ضروری‌ترین و کلیدی‌ترین مراحل، انجام صحیح آزمایش‌های سازگاری اسید و نفت، و مطالعه عوامل مؤثر بر تشکیل امولسیون پایدار اسید-نفت و لجن اسیدی نظیر ویژگی‌های محلول اسید، مواد جامد، یون‌ها و افزایش‌های شیمیایی می‌باشد که تا کنون بر اساس روش مرسوم RP-42 انجام شده است. استاندارد مورد نظر در برگیرنده شرایط آزمایشگاهی متفاوتی نسبت به محیط سازند است و ضمن شفاف نبودن جزئیات کافی انجام آزمایش‌ها، در کمی سازی نتایج نیز دارای نقصان است. از طرف دیگر، مجزا در نظر گرفتن روش انجام آزمایش‌های ارزیابی امولسیون و لجن اسیدی صحیح به نظر نمی‌رسد زیرا در شرایط واقعی، این دو پدیده به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهند و بر هم اثر می‌گذارند. در پژوهش حاضر، ضمن معرفی مراحل این دستورالعمل، به مروری بر پژوهش‌های انجام گرفته، یافتن نقاط ضعف و ابهامات موجود و در نهایت، ارائه راهکارهایی برای رفع آن‌ها پرداخته شده است. اهم این اصلاحات عبارتند از پیش گرمایش فازهای اولیه و ظرف اختلاط تا دمای مخزن، اختلاط با شدتی مشابه تنش‌های سازندی و با دستگاه‌های مشخص، بررسی تست‌های لجن در ادامه تست‌های امولسیون برای حصول نتایج واقعی‌تر، استفاده از توری‌های چند مرحله‌ای و با اندازه حفرات مختلف برای دسته‌بندی مقدار لجن بر اساس اندازه لخته‌ها، بررسی میکروسکوپی اندازه قطرات امولسیون و مقایسه آن با اندازه حفرات سازند و ارزیابی گرفتگی ناشی از قطرات امولسیون، معرفی سیالات مناسب و استاندارد برای شست و شوی لجن و تکمیل بررسی‌ها با انجام موازی آزمایش‌های تزریق در نمونه‌های مغزه یا میکرومدل. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که استاندارد RP-42 به‌عنوان تنها دستورالعمل منتشر شده و مرسوم ارزیابی سازگاری اسید و نفت، پس از گذشت مدت زمان بسیار زیاد، می‌بایست بر اساس پژوهش‌ها و نتایج به‌دست آمده مورد اصلاح و بازبینی قرار بگیرد. این مقاله، گامی در جهت ارتقای دانش فنی عملیات اسیدکاری می‌باشد و به مهندسان در برنامه‌ریزی و طراحی مؤثرتر انگیزش میادین نفتی کمک خواهد نمود.

۶- تشکر و قدردانی

مقاله حاضر، مستخرج از پژوهش انجام شده تحت حمایت شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب می‌باشد. به همین منظور از حمایت شرکت ملی نفت، آقایان مهندس حامد ملحانی، هومان بناشوشتری، احسان گنجی‌آزاد و سایر افرادی که به نوعی در پیشبرد آن همکاری نموده‌اند، قدردانی می‌شود.

منابع

- دانشوند، بهناز، بدری، فرزین، خدابنده، فرزاد و زری بافان، عرفان (۱۳۹۴). تست‌های آزمایشگاهی کنترل کیفیت افزایش‌های ضد لجن و ضد امولسیون به منظور جلوگیری از آسیب مجدد و بهبود عملیات اسیدکاری، سومین کنفرانس بین‌المللی نفت، گاز و پتروشیمی، تهران.
- زارعیان، محمدحسین (۱۳۹۰). اسیدکاری چاه‌های نفت و گاز، سنا.
- سندجی، فرشید، وزیری، پویا و نخعی، علی (۱۳۹۹). بررسی روش‌های اسیدکاری مخازن کربناته ایران، دهمین کنفرانس ملی پژوهش‌های نوین در علوم و مهندسی شیمی، بابل.
- شیخی بوجانی، فرناز، رمضان زاده، احمد و لطفی، محمد (۱۴۰۰). تعیین نرخ مناسب تزریق اسید در سازندهای کربناته به منظور افزایش تراوایی. پژوهش نفت. ۳۱(۲)، صفحات ۱۲۴-۱۴۵.
- صیادنژاد، محمد علی، اسکندری، محمد مهدی، سلیمانی جمارانی، محمد و سلیمانی، محمد (۱۳۸۶). بررسی اثر افزایش کندکار اسید امولسیونی بر روی سنگ کربناته گروه بنگستان. پژوهش نفت، ۱(۵۶)، ۷۲-۷۸.
- فدایی، شهره، محمدزاده شیرازی، میثم، پورااکبریان، آرش و آیت‌اللهی، شهاب‌الدین (۱۴۰۰). بررسی تأثیر افزایش‌های اسیدی ممانعت‌کننده در جلوگیری از تشکیل لجن آسفالتینی، هفدهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، مشهد.
- Abbasi, A. (2023). Investigation of the Acid-Crude Oil Emulsion Stability Affected by Asphaltene. (Ph.D. Dissertation), Shiraz University, Shiraz, Iran.
- Abbasi, A., Malayeri, M. R., & Mohammadzadeh-Shirazi, M. (2023a). Stability of spent HCl acid-crude oil emulsion. *Molecular Liquids*, 383, 122116. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122116>
- Abbasi, A., Mohammadzadeh-Shirazi, M., Malayeri, M. R., & Malhani, H. (2023b). Potential Drawbacks of Chemical Additives during Acidizing. *The 12th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2023)*.
- Abdollahi, R., Shadizadeh, S. R., & 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. <https://doi.org/10.1080/15567036.2011.559528>
- Alves, C. A., Romero Yanes, J. F., Feitosa, F. X., de Sant'Ana, H. B., Yanes, J. F. R., Feitosa, F. X., & de Sant'Ana, H. B. (2022). Influence of asphaltenes and resins on water/model oil interfacial tension and emulsion behavior: Comparison of extracted fractions from crude oils with different. *Petroleum Science and Engineering*, 208, 109268. <https://doi.org/10.1016/J.PETROL.2021.109268>
- Amro, M. M. (2006). Extended matrix acidizing using polymer-acid solutions. *SPE Technical Symposium of Saudi Arabia Section*. <https://doi.org/10.2118/106360-MS>
- API RP-42. (1990). *Recommended practices for laboratory testing of surface-active agents for well stimulation*.
- Coulter, A. W., & Gougler, P. D. (1984). Field tests indicate tubing is main source of iron precipitation in the wellbore. *Oil Gas*, 82(36).
- Coulter, A. W. J., Hendrickson, A. R., & Martinez, S. J. (1987). *Acidizing. Petroleum Engineering Handbook*. Society of Petroleum Engineers.
- Crowe, C. W., Hendrickson, A. R., & Dobberthien, R. F. (1966). Methods of sludge control during acid stimulation treatments. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 5(1), 14–18. <https://doi.org/10.2118/66-01-03>

- Daghighi-Rouchi, A., Abbasi, A., & Malayeri, M. R. Mohammadzadeh-Shirazi, M. (2023). Stabilizing role of asphaltene in various acid-oil emulsions. *The 12th International Chemical Engineering Congress & Exhibition (IChEC 2023)*.
- Delorey, J. A., & Taylor, R. S. (1985). Recent studies into iron/surfactant/sludge interactions in acidizing. *Annual Technical Meeting*. <https://doi.org/10.2118/85-36-38>
- Fredd, C. N., & Fogler, H. S. (1998). Alternative stimulation fluids and their impact on carbonate acidizing. *SPE Formation Damage Control Symposium*. <https://doi.org/10.2118/31074-PA>
- Garrouch, A. A., Malallah, A. H., & Al-Enizy, M. M. (2006). An empirical model for predicting crude sludging potential caused by acidizing. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 2, 1028–1039. <https://doi.org/10.2523/102129-ms>
- Greene, E. B., Lybarger, J. H., & Richardson, E. A. (1974). IN-SITU ACID NEUTRALIZATION SYSTEM SOLVES FACILITY UPSET PROBLEMS. *Journal of Petroleum Technology*, 26, 1153–1155. <https://doi.org/10.2118/4796-PA>
- Hamberg, M., & Samuelsson, B. (1974). Prostaglandin endoperoxides. Novel transformations of arachidonic acid in human platelets. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 79(1), 3400–3404. <https://doi.org/10.1073/pnas.71.9.3400>
- Hedayati, E., Mohammadzadeh-Shirazi, M., Abbasi, A., & Malayeri, M. R. (2023). Experimental investigation of the acid-oil emulsion stability influenced by operational conditions and oil properties. *Journal of Molecular Liquids*, 390, 123132. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123132>
- Houchin, L. R., Dunlap, D. D., Arnold, B. D., & Domke, K. M. (1990). The occurrence and control of acid-induced asphaltene sludge. *SPE Formation Damage Control Symposium*, 99–106. <https://doi.org/10.2118/19410-MS>
- Jacobs, I. C., & Thorne, M. A. (1986). Asphaltene precipitation during acid stimulation treatments. *SPE Formation Damage Control Symposium*. <https://doi.org/10.2118/14823-MS>
- Kalhari, P., Abbasi, A., Malayeri, M. R., & Mohammadzadeh Shirazi, M. (2022). Impact of crude oil components on acid sludge formation during well acidizing. *Petroleum Science and Engineering*, 110698. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110698>
- Lichaa, P. M., & Herrera, L. (1975). Electrical and other effects related to the formation and prevention of asphaltene deposition problem in Venezuelan crudes. *SPE Oilfield Chemistry Symposium*. <https://doi.org/10.2118/5304-MS>
- Mirkhoshhal, S. M., Mahani, H., Ayatollahi, S., & Mohammadzadeh-Shirazi, M. (2021). Pore-scale insights into sludge formation damage during acid stimulation and its underlying mechanisms. *Petroleum Science and Engineering*, 196, 107679. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107679>
- 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. <https://doi.org/10.1021/je2013268>
- 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. <https://doi.org/10.1016/J.PETROL.2018.11.051>
- Moore, E. W., Crowe, C. W., & Hendrickson, A. R. (1965). Formation, effect and prevention of asphaltene sludges during stimulation treatments. *Petroleum Technology*, 17(09), 1023–1028. <https://doi.org/10.2118/1163-PA>
- Pourakaberian, A., Ayatollahi, S., Mohammadzadeh-Shirazi, 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. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109073>
- Silin, M. A., Magadova, L. A., Davletshina, L. F., Yunusov, T. I., Merzlyakov, K. K., & Kotekhova, V. D. (2023). Complex study of acid-in-oil emulsions, their formation, stabilization and breakdown. *Journal of Dispersion Science and Technology*, 44(9), 1628–1636. <https://doi.org/10.1080/01932691.2022.2032133>
- Suzuki, F. (1993). Precipitation of asphaltic sludge during acid stimulation treatment: cause, effect, and

- prevention. *SPE Western Regional Meeting*. <https://doi.org/10.2118/26036-MS>
- Van Domelen, M. S., Ford, W. G. F., & Chiu, T. J. (1992). An expert system for matrix acidizing treatment design. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. <https://doi.org/10.2118/24779-MS>
- Vinson, E. F. (1996). A novel reducing agent for combatting iron-induced crude oil sludging: development and case histories. In *SPE International Conference and Exhibition on Formation Damage Control* (pp. SPE-31127). SPE.. <https://doi.org/10.2118/31127-MS>
- Wong, T. C., Hwang, R. J., Beaty, D. W., Dolan, J. D., McCarty, R. A., & Franzen, A. L. (1997). Acid-Sludge characterization and remediation improve well productivity and save costs in the permian basin. *SPE Production & Facilities*, 12(01), 51–58. <https://doi.org/10.2118/35193-pa>

A review of the acid-crude oil compatibility experimental procedure to prevent acid-induced emulsion and sludge formation and its revision based on field conditions

Abstract

Potential formation damage assessment due to the incompatibility of injected acid and reservoir crude oil is necessary before acid stimulation. Acid-oil emulsion, sludge formation, and applicability of controlling additives must be evaluated according to RP-42. In the last revision of RP-42 (1990), there are not enough details for conducting the tests including mixing conditions, data quantification, and the comparison of various experimental results. In addition, it has been explicitly mentioned that the results were not guaranteed, and RP-42 just included some recommendations to improve the accuracy of tests. In this paper, along with analyzing RP-42 in detail and presenting a literature review, some ambiguities are distinguished in experimental conditions including failure to consider the real reservoir temperature during emulsification, ambiguous mixing conditions of acid and crude oil, and its resulted shear, uncertainty associated with the sludge determination and its washing method. Therefore, the acid-oil compatibility test procedure has been revised based on the literature and experimental observations. The most important modifications are pre-heating the acid and oil phases and the container to the reservoir temperature, mixing with the same intensity as the shear of injecting acid into the reservoir, emulsion, and sludge evaluation by an integrated experiment, using multi-step screening with various mesh size for sludge separation, microscopic study of emulsion droplets and their comparison with the reservoir pore size distribution to recognize the clogging potential, introducing useful fluids to wash and purify the formed sludge, removing the destructive effects of ferric ions, and study completion by parallel conducting injection tests in core samples or micromodel. The revised procedure will help engineers to design acidizing processes more effectively, leading to lower costs, as well as paving the way for more accurate and realistic assessment of emulsion and sludge formation in the laboratory.

Keywords: Acid-induced sludge, acid-oil compatibility experiment, acidizing, emulsion, formation damage.