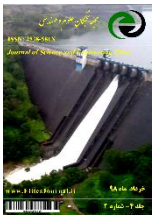
مجله نخبگان علوم و مهندسی
Journal of Science and Engineering Elites
جلد ۴- شماره ۲- سال ۱۳۹۸
www.ElitesJournal.ir



بررسی و شبیه‌سازی تاثیر اسیدکاری بر روی افزایش تولید مخزن بنگستان با استفاده از حلال دوگانه

محمدرضا دودمان کوشکی[1*]، سید ابوالقاسم امام‌زاده[2]

۱- کارشناس ارشد مهندسی نفت (مخازن هیدروکربوری)، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده مهندسی نفت و شیمی

۲- دانشیار و عضو هیئت علمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، گروه مهندسی نفت و گاز

* mr.doudmankushki@gmail.com

ارسال: اردیبهشت ماه ۹۸ پذیرش: خرداد ماه ۹۸

چکیده

از روش‌های کاربردی که می‌تواند زمان برداشت نفت را کاهش و ضریب بهره‌دهی مخازن را بعضاً تا حدود ۵۰۰ درصد افزایش دهد، روش اسیدکاری می‌باشد. این روش برای رفع آسیب سازند و افزایش نفوذپذیری مخازن در ایران نیز به کار گرفته می‌شود. وجود منابع نفتی ایران با تراوایی کم یکی دیگر از عواملی است که در مطالعه انگیزش چاه دارای اهمیت می‌باشد . میدان نفتی بنگستان یکی از مخازن نفتی با تراوایی کم می‌باشد که بسیار دردسرساز در زمینه تولید نفت است. مطالعات انجام گرفته نشان می دهد که غلظت بالای نفت موجود و نیز تمایل شدید آن به تولید رسوبات آسفالتین و پارافینی و تراوایی فوق العاده کم سنگ مخزن کربناته باعث شده است که با وجود حفر چاه‌های متعدد ظرفیت تولید این گونه مخازن پایین بماند. به منظور بررسی دقیق این فرآیند با استفاده از نرم افزار pan system، شبیه‌سازی و مطالعات جامعی روی یک چاه منتخب از این مخزن صورت گرفته، سپس نقش اسید بر شاخص‌های اسیدکاری و تغییرات تخلخل و نفوذپذیری مورد بررسی قرار می‌گیرد و شرایط بهینه ارائه می‌گردد. بنابر تجربیات به دست آمده جهت منع آسیب سازند از یک حلال دوگانه xylene پیشنهاد می‌گردد به دنبال آن جهت افزایش نسبی تروایی در منطقه اطراف چاه استفاده از HCL با غلظت ۱۵ % پیشنهاد شده است. در پایان باید گفت که جهت مخازن با تراوایی کم و دچار آسیب سازند در اطراف چاه‌های مخزن استفاده از روش‌های اسید شکافی و اسیدکاری ماتریکس باید مورد مطالعه قرار گیرد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی، اسیدکاری، تولید مخزن، کشش سطحی.

۱- مقدمه

تاریخ صد سال اخیر، شاهد کشفیات و موفقیت‌های فوق العاده و همین‌طور شکست‌های ناامیدکننده‌ای در زمینه اسیدکاری است. عملیات اسیدکاری را به هیچ وجه نمی‌توان تحت یک سری قانون مشخص و ثابت شناسایی نموده و مورد مطالعه قرارداد[۱].

تاریخچه اسیدکاری نشان می‌دهد که مواردی از این علم، کاملاً غیر قابل پیش‌بینی است. می‌توان گفت که اسیدکاری همانند یک عنصر است که کاملاً نمی‌توان به آن مسلط شد. در این عملیات همیشه فرصت برای کسب تجربیات بیشتر، کشف قانون‌های جدید

و پیشنهادهای نو وجود دارد اگر چه تجربه کامل در اسیدکاری تقریباً غیر ممکن است. ولی این بدین معنا نیست که موقعیت در اسیدکاری تنها به صورت اتفاق حاصل می گردد و طرح عملیات اسیدکاری هیچ گونه نقشی در وقوع آن نخواهد داشت[۲]. اطلاعات ارزشمند فراوانی توسط نشریات علمی نظیر SPE منتشر می‌شود و نیز اطلاعات قابل دسترس توسط شرکت‌های خدمات دهنده و شرکت‌های نفتی می‌توانند راهنمای خوب برای طراحی یک عملیات اسیدکاری باشند. در اسیدکاری استثناهای فراوانی وجود دارد که به صورت قانون درآمده‌اند و در حقیقت موقعیت اسیدکاری دقیقاً ارتباط با فهم دقیق‌تر و بهتر این استثناها دارد.

پارامترهای مؤثر در نتیجه عملیات اسیدکاری فوق العاده پیچیده در ارتباط نزدیک با هم هستند[۳] یکی از بزرگ‌ترین مشکلات در طراحی عملیات اسیدکاری تعیین میزان این پارامترهاست که عموماً با خطای فاحشی نسبت به مقدار واقعی آنها انجام می گیرد. در این پروژه سعی شده است تا این پارامترها و روش‌ها بخوبی معرفی شده و ارتباط آن‌ها با یکدیگر بیان شود.

بدیهی است دبی حجمی بالاتر از پنج بشکه در دقیقه معمولاً نمایان‌گر تزریق در شبکه شکاف می‌باشد. با توجه به تأثیر سریع اسید، لازم است بلافاصله برای تخلیه اسید مصرف شده با کمک گازهای ایجاد شده، رسوبات تخلیه و چاه باز گردد. برای اسید کاری لایه‌های کربناته از اسید کلریدریک استفاده می‌شود[۴]. عموماً اسیدکاری در سه مرحلهٔ پیش تزریق (Preflush)، اسید اصلی (Main Acid) و پس تزریق (Afterflush) انجام می گردد[۵]. اسید مورد استفاده در پیش تزریق، اسید کلریدریک ۱۵ درصد همراه با آب یا گازوئیل است که بستگی به نوع سیال موجود در سازند (نفت یا گاز بودن هیدروکربن)، دارای مواد پارافینی و آلی می‌باشد. پیش تزریق جهت مهیا نمودن سازند و برطرف کردن ضریب پوسته، به دیوارهٔ سازند تزریق می‌شود. در این مرحله، از مواد ضد خوردگی، مواد منحرف کنندهٔ جریان (Diverting)، مواد کاهش دهندهٔ کشش سطحی (Surfactants)، حلال‌های آلی و مواد از بین برندهٔ لجن (Antisludge) و رسوبات آلی، جهت تزریق استفاده می‌شود[۶].

اسید کلریدریک ۱ درصد در حرارت $200\ F^{\circ}$ پس از هشت دقیقه تماس با کربنات‌ها به طور کامل واکنش می‌دهد. از عواملی که در سرعت واکنش اثر دارند می‌توان به سطح تماس، فشار، غلظت و حرارت اشاره کرد[۷]. معمولاً به ازای هر $10\ ^{\circ}C$ افزایش دما، سرعت واکنش دو برابر می‌شود[۸].

هر چه غلظت اسید بیش‌تر باشد، اسید واکنش بیش‌تری انجام داده و اسید مصرفی (Spent Acid) بالاتری دارد که خود به عنوان کند کننده (Retarder) عمل می کند.

برای بیش‌تر شدن نفوذ اسید در سازندهای آهکی، آن را کند (Retard) می‌نمایند[۹]. معمولاً با یک بشکه اسید کلریدریک ۱۵ درصد می‌توان پنج فوت از چاه را اسیدکاری کرد. مشکل اصلی در اسیدکاری کربنات‌ها انتقال رسوبات است. مواد ضد خوردگی اثر زیادی بر کنترل خوردگی لوله‌ها و جلوگیری از رسوب دارند. اسید ۱۵ درصد در حرارت $250\ ^{\circ}F$ و فشار ۶۰۰۰ پاسکال حتی با وجود یک درصد مواد بازدارنده، از خوردگی جلوگیری می‌نماید[۱۰]. زمان کنترل، تقریباً ۱۰ ساعت می‌باشد. لذا مخلوط نمودن مواد ضد خوردگی در مبدأ و انتقال آن به سر چاه و نیز نگه داشتن اسید در سر چاه کاملاً اشتباه است و این مواد باید سر چاه مخلوط گردند.

اسید اصلی (Main acid) در لایه‌های کربناته، اسید کلریدریک ۱۵ یا ۲۸ درصد همراه با مواد بازدارنده از خورندگی می‌باشد. این اسید، ماتریکس سنگ را در خود حل می کند. شست و شوی نهایی با اسید ضعیف عموماً همراه با آب، تحت عنوان پس تزریق (Afterflush) برای کمک به تخلیه رسوبات حاصل انجام می‌شود، این کار باعث تماس با ماتریکس می گردد. معمولاً حجمی معادل ۵۰ الی ۳۵۰ گالن در فوت اسید کلریدریک قادر است تا عمق ۳ الی ۵ فوت در سازند نفوذ کرده و آسیب اطراف دیوارهٔ چاه را تا شعاع مذکور برطرف نماید.

۲– واکنش اسید در لایه های کربناته

الف) واکنش اسید سریع است.

ب) انتقال مواد حل‌شونده، ایجاد محدودیت می‌کند.

ج) تزریق اسید به صورت پدیدهٔ Worm Holing انجام می‌گیرد.

د) سرعت تزریق اسید و گرانروی اسید اثر زیادی روی ضریب آسیب دیدگی (Skin) نهایی سازند ندارد[۱۱] ولی باید در نظر داشت که سرعت کم باعث رسوب مواد حمل شده می‌گردد و سرعت‌های بالا نیز باعث شکستن سازند خواهد شد؛ پس بهترین حالت، ایجاد Worm Holing می‌باشد. اسید با مواد موجود در لایه‌های کربناته واکنش می‌دهد که این واکنش‌ها عبارتند از[۱۲]:

۱) اثر اسید بر دولومیت

$$4HCl + CaMg(Co_3)_2 \leftrightarrow CaCl_2 + MgCl_2 + 2H_2O + 2CO_2 \uparrow$$
$$2Hcl + MgCo_2 \leftrightarrow MgCl_2 + H_2O + Co \uparrow$$

۲) اثر اسید بر آهک

$$2HCl + CaCO_3\,(Calcite) \leftrightarrow CaCl_2 + H_2O + CO_2$$

یک متر مکعب اسید کلریدریک ۱۵ درصد قادر است ۲۲۰ کیلوگرم (۰/۰۹ متر مکعب) سنگ آهک را در خود حل کند.

۳) اثر اسید بر سیدریت

$$2HCl + FeCO_3\,(Siderite) \leftrightarrow FeCl_2 + H_2O + CO_2$$

زمان واکنش: زمانی است که طول می‌کشد تا غلظت اسید از حالت اولیه با انجام فعل و انفعالات به ۳/۲ درصد وزنی برسد. مشکل اساسی در مورد اسیدکاری شکاف در کربنات این است که به دلیل اینکه سرعت واکنش اسید زیاد است، در فاصله کمی از دیوارهٔ چاه، فعل و انفعالات متوقف می‌شود و در نتیجه اسید در عمق کم‌تری نفوذ می‌کند. فاکتورهایی که سرعت واکنش را در سازندهای کربناته کنترل می‌کنند عبارتند از:

۱) نسبت سطح تماس اسید به حجم اسید مصرفی (S/V): این نسبت، نقش اساسی در اسیدکاری ماتریکس (Matrix Acidizing) دارد.

۲) دمای سازند: هر چه دمای سازند بیش‌تر باشد، زمان واکنش اسید نیز بالاتر می‌رود.

۳) فشار سازند: فشار، از گازهای تولید شده در اثر واکنش تأثیر می‌پذیرد و باعث تند شدن یا کند شدن واکنش می‌گردد.

۴) غلظت اسید: هر چه غلظت اسید بالاتر رود، زمان مصرف اسید کاهش می‌یابد. با افزایش غلظت اسید کلریدریک تا حدود ۲۳ درصد، سرعت فعل و انفعال افزایش یافته و پس از آن سیر نزولی می‌یابد.

۵) نوع اسید: اسیدهای معدنی نسبت به اسیدهای آلی قوی‌تر می‌باشند، هر چه میزان کلرید کلسیم و گاز دی اکسید کربن تولیدی بیش تر باشد، اسید کندتر می‌گردد.

۶) خواص فیزیکی و شیمیایی سنگ مخزن: در شرایط یکسان سرعت واکنش اسیدی با سنگ آهک بیش از دو برابر سرعت واکنش آن با دولومیت است.

۷) سرعت اسید: سرعت اسید در اسیدکاری ماتریکس تأثیر چندانی ندارد، ولی در اسیدکاری شکاف (Acid Fracture)، افزایش در دبی پمپاژ، عرض شکاف را افزایش می‌دهد و در نتیجه نسبت سطح تماس اسید به حجم اسید مصرفی (S/V) کوچک‌تر شده و زمان مصرف اسید بالاتر می‌رود[۱۳].

جهت انجام طراحی تا حد امکان باید اطلاعات مربوط به سنگ مخزن و چاه در دست باشد. بدیهی است که پس از پمپ کردن اسید، مایعی با وزن کم‌تر به داخل چاه پمپ می‌گردد (معمولاً گازوئیل) تا اسید باقی‌مانده در داخل چاه را به داخل سنگ مخزن براند. حجم این سیال معمولاً کمی بیش‌تر از ظرفیت داخلی چاه در نظر گرفته می‌شود تا اطمینان حاصل شود که تمامی اسید به داخل سنگ مخزن نفوذ کرده است. چاه، حدود یک ساعت بعد از اسید زدن به منظور تمیز شدن باز می‌شود.

جدول ۱- قدرت حل کنندگی اسید فلوریدریک در غلظت‌های مختلف بر سنگ‌های کوارتز و آلبیت

غلظت اسید (درصد وزنی)	کوارتز (SiO_2)		آلبیت ($NaAlSi_2O_8$)	
	β	X	β	X
۲	0.015	0.006	0.019	0.008
۳	0.023	0.010	0.028	0.011
۴	0.30	0.018	0.037	0.015
۵	0.45	0.019	0.056	0.023
۶	0.060	0.025	0.075	0.030

عامل دیگری که در اسیدکاری چاه مؤثر می‌باشد، توان پمپ است که می‌توان آن را از رابطهٔ زیر محاسبه کرد[۱۴]:

$$HHP = 0.0245 \times P_S \times Q \quad (۱)$$

که:

HHP: توان پمپ (hp)

P_S: فشار سر چاه (psi)

Q: دبی طراحی شده (bbl/min)

$$V_P = 7.48 \times \varphi \times (r_s^2 - r_w^2) \times \pi$$

اغلب ۵۰ تا ۱۰۰ گالن در فوت اسید جهت پیش تزریق استفاده می‌کنند. اگر اسید پیش تزریق اسید کلریدریک باشد، می‌توان رابطهٔ زیر را جهت محاسبه حجم اسید به کار برد.

$$\frac{V_{HCl}}{ft} = 7.48 \times \frac{\pi(1-\varphi) \times (r_s^2 - r_w^2) \times X_{HCl}}{\beta} \quad (۲)$$

V_P: حجم فضای متخلخل سنگ (گالن بر فوت)

r_s: شعاع آسیب دیده (فوت)

r_w: شعاع چاه (اینچ)

X_{HCl}: کسری از سنگ که توسط اسید حل می‌گردد.

β: قدرت حل‌کنندگی اسید (حجم سنگ حل شده به حجم واحد اسید مصرفی)

عمق آسیب از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$r_d = r_w . exp[\frac{S}{[\frac{K_a}{K_d}] - 1}]$$

۳- محاسبات مربوط به اسید زدن

برای این منظور فعل و انفعال شیمیایی زیر که اثر اسید استیک بر سنگ آهک است، در نظر گرفته می‌شود.

$$2CH_3COOH + CaCO_3 \rightarrow (CH_3COO)_2Ca + CO_2 + H_2O$$

نتیجه اثر اسید استیک بر سنگ آهک، به وجود آمدن یک نمک، آب و گاز کربنیک است. در فعل و انفعال فوق واضح است که در شرایط تعادل، از لحاظ مواد مصرفی و مواد به وجود آمده، موازنه وزنی موجود است. به عبارت دیگر جمع جرم اتمی مواد تشکیل دهندهٔ مولکول‌های طرف راست معادله برابر است با همین مجموع در طرف دوم فرمول و هر دو برابر ۲۲۰/۱۹ می‌باشد. به طور اختصار، دو مولکول اسید استیک لازم است مصرف شود تا یک مولکول کربنات کلسیم (سنگ آهک) را کاملاً حل کند. با در دست داشتن اطلاعات فوق می‌توان حل‌کنندگی اسید را محاسبه نمود که بیان‌گر حجم سنگ حل شده به حجم واحد اسید مصرفی است. طبق واکنش بالا خواهیم داشت:

$$\beta = \frac{M_{CaCO_3}}{M_{CH_3COOH}} = \frac{100.92}{2 \times 60.05} = 0.833$$

در رابطه بالا مشخص است که ۱۰۰ گرم (یا پاوند) اسید استیک خالص فقط می‌تواند ۸۳/۳ گرم (پاوند) سنگ آهک خالص را در خود حل نماید. حال با توجه به این مطلب بدیهی است که در صورت داشتن ناخالصی در هر کدام نیز به همین روش می‌توان مقدار لازم اسید را محاسبه نمود. واضح است با توجه به وزن مخصوص هر جسم، می‌توان حجم مواد لازم یا به وجود آمده در یک فعل و انفعال را محاسبه نمود.

۴- عملکرد مواد کاهش‌دهنده کشش سطحی

۴-۱- کاهنده‌های نوعی آنیونی (Anionic) معمولاً[۱۵] :

الف) ماسه سنگ، پلمه سنگ (shale) یا خاک رس را آب تر و به طور منفی باردار (بار الکتریکی) می‌نمایند.
ب) سنگ آهک یا دولومیت تا PH=8 را نفت تر و از PH=9.5 یا بالاتر، آب تر می‌کنند.
ج) امولسیون آب در نفت را می‌شکنند و باعث تشکیل امولسیون نفت در آب می‌شوند.
د) باعث پراکندگی خاک رس یا ذرات ریز در آب می‌گردند.

۴-۲ -کاهنده‌های نوع کاتیونی (Cationic)

الف) ماسه سنگ، پلمه سنگ یا خاک رس را نفت تر می‌نمایند[۱۶].
ب) سنگ آهک یا دولومیت تا PH=8 را آب تر و از PH=9.5 یا بالاتر، نفت تر می‌کنند.
ج) امولسیون نفت در آب را می‌شکنند و باعث تشکیل امولسیون آب در نفت می‌شوند.
د) باعث پراکندگی خاک رس یا ذرات ریز در نفت و تجمع خاک رس در آب می‌گردند.

۴-۳ -کاهنده‌های بدون بار (Nonionic)

این کاهنده‌ها، بی ثبات‌ترین نوع ازکاهنده‌ها در انگیزش چاه (به دلیل یونی نبودن مولکول‌های آن‌ها) می‌باشند[۱۷]. این کاهنده‌ها در ترکیب با سایر مواد شیمیایی، می‌توانند برای بالا بردن سختی آب و PH اسید استفاده شوند. اکثر کاهنده‌های فاقد یونی، مشتقاتی از اکسید اتیلن یا مخلوط اکسید پروپلین و اکسید اتیلن می‌باشند. قابلیت حل آب در کاهنده‌های فاقد یونی سبب تشکیل باند هیدروژنی یا جذب آن از آب برای اکسیژن مربوط به اکسید اتیلن، محدود می‌باشد. در ضمن روند عمل جذب در درجهٔ حرارت بالا و غلظت بالای نمک، کاهش یافته و باعث جداشدن مقدار زیادی از کاهنده‌های فاقد یونی از محلول می‌شود. به منظور تقلیل کشش سطحی و شکستن امولسیون‌ها (بدون تغییر بار الکتریکی ساکن سنگ مخزن)، استفاده از این ماده در حال افزایش می-باشد[۱۸].

۴-۴ -کاهنده‌های نوع آمفوتریک (Amphoteric)

مولکول‌های این نوع کاهنده‌ها دارای هر دو گروه بازی و اسیدی هستند. از آن جا که بار الکتریکی این نوع کاهنده‌ها، مرتبط با PH اسید قسمت پایه یونیزه است، به مولکول‌ها یک فعالیت سطحی می‌دهد و در PH پایه، قسمت اسیدی به خودی خود خنثی و دارای فعالیت سطحی کم‌تر نسبت به سایر مقادیر PH می‌شود. به طور کلی استفاده از این ماده، محدود و اغلب به عنوان مواد ممانعت‌کننده از خوردگی مورد استفاده قرار می گیرد[۱۹].

۵- مشخصات کاهنده‌های کشش سطحی مناسب

کاهنده‌ای که برای پیشگیری یا رفع آسیب دیدگی یک مخزن معمولاً به کار گرفته می‌شود، باید دارای مشخصات زیر باشد[۲۰]:
الف) قادر به کاهش کشش سطحی و میان رویه‌ایی باشد.

ب) از تشکیل امولسیون جلوگیری نموده و امولسیون‌های تشکیل شده قبلی را نیز بشکند.

ج) با توجه به شوری و PH آب موجود در محیط، بتواند سنگ مخزن را آب تر نماید.

د) عامل تورم، انقباض یا پراکندگی خاک رس در سازند نباشد.

ه) قادر به ابقای فعالیت سطحی در شرایط مخزن باشد.

و) قابلیت حل در سیال حامل یا سیال مورد استفاده را در درجه حرارت مخزن داشته باشد.

- ❖ بعضی از کاهنده‌های کشش سطحی، در سیال حامل، پراکنده می‌گردند.

ز) تحمل آب نمک سازند یا سیالات تولیدی را داشته باشد. به عنوان مثال، کاهنده‌های نوع آنیونی حلالیت آن‌ها از کاهنده‌های نوع فاقد یونی (Nonioncic) بهتر است.

لازم به توضیح است که تعداد زیادی از کاهنده‌های کشش سطحی تجاری، در محیط نمکی با شوری بالاتر از ۵۰۰۰۰ قدم (قسمت در میلیون)، قدرت فعالیت سطحی خود را به مقدار قابل توجهی از دست می‌دهند. برای غلبه بر چنین مشکلی، تزریق یک حلال یا آب نمک با شوری کم، قبل از شروع کار می‌تواند مثمر ثمر باشد.(در چاه‌های تولید گاز خشک نباید از حلال استفاده نمود)[۲۱].

۶- مطالعه آزمایشگاهی عملیات اسیدکاری

در این پروژه سعی بر این است که توسط انجام چند نمونه تست پدیده خورده شدن سنگ توسط اسید را به طور دقیق ارزیابی نماییم و نیز مراحل انتخاب نمودن افزایه‌های مورد نیاز در یک عملیات اسیدکاری مورد بررسی قرار دهیم.

آزمایش اول:

در آزمایش اول مقدار خورده شدن سنگ مخزن را توسط اسید HCL، Mud Acid را مورد مطالعه قرار دهیم. به این صورت که در ابتدا نمونه سنگ‌ها را توسط ترازوی دیجیتال وزن می‌نماییم و سپس با پیداکردن حجم آن‌ها مقدار Porosity (تخلخل) را توسط دستگاه Porosimeter(تخلخل سنج) حساب می‌کنیم.

شرح کار دستگاه:

این دستگاه توسط قانون بویل کار می‌کند $(PV)1= (PV)2$

در این مرحله با محاسبات از روی فشارها، مقدار تخلخل (Porosity)را به دست می‌آوریم.

$$P_1v_1=p_2v_2$$
$$P_1V_{cell}=p_2(V_{cell}+V_{expansion})$$
$$P_3(V_{cell}+V_s)=P_4(V_{cell}-V_s+V_{expansion})$$
$$P_5(V_c-V_{gc})=P_6(V_C-V_{gc}-V_e)$$

VC= حجم Cell محفظه اول

V_{ge}= حجم فضاهای خالی مؤثر

V_e= حجم محفظه expand

V_s= حجم نمونه استاندارد

جدول ۱- محاسبات برای یک نمونه

باز کردن یک شیر	باز کردن شیر سه
محفظه خالی p4=5.35 psi	P1= 10 psi
محفظه با نمونه استاندارد P4=7.6 psi	P3=14.7 psi
محفظه با نمونه سنگ P6=7.3 psi	P5=14.5 psi

جدول ۲- مشخصات نمونه استاندارد (ستونه)

قطر: D=2.5 cm	ارتفاع: h= 3.2 cm
V_s= 4.91 cm^2 (3.2 cm) = 15.71 cm^3	
حجم نمونه سنگ: V_b= 26 cm^3	
10 V_c = 5.35 (V_C + V_C)	
14.7 (V_C – 15.7) 7.6 (V_C – 15.7 + Ve)	
14.5 (V_C – 26 + VPe) = 7.3 (VC – 26 + VPe + V_e)	

جدول ۳- نتیجه

V_e = 189 cm^3
V_c= 218 cm^3
Vpe = 0.5 cm^3
Porosity = 0.50 / 26 = 1.9 %

مقادیر تخلخل نمونه‌های آزمایشگاهی قبل از تماس با اسید:

جدول ۴- درصد تخلخل بدست آمده بعد از محاسبات:

۱	5.31
۲	3.29
۳	3.11
۴	4.34
۵	1.69
۶	5.31
۷	3.74
۸	5.91
۹	6.22
۱۰	1.93
۱۱	6.25
۱۲	7.63
۱۳	3.13
۱۴	2.97
۱۵	4.23

پس از مشخص شدن تخلخل نمونه‌ها آن‌ها را داخل اسید قرار می‌دهیم به این صورت که نمونه‌ها را به ۳ دسته ۵ تایی تقسیم می کنیم.

** آزمایش را با اسید % Hcl انجام می‌دهیم[۲۲] به این صورت که اسید را تا دمای تقریبی مخزن حدود 75 c توسط حمام آب گرم، گرم می‌کنیم سپس نمونه‌ها را در داخل بشر محتوی اسید می‌اندازیم، قبل از انداختن نمونه در داخل اسید آن را وزن می‌کنیم سپس به نمونه زمانی معادل ۷ دقیقه می‌دهیم تا در داخل اسید قرار گیرد پس از آن نمونه را از داخل اسید خارج نموده و آن را داخل

گرم کن می‌گذاریم تا خشک شود حال نمونه را دوباره وزن می‌کنیم تا مقدار کاهش وزن که بر اثر خورده شدن توسط اسید ایجاد شده است را مشخص نماییم سپس نمونه‌ها را در داخل دستگاه porosimeter (تخلخل سنج) قرار می‌دهیم تا مقدار تخلخل آنها مشخص گردد تا تأثیر اسیدکاری را بر روی تخلخل هم بررسی کنیم.

جدول ۵- داده‌های حاصل از آزمایش با اسید

	وزن قبل از انجام آزمایش	وزن کاغذ صافی	وزن با کاغذ صافی	وزن باقیمانده پس از اسیدکاری	درصد کاهش وزن
1	12.979 gr	1.733 gr	13.769	12.03	7.317
2	2.830	1.33	3.869	2.39	10.288%
3	23.766	1.45	22.52	21.07	11.34%
4	40.296	1.733	28.79	27.057	32.85%
5	5.40	1.53	6.256	4.726	12.48

جدول ۶- درصد تخلخل بدست آمده بعد از محاسبات و بعد از تماس با اسید

1)	6.14 %
2)	5.15 %
3)	8.76 %
4)	به علت خوردگی زیاد امکان اندازه‌گیری وجود ندارد
5)	11.2 %

جدول ۷- آزمایش مراحل قبل با اسید 28% Hcl

	وزن قبل از انجام آزمایش	وزن کاغذ صافی	وزن با کاغذ صافی	وزن باقی‌مانده پس از اسیدکاری	درصد کاهش وزن
6	23.421	1.33	22.13	20.8	6.32
7	17.32	1.733	15.21	13.477	22.18
8	21.472	1.53	19.02	17.49	18.54
9	11.772	1.45	11.03	9.58	18.62
10	9.384	1.733	8.381	6.648	29.15

جدول ۸- درصد تخلخل سنگ بعد از محاسبات و بعد از تماس با اسید 28% Hcl

6)	9.43
7)	6.21
8)	6.31
9)	7.12
10)	8.31

جدول ۹- نتایج حاصل از آزمایش با (Hcl 2 % + Hf 3 %) Mud Acid

	وزن قبل از انجام آزمایش	وزن کاغذ صافی	وزن با کاغذ صافی	وزن باقی‌مانده پس از اسیدکاری	درصد کاهش وزن
11	31.28	1.23	26.12	24.89	20.42 %
12	27.212	1.37	19.931	18.561	31.79 %
13	16.113	1.63	11.236	9.606	40.38 %
14	17.86	1.773	10.21	8.437	28.86 %
15	15.38	1.49	14.201	12.711	17.35 %

جدول ۱۰- درصد تخلخل سنگ بعد از محاسبات و بعد از تماس با Mud Acid

11)	9.38
12)	به علت خوردگی زیاد امکان اندازه‌گیری porosity نمی‌باشد.
13)	به علت خوردگی زیاد امکان اندازه‌گیری porosity نمی‌باشد.
14)	8.13
15)	7.56

با بررسی نتایج حاصل از آزمایش می‌توان به این نکته پی برد که در تمامی نمونه‌ها اسید باعث خوردگی شده است ولی درصد متفاوت است. در هنگام استفاده از mud Acid این مقدار بیشتر می‌شود لازم به ذکر است که در هنگام اسیدکاری مهم‌ترین قسمت کار شناخت Lithology (سنگ شناسی) سنگ مخزن می‌باشد و پس از شناخت آن می‌بایست اقدام به اسیدکاری نمود و آن هم توسط اسید خاصی که بیش‌ترین درصد کارایی را دارد.

در مخازن آهکی و سازندهای منیزیم معمولاً اسید Hcl دارای تأثیر خوبی است فقط باید به این نکته توجه شود که همراه اسید باید دقت زیادی در انتخاب افزایه‌ها گردد. تا از ایجاد پدیده خوردگی تشکیل امولسیون، تولید رسوب و غیره جلوگیری شود. نکته مورد اهمیت این است که حتماً می‌بایست همراه اسید از مواد تأخیر انداز هم استفاده شود تا اسید تمام تأثیر خود را بر روی سنگ‌های دیواره چاه نگذارد و بتواند تأثیر خود را برای مدت زمان بیشتری حفظ نماید و به سرعت خنثی نگردد و آنجایی که مکان دارد تأثیر اسید در شعاع بیشتری پیش روی نماید.

آزمایش بعدی در مورد خورده شدن فلز لوله جداری (Casing) صحبت می‌نماید که به آن تست خوردگی یا Corrosion گویند که هدف اصلی از این تست پیدا نمودن بهترین افزایه‌های ضد خوردگی است تا اسید کم‌ترین مقدار خوردگی را درلوله جداری (Casing) ایجاد نماید. زیرا اگر به این امر توجه نگردد، لوله جداری مورد نظر خورده می‌شود و دوام و استحکام خود را از دست می‌دهد که چه بسا ممکن است باعث عدم پایداری دیواره چاهی که اسیدکاری شده است گردد که تعمیر و برگرداندن لوله جداری به حالت اولیه کاری بسیار دشوار و در مواقعی غیر قابل انجام است.

برای این منظور از کپن‌هایی از جنس لوله جداری استفاده می‌گردد.

در این آزمایش از کپن لوله جداره‌ی با مارک N- 80 استفاده شده است زیرا این نوع لوله جداری بیشترین استفاده را در صنعت حفاری ایران دارد.

وسایل مورد نیاز برای آزمایش:

کوپن نوع Oil Base (N - 80) ستونه مدرج cc 100 و کولیس و رینه

شرح کار:

هر کوپن مورد ارزیابی از جنس لوله‌های مغزی و جداری و دارای طول و عرض و ضخامت می‌باشد و دارای سطح است. اگر طول (a) و ضخامت (c) در نظر گرفته شود این اضلاع به‌وسیله دستگاه کولیس و رینه اندازه‌گیری می‌شود[۲۳] دایره درون کوپن از سطح کم می‌گردد در آخر برای مساحت کل کوپن فرمول زیر در نظر گرفته می‌شود.

$$[2(ab+ac+bc)] + [3.14\times c \times d] - [1.57 \times d^2]$$

وزن اولیه کپن را اندازه می‌گیریم سپس نمونه کپن را در cc 100 اسید (اسید + افزایه‌ها) درون ستونه مدرج قرار داده و در دستگاه oil Bath تحت دمای موجود در چاه به مدت زمان‌های مختلف (۶-۱۲، ۲۴، ۷۲ ساعت) قرار می‌دهیم. بعد از گذشت مدت زمان کپن را در آورده و شسته و سپس درون محلول کاستیک (جهت خنثی‌سازی) قرار می‌دهیم سپس آن را کاملاً خشک نموده و وزن می‌کنیم حال اختلاف وزن اولیه و ثانویه را حساب نموده و تقسیم بر مساحت کل کرده و مقدار خوردگی بر حسب فوت مکعب بدست می آید. شاخص و استاندارد خوردگی ۰/۰۵ می‌باشد.

جدول ۱۱- نتایج حاصل از آزمایش با مقادیر مختلف افزایه‌ها

0.626821 lb	وزن اولیه کپن
0.100244 ft^2	مساحت کپن
0.60614 lb	وزن کپن بعد از تماس با اسید 28% به‌همراه افزایه‌های جدید بعد از ۶ ساعت
0.61366 lb	وزن کپن بعد از تماس با اسید 28% به‌همراه افزایه‌های جدید بعد از ۶ ساعت
0.60301 lb	وزن کپن بعد از تماس با اسید 28% به‌همراه افزایه‌های جدید بعد از ۱۲ ساعت
0.61178 lb	وزن کپن بعد از تماس با اسید 28% به‌همراه افزایه‌های جدید بعد از ۱۲ ساعت
0.61491 lb	وزن کپن بعد از تماس با اسید 15% به‌همراه افزایه‌های جدید بعد از ۶ ساعت

وزن کپن بعد از تماس با اسید 15% به‌همراه افزایه‌های جدید بعد از ۶ ساعت	0.61867 lb
وزن کپن بعد از تماس با اسید 15% به‌همراه افزایه‌های جدید بعد از 12 ساعت	0.61303 lb
وزن کپن بعد از تماس با اسید 15% به‌همراه افزایه‌های جدید بعد از 12 ساعت	0.61679 lb

HCL 15 %						
Corrosion Inhibitor	CI-27	1	180	TCI-122	1	180
Intensifier	HYTEMP-O	1.2		TCI-1921	1.2	
Suspending Agent	MMR-4	0.4		MMR-4	0.4	
Antisludge	NE-32	1		NE-32	1	
De-emulsifier	NE-13	1		NE-13	1	
Multifunction	Mss-100	0		Mss-100	0	
Corrosion Rate lb/ft^2/6 hr	0.019			0.013		
Corrosion Rate lb/ft^2/12 hr	0.022			0.016		

HCL 28%						
Additives	Old			New		
	Name	Dosage	Temp (′F)	Name	Dosage	Temp (′F)
Corrosion Inhibitor	CI-27	1	180	TCI-122	1	180
Intensifier	HYTEMP-O	1.2		TCI-1921	1.2	
Suspending Agent	MMR-4	0.4		MMR-4	0.4	
Antisludge	NE-32	2.5		NE-32	2.5	
De-emulsifier	NE-13	1		NE-13	1	
Multifunction	Mss-100	0		Mass-100	0	
Corrosion Rate Ib/	0.033			0.021		

آزمایش سوم:

این آزمایش مربوط به سازگاری می‌باشد به این معنا که اسیدی که وارد سازند می‌شود و در داخل آن درصد زیادی آب وجود دارد به علت وجود افزایه‌های مختلف که در داخل اسید می‌باشند در هنگامی که این ترکیب با نفت برخورد می‌کند یک ترکیب امولوسیونی را تشکیل می‌دهد که باعث از بین رفتن تعادل در داخل مخزن می‌گردد که این عمل باید سریعاً به حالت قبل برگردد یعنی سریعاً سیالی که به صورت امولسیونی وارد چاه می‌شود باید به صورت دو فاز درآید و از هم جدا شود که برای این منظور از آزمایش سازگاری استفاده می‌شود تا بهترین نوع و درصد موادی امولسی فایر مشخص گردد. مراحل انجام آزمایش به شرح زیر می باشد:

در این تست محلول ۵۰ به ۵۰ می‌باشد یعنی ۵۰٪ نفت و ۵۰٪ مابقی اسید به اضافه افزایه‌های سازگاری و ضد خوردگی و ... می‌باشد. میزان اضافه کردن افزایه‌های سازگاری و افزایه‌های ضد خوردگی و مابقی افزایه‌ها را با هم جمع نموده و از 50 cc کم می‌کنیم و عدد باقی‌مانده میزان سی سی اسید می‌باشد که حاصل جمع هر دو باید 50 cc شود.

سپس 50 cc نفت سبک یا سنگین (بستگی به نفت چاه مورد نظر دارد) را جدا کرده و به اسید اضافه می‌شود سپس به مدت ۳۰ ثانیه میکس می‌شود و در یک ستونه مدرج 100 cc ریخته و در درون حمام آب، هم‌دمای چاه می‌گردد و طبق زمان‌های ۶۰ ,۴۵, ۳۰,۱۵,۱۰ ,۵ دقیقه میزان دو فاز شدن نفت و اسید را می‌سنجیم. دو فاز شدن در بالاتر از زمان ۶۰ دقیقه غیر قابل قبول و نمونه مردود می‌باشد. لازم به توضیح است که قبل از عملیات اسیدکاری هر چاه، باید تست سازگاری انجام شود سپس اسیدکاری صورت گیرد و دما درکل بستگی به دمای ته چاه دارد که توسط واحد متقاضی اعلام می‌گردد.

جدول ۱۲- نتایج تست ناسازگاری با درصدهای مختلف از افزایه‌ها

Sample No.	Type	Name	Dosage	Temp. (′F)	Time (MIN)	EMULSION BREAKER (%)	توضیحات
LIGHT OIL HCL 15%	Corrosion Inhibitor	A-262	0.8	170	5	0	شفاف همراه با کمی لخته چسبیده به جداره
	Intensifier	A-201	0		10	0	
	Antisludge	W-035	1.5		15	0	
	De-emulsifier	W-054	1.5		30	0	
	Iron Control Agent	U-042	1		45	5	
					60	10	
LIGHT OIL HCL 15%	Corrosion Inhibitor	A-262	1	170	5	0	عدم جداسازی
	Intensifier	A-201	0		10	0	
	Antisludge	W-035	1.5		15	0	
	De-emulsifier	W-054	2		30	0	
	Iron Control Agent	W-042	1		45	0	
					60	0	
LIGHT OIL HCL 28%	Corrosion Inhibitor	A-262	0.8	170	5	90	قهوه‌ای تیره همراه با لخته زیاد
	Intensifier	A-201	1.2		10	100	
	Antisludge	W-035	2		15	100	
	De-emulsifier	W-054	1.5		30	100	
	Iron Control Agent	U-042	1		45	100	
					60	100	
LIGHT OIL HCL 28%	Corrosion Inhibitor	A-262	1	170	5	100	قهوه‌ای تیره همراه با لخته زیاد
	Intensifier	A-201	1.2		10	100	
	Antisludge	W-035	2		15	100	
	De-emulsifier	W-054	2		30	100	
	Iron Control Agent	U-042	1		45	100	
					60	100	

۷- نتیجه‌گیری

۱- اسیدزنی همراه با سیستم‌های مناسب در چاه‌های مورد نظر، بهترین راه برای افزایش تولید در مخازن ماسه‌سنگی و کربناته است.

۲- فهم بهتر شیمی و فیزیک در مراحل اسیدزنی، همراه با بهبود انجام روش‌ها، نتیجه‌بخش‌تر خواهد بود.

۳- استفاده از نرم افزار رایانه‌ای که شامل قواعد و راهنمایی‌های کاملی در مورد اسیدزنی ماسه سنگ‌ها باشد سودمند است. از طریق رایانه می‌توان طراحی‌های نامناسب را حذف کرد و روش‌ها را استاندارد نمود و به این طریق نسبت موفقیت را افزایش داد.

۴- در سیستم‌های جدید اسیدزنی که روش‌های انجام کار بهبود پیدا کرده است به طور ویژه‌ای روی مشکلاتی که در اسیدزنی ماسه سنگی وجود داشت تأکید شده است و به همین علت نیاز به مطالعات بیشتری در خصوص اسیدکاری مخازن کربناته بخصوص در ایران می‌بایست انجام گیرد.

۸- مراجع

۱. فتاحی، احسان. جلالی‌فرد، حسین. پورافشاری، پیمان. مرادی، بابک. جنت‌رستمی افشین. (۱۳۹۱). انتخاب بهترین روش فرازآوری مصنوعی برای یکی از میادین نفتی ایران با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره. اکتشاف و تولید. شماره ۸۸.

۲. بهپور، مسعود. عادل‌زاده، محمدرضا. (۱۳۸۹). شبیه‌سازی فرازآوری مصنوعی به‌وسیله نرم‌افزار PIPESIM در یکی از میادین جنوب غربی کشور. اکتشاف و تولید. شماره ۷۴.

۳. فولادگر، مسعود. معرفی انواع روش‌های فرازآوری مصنوعی. اکتشاف و تولید.

۴. پورغلامی، محمد. ملک‌زاده، اسدالله. کرد، شاهین. (۱۳۹۲). استفاده از روش الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی توزیع گاز به گروهی از چاه‌های نفتی جهت فرازآوری با گاز. اکتشاف و تولید. شماره ۱۰۶.

۵. محمودی، مهرک. صادقی، محمدتقی. فرهادپور، فرهادعلی. (۱۳۹۰). شناسایی رژیم‌های جریان دوفازی و محاسبه افت فشار در چاه‌های تحت فرازآوری با گاز. پژوهش نفت. شماره ۶۸.

۶. واحدی، آرمان. (۱۳۷۹). بهینه‌سازی مقدار گاز تزریقی در گاز لیفت. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد. دانشکده مهندسی شیمی. دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۷. غزل، محمدحسین. عباسی‌عبدلی، حمید. (۱۳۹۱). معرفی و شبیه‌سازی تلمبه‌های درون‌چاهی نصب شده در شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب. اکتشاف و تولید. شماره ۹۶.

۸. روشن ضمیر، روبین. (۱۳۸۳). بررسی فنی و اقتصادی رانش مصنوعی(فرازآوری با گاز) در یک میدان دریایی. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد. دانشکده مهندسی نفت. دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۹. شعاعی‌فردخمسه، فرخ. (۱۳۹۱). افزایش تولید با بکارگیری روش‌های پیشرفته بهینه‌سازی سیستم فرازآوری مصنوعی با گاز در میادین فراساحلی. اکتشاف و تولید. شماره ۹۰.

۱۰. پیدایش، سجاد. مقدسی، جمشید. (۱۳۹۱). شبیه‌سازی فرازآوری مصنوعی به‌وسیله نرم‌افزار PIPESIM در یکی از چاه‌های مخازن جنوب‌غربی ایران. اکتشاف و تولید. شماره ۹۲.

۱۱. خامه‌چی، احسان. عباسی‌پورآتشگاه، رحیم. (۱۳۹۲). به‌کارگیری روش شبکه‌های عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی دبی تزریق بهینه گاز در سیستم‌های فرازآوری با گاز به‌صورت پیوسته. اکتشاف و تولید. شماره ۷۵.

۱۲. خامه‌چی، احسان. مهدیانی، محمدرضا. نوروزی، محمد. (۱۳۹۲). مدل‌سازی عملیات فرازآوری با گاز با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک برای پیش‌بینی نرخ تولید نفت یک چاه. اکتشاف و تولید. شماره ۶۰ .

۱۳. فولادگر، امیرمسعود. قبادی، حسین. خداوردی‌سامانی، بهنام. (۱۳۹۱). شبیه‌سازی، طراحی و بهینه‌سازی عملکرد پمپ الکتریکی شناور (ESP) نصب شده در یکی از چاه‌های شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب. اکتشاف و تولید. شماره ۹۸.

14.Jones, K. R., Albert, A. M. I., Richardson, F. D., & Tubel, P. S. (1998). U.S. Patent No. 5,732,776. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

15.Golan, M., & Whitson, C. H. (1991). Well performance. Englewoods Cliffs^ eNJ NJ: Prentice Hall.

16.Bucaram, S. M., & Patterson, J. C. (1994). Managing artificial lift. JPT. Journal of petroleum technology, 46(4), 335-340.

17.Takacs, G. (2005). Gas lift manual. PennWell Books.

18. Ayatollahi, S., Narimani, M., & Moshfeghian, M. (2004). Intermittent gas lift in Aghajari oil field, a mathematical study. Journal of Petroleum Science and Engineering, 42(2), 245-255.

19. Schlumberger, (1999), "Gas Lift Design and Technology".

20. www.weatherford.com.

21. Fleshman, R., & Lekic, O. (1999). Artificial lift for high-volume production. Oilfield Review, 11, 48-63.

22. Lozada Aguilar, M. A., & Del Remedios Arredondo Monarrez, M. (2000, January). Gas Lift with Nitrogen Injection Generated In Situ. In SPE International Petroleum Conference and Exhibition in Mexico. Society of Petroleum Engineers.

23. "Electrical Submersible Pump Analysis and Design", (2001), Case Services, Ine.