

بررسی و پیش بینی پتانسیل خوردگی و رسوبگذاری در خطوط لوله انتقال پساب و لوله های مغزی چاه تزریق پساب واحد نمک زدایی رگ سفید

مسعود بیژنی و احسان خامه‌چی*

دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۹/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۸/۲/۱۴

چکیده

خوردگی و رسوبگذاری سالیانه میلیاردها دلار به صنعت نفت تحمیل می‌کند. خوردگی یکی از دلایل اصلی از بین رفتن فلزات در چاه‌ها و فرایندهای تولید می‌باشد که باعث افزایش هزینه نگهداری تجهیزات سرچاهی و درون چاهی برای تعویض و تعمیر علاوه بر کاهش تولید می‌شوند. این تحقیق با هدف تعیین پتانسیل نرخ خوردگی و رسوبگذاری پساب تولیدی واحد نمک‌زدایی رگ سفید و لوله‌های مغزی چاه دفع میدان رگ سفید با استفاده از شاخص‌های خوردگی و رسوبگذاری و ارائه راهکارهای مناسب برای حذف و به حداقل رساندن میزان خوردگی و رسوبگذاری در خطوط انتقال پساب و چاه دفعی پساب نمک‌زدایی رگ سفید انجام گرفت. در این تحقیق ۱۰ شاخص لانژلیه، رایزنر، پوکوریوس، تهاجمی، لارسن، شاخص مازاد لحظه‌ای، نیروی رانش، اشباع‌شدگی، شاخص رسوبگذاری و شاخص اشباع استیف - دیویس (S&DSI) و همچنین میزان نرخ خوردگی یکنواخت (CR_p) برحسب میلی متر بر سال (mm/year) پارامترهای نمونه برداری شده از آب پساب نمک‌زدایی رگ سفید و چاه دفع پساب نمک‌زدایی در سه روز متوالی جهت بررسی استفاده شد. نتایج بررسی ۱۰ شاخص خوردگی و رسوبگذاری و نرخ میزان خوردگی یکنواخت (CR_p) نشان‌دهنده بالابودن خوردگی پساب تولید شده (۶۷/۵ mm) همچنین با توجه به وجود مقادیر بسیار کم یون باریم (در پساب تولیدی به مقدار ۶۲۵/۵ mg/L رسوب سولفات باریوم و رسوب کربنات کلسیم به علت وجود یون کلسیم ۳۹۲۶ mg/L در پساب تولیدی در سرچاه و لوله‌های انتقال چاه دفعی تشکیل می‌شوند. کربنات کلسیم تنها رسوبی است که می‌تواند در چاه دفع پساب این واحد نمک‌زدایی در زمان تزریق پساب تشکیل شود.

کلمات کلیدی: شاخص خوردگی، رسوبگذاری، پساب نمک‌زدایی، اشباع‌شدگی

مقدمه

نفت و گاز می‌باشد. از آنجایی که آب سازند در مخازن زیرزمینی در همسایگی نفت و به دلیل اختلاف چگالی در بستر زیرین آن قرار دارد و قطرات آب به صورت اشباع در میان مولکول‌های نفت در لایه نفتی وجود دارد [۱].

خوردگی فلزات و رسوبگذاری در حضور آب یک مشکل مشترک در بیشتر صنایع از جمله صنعت

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2019.3662.2672) khamehchi@aut.ac.ir

تصفیه پساب امری ضروری به نظر می‌رسد [۷]. نمک زدایی رگ سفید روزانه به میزان ۳۱۲۶ بشکه بر روز (bbl/day) پساب ناشی از فراورش نفت میدان نفتی رگ سفید را تولید می‌کند. این میزان بالای پساب بدون هیچ استفاده‌ای به علت بالا بودن املاح و نمک‌های محلول^۱ (TDS) از طریق یک خط لوله ۶ اینچ به طول ۲۰ km ر به چاه دفع پساب تزریق می‌شود. تزریق این پساب به چاه دفعی خسارت زیادی ناشی از تشکیل رسوبات معدنی در خطوط لوله و تجهیزات فراورشی و نمک‌زدایی همچنین تجهیزات و ادوات سرچاهی^۲ و درون چاهی^۳ را در پی دارد. لذا حذف این آلاینده‌های و تامین آب با کیفیت مورد نیاز، نیازمند به کارگیری روش‌های تصفیه پیشرفته، کارآمد و همچنین اقتصادی می‌باشد. یکی از روش‌های غیر مستقیم جهت تعیین پتانسیل خوردندگی و رسوب‌گذاری پساب‌های واحدهای نمک‌زدایی، شاخص‌های خوردندگی و رسوب‌گذاری می‌باشد. این شاخص‌ها بیانگر خصوصیات کیفی آب می‌باشند. ارزیابی دقت شاخص‌های خوردندگی و رسوب‌گذاری براساس توانایی آنها در تعیین حالت‌های تحت اشباع، اشباع^۴ و فوق اشباع^۵ آب برحسب کربنات کلسیم یا کلسیت و نیز پیش‌بینی ظرفیت پساب در تشکیل انواع رسوبات مختلف کربنات کلسیم (کلسیت)، سولفات باریوم (باریت) و سولفات کلسیم (انیدریت) می‌باشد [۸]. مطالعه حاضر با هدف تعیین میزان خوردندگی و رسوب‌گذاری پساب نمک‌زدایی رگ سفید با استفاده از شاخص‌های خوردندگی و رسوب‌گذاری انجام شد. این مقاله به بررسی و پیش‌بینی شاخص‌های خوردندگی و رسوب‌گذاری لوله‌های مغزی چاه دفعی پساب نمک‌زدایی رگ سفید و لوله سطحی دفع

بنا براین در زمان تولید نفت از مخزن، آب یکی از اجزاء اصلی جریان نفت بوده که علاوه بر خوردگی و رسوب‌گذاری در لوله‌های تولید، خطوط لوله و تجهیزات سرچاهی، کیفیت نفت را پایین آورده و باید در حد امکان در تفکیک‌گرهای سرچاهی و تجهیزات موجود در کارخانجات بهره‌برداری و نمک‌زدایی میزان آن را به حد استانداردهای جهانی جهت صادرات و یا خوراک ورودی پالایشگاه‌ها رساند [۲] و [۳]. خوردگی می‌تواند به صورت تخریب، فساد یا تغییر و دگرگونی و مشخصات مواد (به‌طور ویژه فلزات) توسط واکنش‌های شیمیایی، الکتروشیمیایی و میکروبی در آن محیط می‌باشد. کاهش خوردگی یک بخش کامل صحیح از مسائل تضمین جریان رقابتی در سیستم‌های نفت و گاز می‌باشد و در همه بخش‌های از عمر یک میدان نفتی مثل رشته‌های جداری تا سکویهای تولیدی، از حفاری تا ترک چاه را در بر می‌گیرد و هزینه زیادی را به صنعت نفت تحمیل می‌کند [۴].

از آنجائی که مخازن نفتی ایران در نیمه دوم عمر خود می‌باشند که این عامل سبب کاهش ضخامت لایه نفتی و بالا آمدن و در نتیجه تولید بیشتر آب شور و رسوبات معدنی همراه با تولید نفت می‌شود، که در کارخانجات نمک‌زدایی به واسطه فراورش نفت خام، بعد از طی چند مرحله، این آب شور از نفت جدا شده و در چاه‌های دفع پساب دفع می‌شود [۵].

آب زائد و پساب واحدهای نمک‌زدایی یه منظور رعایت مسائل زیست محیطی به چاه‌های دفعی تزریق می‌شوند. تجمع ذرات جامد معلق و ذرات نفتی همراه پساب دفعی در دهانه چاه‌های تزریق پساب واحدهای نمک‌زدایی منجر به گرفتگی خلل و فرج سنگ مخزن و کاهش نفوذپذیری آنها می‌گردد [۶]. این موضوع همواره یکی از دغدغه‌های عملیاتی می‌باشد و شرکت‌های بهره‌برداری در این زمینه متحمل هزینه‌های زیادی شده‌اند. در راستای رفع این مشکل در واحدهای نمک‌زدایی استفاده از سیستم

1. Total Dissolved Solids
2. Wellhead
3. Down hole
4. Under Saturation
5. Saturation
6. Supersaturation

و ۷ اردیبهشت ماه سال ۱۳۹۶ اقدام به نمونه‌گیری از پساب تزریقی و همچنین آب تصفیه شده برای نمک‌زدایی از نفت خام به‌عنوان آب تزریقی به نفت خام گردید که نتایج حاصل از آزمایشات پساب و بررسی‌های مدل‌سازی در جدول ۱ و ۲ و نتایج آزمایشگاهی دوره‌ای ماهیانه از پساب خروجی نمک‌زدایی در جدول ۳ آورده شده است. این داده‌ها عبارتند از: دما، pH، غلظت کلسیم، غلظت بی‌کربنات، مجموع جامدات محلول (TDS) و هدایت الکتریکی (EC)، مجموع آنیون‌ها و کاتیون‌ها، کربنات. pH با استفاده از دستگاه pH meter با کالیبراسیون روز و به صورت درجا در محل نمونه‌برداری شده است. ولی اندازه‌گیری قلیائیت، سختی کلسیم و TDS مطابق با دستورالعمل ذکر شده در کتاب استاندارد متد در آزمایشگاه انجام گرفت [۹ و ۱۰].

پساب این واحد نمک‌زدایی پرداخته و راهکارهای عملیاتی برای به حداقل رساندن میزان خوردگی و رسوب‌گذاری ارائه کرده است.

مواد و روش‌ها روش کار

به منظور بررسی میزان خوردگی و رسوب‌گذاری پساب نمک‌زدایی رگ سفید از پارامترهای شیمیایی پساب تولیدی این واحد نمک‌زدایی استفاده شده است. با مراجعه مستمر به واحد مذکور و بررسی و مطالعه اسناد و مدارک فرایندی کارخانه و نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های پساب که در بایگانی آزمایشگاه شیمیایی کارخانه موجود بود و همچنین با هماهنگی پرسنل آزمایشگاه و پرسنل عملیات کارخانه طی دو روز متوالی در تاریخ‌های ۶

جدول ۱ پارامترهای متوسط آب تصفیه شده برای نمک‌زدایی از نفت خام برای تزریق به نمک‌زدایی رگ سفید

پارامتر اندازه‌گیری شده	واحد	مقدار
کلسیم (Ca^{+2})	mg/L	۱۵۲
منیزیم (Mg^{+2})	mg/L	۲۹
کلور (Cl^-)	mg/L	۷۸۱
بیکربنات (HCO_3^-)	mg/L	۲۴۴
سولفات (SO_4^{2-})	mg/L	۳۵۰
سدیم (Na^+) و پتاسیم (K^+) برحسب Na	mg/L	۰
سختی کل (TH)	mg/L as $CaCO_3$	۵۰۰
سختی موقت	mg/L	۲۰۰
سختی دائم	mg/L	۳۰۰
مواد جامد محلول (TDS)	mg/L	۱۶۴۶
باریم (Ba^{+2})	mg/L	۰
آهن (Fe^{+2})	mg/L	۰
فشار جزئی دی‌اکسید کربن (P_{CO_2})	%	۴/۳۰
قلیائیت کل (Total Alkalinity)	mg/L as $CaCO_3$	۲۰۰
قلیائیت کل (Total Alkalinity)	mg/L as HCO_3^-	۲۴۲
قدرت یونی	Molal	۰/۰۲۸۴
هدایت الکتریکی	L/ohm-cm	۰/۰۰۳۴۱
درجه شوری	mg/l	۱۲۸۷
pH	-	۷/۶
چگالی نسبی (STP)	g/mL	۰/۹۹۸

جدول ۲ پارامترهای متوسط مورد بررسی در اندازه‌گیری پتانسیل خوردگی و رسوب‌گذاری پساب واحد نمک‌زدایی رگ سفید

پارامتر اندازه‌گیری شده	واحد	مقدار
کلسیم (Ca ²⁺)	mg/L	۳۹۲۶
منیزیم (Mg ²⁺)	mg/L	۳۶۴۰
کلرور (Cl)	mg/L	۴۶۲۹۵
بیکربنات (HCO ₃)	mg/L	۱۲۵
سولفات (SO ₄ ⁻²)	mg/L	۱۱۲/۵
پتاسیم (K ⁺)	mg/L	۹۰
سدیم (Na ⁺)	mg/L	۱۸۳۱۶/۵
سختی کل (TH)	mg/L as CaCO ₃	۲۴۷۳۴/۸۲۴
مواد جامد محلول (TDS)	mg/L	۷۲۵۱۵
باریم (Ba ²⁺)	mg/L	۵/۶۲۵
آهن (Fe ²⁺)	mg/L	۱
دی اکسید کربن (CO ₂)	mg/L	۱۲۰/۲۲۲
فشار جزئی دی اکسید کربن (P _{CO₂})	%	۶/۱۱
فشار جزئی دی اکسید کربن	psi	۱۹/۵۵۲
سولفید هیدروژن (H ₂ S)	mg/L	۲۰
قلیابیت کل (Total Alkalinity)	mg/L as CaCO ₃	۱۰۲/۴۵۹
قلیابیت کل (Total Alkalinity)	mg/L as HCO ₃	۱۲۵
قدرت یونی	Molal	۱/۳۲۵
هدایت الکتریکی	μs/cm	۱۱۳۴۵۴/۵
pH	-	۶
چگالی نسبی (STP)	g/mL	۱/۰۴۸

جدول ۳ نتایج آزمایشگاهی پساب خروجی پساب واحد نمک‌زدایی رگ سفید ۱ براساس آزمایشات دوره‌ای ماهیانه

Disposal Tank	Elec.Static		Coalescer Tank	Dilution Tank	واحد	آزمایش
	B	A				
۴۴	۴۴	۴۳	۴۲	۴۲	°C	Temp.
۰/۹	۱/۱	۱	۰/۹	۱/۱	ppm	Disol.O ₂
-	-	-	-	۲	ppm	SO ₃
۵/۴	۵/۳	۵/۵	۵/۶	۷/۲	--	pH
۱۹	۱۹	۱۹	۱۸	۱۸	ppm	H ₂ S
۴۰	۲۸	۴۵	۳۰	۲۰	ppm	CO ₂
۰/۸۰	۰/۲۲	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۱۷	ppm	Total Fe
۳۷	۳۵	۳۴	۳۰	۲۴	ppm	Corr.inh.
منفی	مثبت	مثبت	مثبت	مثبت	M.O ml	S.R.B

بحث و نتایج

بررسی انواع شاخص‌های پیش‌بینی کننده خوردگی و رسوب‌گذاری

معمولاً، اندازه‌گیری‌های کنترل خوردگی از طریق اجرای مدل‌های آماری، تجربی و یا مدل (شاخص)های مکانیکی پتانسیل خوردگی است که به راحتی تابعی از پارامترهای مرتبط کیفی آب مانند pH، کلیتیت و سختی کلسیم می‌باشد [۱۱]. روش‌های متفاوتی برای پیش‌بینی پتانسیل رسوب‌گذاری یا تمایل به ایجاد خوردگی وجود دارد. ذکر این نکته ضروری است که این روش‌ها معمولاً بر اساس تعادلات شیمیایی استوار شده‌اند و فقط می‌توانند مشخص کنند که چه اتفاقی خواهد افتاد، اما دینامیک مسئله را بررسی نمی‌کنند. ساده‌ترین روش برای بررسی این مسئله به کارگیری آنالیز آب در تعیین تمایل به رسوب‌گذاری یا خوردگی با استفاده از روابط شاخص‌های خوردگی و رسوب‌گذاری است. این روابط که شامل شاخص‌های لانژلیه^۱ (LSI) [۱۲]، رایزنر^۲ (RI) [۱۳]، پوکوریوس^۳ (PSI) [۱۴]، تهاجم^۴ (AI) [۱۵]، لارسن-اسکولد^۵ (LR) [۱۶]، مازاد لحظه‌ای^۶ (MF) [۱۷]، نیروی رانش^۷ [۱۸]، اشباع‌شدگی^۸ (SR) [۱۹-۲۱] و شاخص اشباع استیف - دیویس^۹ (S&DSI) که براساس میزان تشکیل کربنات کلسیم (CaCO₃) می‌باشد [۲۲-۲۴]. شاخص‌های خوردگی استفاده شده در این مطالعه در جدول ۴ ارائه شده‌اند.

نتایج حاصل از بررسی شاخص‌های خوردگی در پساب نمک‌زدایی

در جدول ۵ نتایج مربوط به آنالیز شاخص خوردگی و رسوب‌گذاری پساب نمک‌زدایی رگ سفید نشان داده می‌شود. آزمایشات تعیین کیفیت طبق استانداردهای ایران و بین‌المللی انجام شده است.

همان‌طور که در جدول ۵ مشاهده می‌گردد، مقدار شاخص لانژلیه کمتر از صفر است، بنابراین آب خورنده و خوردگی متوسط و نسبت به ترکیب کربنات

کلسیم در حالت تحت اشباع قرار دارد، بنابراین شرایط تشکیل رسوب‌گذاری را ندارد. مطابق شاخص رایزنر از آنجائیکه مقدار شاخص بالاتر از ۷ و مقدار بسیار بالایی دارا است، بنابراین پساب نمک‌زدایی خوردگی بالایی برای لوله‌های انتقال پساب و همچنین ادوات و تجهیزات درون چاه^{۱۰} دفع پساب نمک‌زدایی رگ سفید ۱ دارد. بنابراین با توجه به این شرایط در دراز مدت نیاز به عملیات تعمیر چاه و عملیات اسیدکاری برای از بین بردن این خوردگی ضروری است. میزان شاخص پوکوریوس (PSI) بالاتر از ۶ است، بنابراین پساب نمک‌زدایی توانایی تشکیل رسوب کربنات کلسیم ندارد و پساب دارای خاصیت خوردگی در تجهیزات و لوله مغزی چاه دفع پساب می‌باشد. شاخص تهاجم (AI) برای پساب نمک‌زدایی کمتر از ۸ می‌باشد بنابراین نرخ خوردگی در این پساب بسیار بالا و خطرناک می‌باشد. همچنین از آنجائیکه میزان شاخص نیروی رانش (DFI) کمتر از ۱ است بنابراین حلالیت رسوب کربنات کلسیم در آب بسیار بالا است و شرایط خوردگی تنها برای این پساب برقرار است. شاخص لارسون-اسکاد (LR) در پساب تولیدی این واحد نمک‌زدایی دارای مقدار بسیار بیشتری از نرخ نرمال ۱/۲ دارد از اینرو پتانسیل تشکیل خوردگی در این پساب شدید و نوع خوردگی با این نرخ بالا عموماً از نوع موضعی مطابق این شاخص می‌باشد. میزان شاخص مازاد لحظه‌ای، شاخص اشباع شدگی (SR) و شاخص اشباع استیف - دیویس (S&DSI) نشان‌دهنده این نکته است که پتانسیل رسوب‌گذاری برای رسوب کربنات کلسیم وجود ندارد و غلظت یون‌های کلسیم و بیکربنات برای تشکیل این رسوب در مقابل غلظت سایر یون‌ها پایین و همچنین حلالیت این رسوب بسیار بالا می‌باشد.

1. Langelier Saturation Index
2. Ryznar Stability Index
3. Puckorius Scaling Index (PSI)
4. Aggressiveness Index
5. Larson-Skold Index
6. Momentary Excess Index
7. Driving Force Index
8. Saturation Level Index
9. Stiff-Davis Index (SDI)
- 10 Tubing

جدول ۴ مکانیسم‌های اصلی شاخص‌های خوردگی و رسوب‌گذاری آب

مراجع	حد رسوب گذاری	حد خوردگی	محاسبه	رابطه	نوع شاخص
[۱۳]	$LI > 0$	$LI < 0$	$DFI = ([pCa^{+2}][CO_3^{-}]) / K_{sp}$ $pH = -\log[H^+]$ $[Alk] = [CO_3^{(-2)}] + 1/2[HCO_3^-] + 1/2[OH^-] - 1/2[H^+]$	$LI = pH_s - pH$	شاخص لانژلیه (اشباع) (LSI)
[۱۳]	$RI < 4$	$RI > 7$	$pH_s = pk_{a2} + pCa^{+2} - pk_s - \log(2[Alk_{initial}]) - \log \gamma_m$ $pH = -\log[H^+]$ $[Alk] = [CO_3^{(-2)}] + 1/2[HCO_3^-] + 1/2[OH^-] - 1/2[H^+]$	$RI = 2pH_s - pH$	شاخص رایزنر (پایداری) (RI)
[۱۴]	$PSI < 6$	$PSI > 6$	$pH_{eq} = 1.465 \log(T - Alk) + 4.54$ $[Alk] = [CO_3^{(-2)}] + 1/2[HCO_3^-] + 1/2[OH^-] - 1/2[H^+]$	$PI = 2pH_s - pH_{eq}$	شاخص پوکوریوس (PSI)
[۱۵]	$AI \geq 12$	$AI \leq 10$	$[Alk] = [CO_3^{(-2)}] + 1/2[HCO_3^-] + 1/2[OH^-] - 1/2[H^+]$	$AI = pH + \log_{10}(Ca^{(2+)}) (Alk)$	شاخص ته‌اجم (AI)
[۱۸]	$DFI > 1$	$DFI < 1$	$K_{sp} = \{Ca^{+2}\} \{CO_3^{-2}\}$	$DFI = ([Ca^{2+}][CO_3^{-}]) / K_{sp}$	شاخص نیروی رانش (DFI)
[۱۷]	$MF > 0$	$MF < 0$	$K_{sp} = ([Ca^{+2}] - X)([CO_3^{-2}] - X)$ $A = I$ $B = -[Ca^{+2}] - (ALK + [H^+]) - \left(\frac{K_w}{[H^+]}\right) \left(\frac{K_2}{[H^+] + 2K_2}\right)$ $C = -K_s' + [Ca^{+2}] - (Alk + H^+) - \left(\frac{K_w}{[H^+]}\right) \left(\frac{K_2}{[H^+] + 2K_2}\right)$	$X = \frac{-B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$	شاخص مازاد لحظه‌ای (ME)
[۱۶]	$LR < 0.8$	$LR > 1.2$	-	$LR = \frac{(\sum Cl^- + \sum SO_4^{-2})}{(\sum HCO_3^- + \sum CO_3^{-2})}$	شاخص لارسن-اسکولد (LR)
[۱۹] [۲۱]	$SR > 1$	$SR < 1$	$K_{sp} = \{Ca^{+2}\} \{CO_3^{-2}\}$ $\alpha_i = [C_i] \gamma_i$ $Me = Ca^{+2}, An = HCO_3^- \text{ and } CO_3^{-2}$ $Me = Ca^{+2}, An = HCO_3^-, CO_3^{-2}$ $I = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i Z_i^2$	$SR = \frac{[Me][An]}{K_{sp}(P, T, I)}$ <p>or</p> $SR = SR = \frac{a_{Me} \times a_{An}}{K_{sp}(P, T, I)}$	شاخص اشباع شدگی (SR)
[۲۴-۲۲]	$LSI > 1$	$LSI < 1$	$pCa = -\log_{10}[Ca^{+2}]$ $pCa = -\log_{10}[TotalAlk]$	$SDSI = pH - pCa - pAlk - K$	شاخص اشباع - استیف دیویس (S&DSI)

جدول ۵ محاسبه شاخص‌های خوردگی و رسوب‌گذاری پساب نمک‌زدایی رگ سفید

شاخص	مقدار	تجزیه و تحلیل
LI	-۲/۸۸	خوردگی متوسط
RI	۱۱/۷۷	خوردگی شدید
PSI	۱۷/۶۱	عدم تمایل به رسوب‌گذاری - خوردگی می‌تواند رخ دهد
AI	۸/۸۸	به شدت خورنده
DFI	۰/۰۰۰۶۲	آب نسبت به کربنات کلسیم زیر اشباع است - خورنده بودن آب
LR	۱/۷۷	خوردگی موضعی
ME	-۰/۰۰۰۵۴	آب نسبت به کربنات کلسیم زیر اشباع است - خورنده بودن آب
SR	۰/۰۰۰۵۲	آب نسبت به کربنات کلسیم زیر اشباع است - خورنده بودن آب
SDSI	-۱/۲۵	آب نسبت به کربنات کلسیم زیر اشباع است - عدم رسوب‌گذاری

سیالات هیدروکربوری نسبت به رسوب‌گذاری یک رسوب جامد اغلب با عبارت شاخص اشباع (SI) که به صورت لگاریتم حاصل ضرب غلظت یون شبکه به ثابت تعادل تعریف می‌شود [۲۶]. در واقع برای محاسبه حلالیت اجزا نمک‌های محلول در آب و تشکیل رسوب‌گذاری و به صورت رابطه زیر می‌باشد [۲۷]:

$$SI = \log(SR) = \log \frac{[Me][An]}{K_{sp}(P, T, I)} = \log\{[Me][An]\} - \log K_{sp}(P, T, I) \quad (1)$$

در حالیکه گروه‌ها بیانگر غلظت یون‌ها برحسب مولار و فاکتور حاصل ضرب حلالیت شرطی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$pK_{sp} = -\log pK_{sp} = -\log K_{sp} \quad (2)$$

در روابط بالا [M] یون‌ها یا کاتیون‌های مثبت مثل Ca^{+2} [An] آنیون‌ها یا یون‌های منفی مثل بیکربنات (HCO_3) و K_{sp} ضریب حلالیت در محلول آب شور تحت شرایط واکنش می‌باشد. همچنین در این روابط، دما (T) برحسب درجه فارنهایت ($^{\circ}F$)، فشار (P) برحسب Psia و قدرت یونی (I) برحسب مولال محلول می‌باشد و عبارت (P و T و I) در جلو رابطه فوق نشان‌دهنده وابستگی فاکتور حلالیت

بنابراین با توجه به این شاخص‌ها، پتانسیل خوردگی در این پساب تولیدی شدید می‌باشد که در درازمدت سبب خوردگی در لوله‌های مغزی، لوله‌های انتقال پساب، وسایل سرچاهی و درون چاه پساب نمک‌زدایی رگ سفید می‌شود.

نتایج حاصل از بررسی شاخص رسوب‌گذاری در پساب نمک‌زدایی

توانایی پیش‌بینی تشکیل رسوبات معدنی یک موضوع چالش برانگیز در صنعت نفت می‌باشد. انواع روش‌های پیش‌بینی براساس حلالیت انواع رسوبات معدنی معمول مخازن نفتی پیشنهاد شده است. مدل‌های موجود براساس ترمودینامیک و محدودیت داده‌های حلالیت فقط می‌تواند پتانسیل تشکیل رسوب را پیش‌بینی کند. این مدل‌ها شامل مدل‌های اسیف و دیویس (۱۹۵۲a، ۱۹۵۲b)، اوده و تامسون (۱۹۸۲)، والونی و اسکیلرن (۱۹۸۲)، وتر و کانداریا (۱۹۸۰)، وتر و همکارانش (۱۹۸۲)، خاراکا و همکارانش (۱۹۸۸)، آتکینسن و همکارانش (۱۹۹۲)، تد و یوان (۱۹۹۱) و یبواه و همکارانش (۱۹۹۳) هستند [۲۵].

تمایل رسوب‌گذاری از آب شور تولید شده همراه

($SI > 0$) می‌باشد. بنابراین این رسوبات در چاه مورد مطالعه در درصد‌های بالای اختلاط دو آب نمی‌توانند تشکیل شوند. شکل ۳ میزان تشکیل رسوبات کربنات کلسیم و سولفات باریوم با گذشت زمان تزریق پساب نمک‌زدایی نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با گذشت زمان تزریق میزان تشکیل رسوب کربنات کلسیم تمایل به کاهش رسوب‌گذاری دارد. علت کاهش را می‌توان به اختلاط آب پساب نمک‌زدایی و آب سازند، کم شدن غلظت ترکیبات یونی از جمله یون کلسیم و بیکربنات در ترکیب دو آب و در نهایت کم شدن میزان شاخص اشباع‌شدگی و رسوب‌گذاری بیان کرد. بنابراین در شکل ۳ همانند شکل‌های ۱ و ۲ میزان تمایل رسوب‌گذاری کربنات کلسیم با زمان تزریق و اختلاط آب‌ها کاهش می‌یابد، در نتیجه همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود تنها رسوب کربنات کلسیم می‌تواند در این چاه در زمان تزریق تشکیل شود.

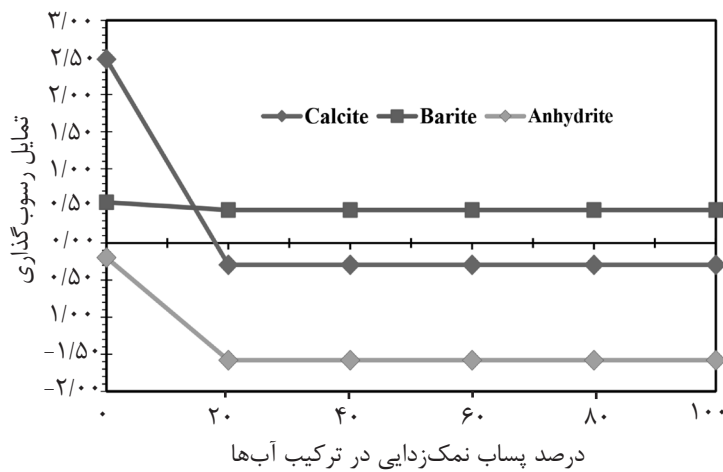
پیش‌بینی نرخ خوردگی در لوله‌های مغزی چاه دفعی تزریق پساب کارخانه نمک‌زدایی رگ سفید در واحدهای نمک‌زدایی به واسطه فرآورشی که بر روی نفت خام صورت می‌گیرد، پساب حاصل از این فرآورش حاوی مقادیر بالایی از نمک‌های معدنی مختلفی از جمله $CaCl_2$ ، $MgCl_2$ ، $NaCl$ و دیگر نمک‌ها، ترکیبات اسیدی و همچنین باکتری‌های احیاء‌کننده سولفات^۱ و اکسیژن محلول می‌باشد که به‌واسطه واکنش شیمیایی صورت گرفته بین این نمک‌ها و سایر ترکیبات فوق رسوبات معدنی مختلفی از جمله کربنات کلسیم، فسفات کلسیم، سولفات کلسیم، اکسید آهن، کربنات منیزیم و سیلیکات منیزیم تشکیل می‌گردد. تشکیل این رسوبات در خطوط لوله انتقال باعث تشکیل پیل‌های غلظتی اکسیژن گردیده که به‌واسطه کمتر بودن میزان اکسیژن محلول در زیر رسوب، عملیات انتقال جرم صورت گرفته و وجود یون‌های کلراید نیز به عنوان یک تسریع کننده، بروز خوردگی‌های حفره‌ای در زیر رسوبات را تشدید می‌کند.

ثابت شرطی تعادل به فشار، دما و قدرت یونی می‌باشد. بنابراین توسعه و گسترش شاخص‌های اشباع برای انواع رسوبات مختلف بستگی به پیدا کردن مقادیر ثابت‌های تعادلی (K_{sp}) که تابعی از قدرت‌های یونی، دماها و فشارهای معمول در صنعت نفت می‌باشند [۲۸]. تفسیر شاخص رسوب‌گذاری برحسب شاخص اشباع (SI) استفاده شده در این مطالعه در جدول ۶ ارائه شده‌اند.

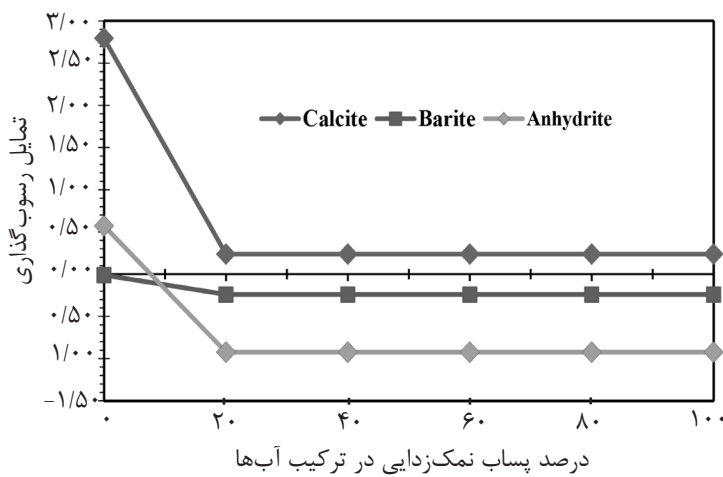
جدول ۶ تفسیر شاخص رسوب‌گذاری [۲۹]

مقدار SI	تفسیر
SI=0	آب در حالت اشباع و در تعادل قرار دارد
SI > 0	آب در حالت فوق اشباع نسبت به رسوبات قرار دارد، رسوب‌گذاری می‌تواند انجام بگیرد
SI < 1	آب شور زیر اشباع یا غیر اشباع، رسوب می‌تواند محلول باشد، عدم تشکیل رسوب (خاصیت خوردگی).

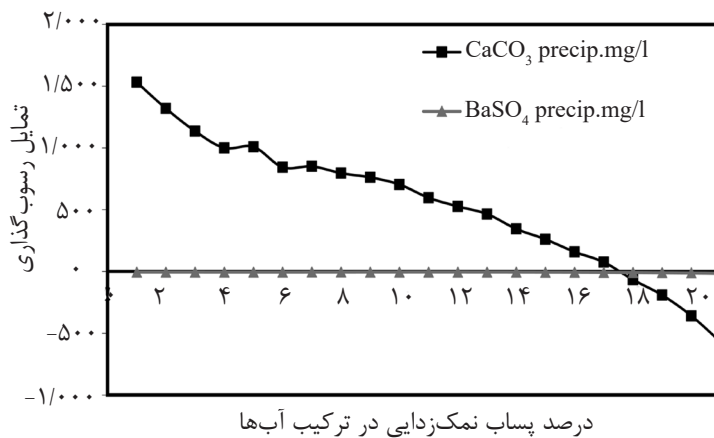
از رابطه‌های موجود و اشاره شده برای محاسبه شاخص رسوب‌گذاری رسوبات کربنات کلسیم (کلسیت)، سولفات باریوم (باریت) و سولفات کلسیم (انیدریت) در شرایط سرچاهی و ته چاهی، چاه دفعی واحد نمک‌زدایی رگ سفید استفاده است (شکل‌های ۱ و ۲). دما و فشار سرچاهی به ترتیب $77^\circ F$ و 320 psia و فشار و دمای ته چاهی $21^\circ F$ و 4152 psia است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود پتانسیل تشکیل رسوب کربنات کلسیم هم در سرچاه و هم در ته چاه بالا می‌باشد به‌طوریکه در سرچاه با افزایش درصد آب تزریقی برای جداسازی و نمک‌زدایی نفت و آب تولیدی همراه نفت میزان تمایل رسوب‌گذاری و شاخص رسوب‌گذاری (SI) کاهش می‌یابد. میزان تمایل رسوب‌گذاری سولفات باریوم در سرچاه ثابت و پتانسیل تشکیل در تجهیزات سرچاهی، در چاه مورد مطالعه دارد اما در شرایط ته چاهی تنها رسوبی که توانایی تشکیل را دارد رسوب کربنات کلسیم یا کلسیت می‌باشد و شاخص رسوب‌گذاری برای رسوبات سولفات باریوم و سولفات کلسیم با افزایش درصد اختلاط دو آب تزریقی برای نمک‌زدایی و آب تولیدی همراه نفت کمتر از صفر



شکل ۱ شاخص رسوب‌گذاری محاسبه شده برای رسوبات مختلف در شرایط سرچاهی.



شکل ۲ شاخص رسوب‌گذاری محاسبه شده برای رسوبات مختلف در شرایط ته چاهی



شکل ۳ تشکیل رسوبات برحسب زمان تزریق پساب در چاه پساب نمک‌زدایی

مواد معدنی می‌باشد. همچنین بیشترین میزان حلالیت این رسوب در اسید سولفوریک که یک اسید معدنی است مشاهده می‌گردد. لوله‌های مغزی چاه‌های تزریق پساب عمدتاً از جنس فولاد کربنی و با ضخامت‌های 0.408 in (10.44 mm) و 0.209 in ($7/4 \text{ mm}$) می‌باشد. بدون در نظر گرفتن تاثیر گازهای اسیدی خورنده CO_2 و H_2S ، باکتری‌های کاهنده سولفات (SRB) و با استفاده از سرعت خوردگی محاسبه شده mpy همچنین با توجه به ضخامت لوله‌های مغزی $10/4 \text{ mm}$ با محاسبه خوردگی بعد از گذشت ۳۰ سال، بروز نشستی و تخریب لوله‌های مغزی و لوله‌های انتقال پساب منطقی می‌باشد. بنابراین میزان سرعت خوردگی در حدود 0.253 mm می‌باشد. همچنین بر طبق استانداردهای موجود و نیز آزمایشات صورت گرفته، میزان خوردگی عمومی ناشی از آب دریا با میزان شوری متوسط 20000 ppm و pH در حدود خنثی تقریباً 0.05 mpy (0.05 in/year) می‌باشد. مطابق در حدود 90 mpy (0.09 in/year) می‌باشد. مطابق آنالیز شیمیایی صورت گرفته بر روی پساب واحد نمک‌زدایی مشاهده شد که میزان شوری در پساب این کارخانجات حداقل ۲ و حداکثر ۶ برابر این مقدار می‌باشد. بنابراین اگر میزان خوردگی حفره‌ای را در حدود ۳ برابر آب دریا برای میزان پساب تولیدی رگ سفید در نظر بگیریم میزان خوردگی حفره‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Crossion Rate} = \frac{\text{mpy}}{40} = \frac{90}{40} = 2.25 \text{ mm/yr} = 2.25 \frac{\text{mm}}{\text{yr}} \times 30 \text{ yr} = 67.5 \text{ mm} \quad (6)$$

بنابراین میزان نرخ خوردگی و همچنین نشستی ناشی این لوله‌ها در سال بسیار بالا می‌باشد. با توجه به قدمت این واحد نمک‌زدایی و همچنین چاه دفع پساب نمک‌زدایی می‌توان انتظار خوردگی و رسوب‌گذاری لوله‌های انتقال پساب و همچنین لوله‌های مغزی این چاه دفعی را انتظار داشت.

این نوع خوردگی یکی از مرموزترین نوع خوردگی‌های شناخته شده بوده که دارای قدرت تخریب زیادی می‌باشد و سطح لوله را دچار آسیب دیدگی جدی می‌کند. از طرفی به واسطه وجود گازهای سولفید هیدروژن و دی اکسید کربن در محیط پساب، اسیدهای ضعیف اسید سولفوریک و اسید کربنیک نیز تولید شده که این اسیدها باعث پائین آمدن pH محیط و در نهایت در منطقه پیل غلظتی باعث تشدید سرعت بروز خوردگی‌های حفره‌ای و عمومی می‌گردد [۳۰]. با از دست دادن آهن در طول خط لوله انتقال پساب تولید واحد نمک‌زدایی بدلیل خوردگی، می‌توان از داده‌های مقدار آهن محاسبه شده برای پیش‌بینی مقدار سرعت یک نواخت خوردگی کل از رابطه زیر استفاده نمود [۳۱]:

$$CR_u = \frac{(C_{Fe} \times Q_{H_2O})}{(0.082Ld)} \quad (3)$$

CR_u سرعت خوردگی یکنواخت برحسب C_{Fe} ، mpy مقدار آهن شمرده شده در آب تولیدی برحسب، Q_{H_2O} ، ppm دبی کل آب تولیدی برحسب L (bbl/day) طول لوله تولید برحسب فوت و d قطر داخلی لوله برحسب اینچ می‌باشد. که با توجه به میزان پساب تولیدی روزانه 3126 bbl و 20 km طول خط لوله پساب به چاه دفع پساب و قطر 6 in و همچنین آنالیز آب پساب نمک‌زدایی رگ سفید ۱ در جدول ۱، CR_u ، سرعت خوردگی یکنواخت mpy به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$CR_u = \frac{\text{mpy}}{40} = \frac{0.338}{40} = 0.00845 \text{ mm/yr} \quad (4)$$

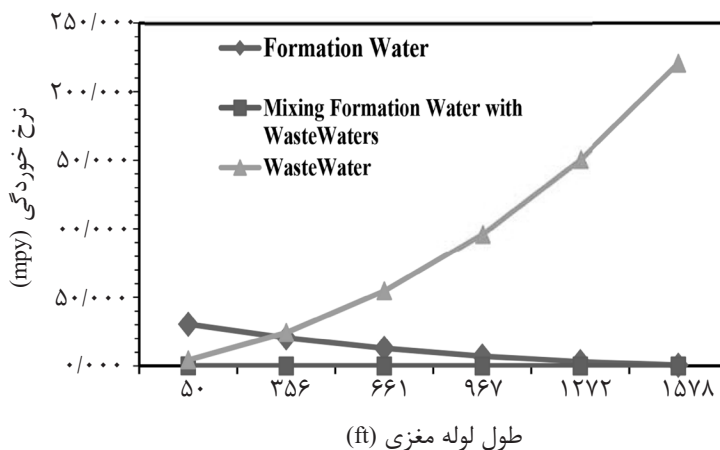
$$CR_u = 0.00845 \text{ mm/yr} \times 30 \text{ yr} = 0.253 \text{ mm} \quad (5)$$

در حالی که مقدار عمق نفوذ خوردگی در فلز برحسب میلی متر در سال برابر $\text{mpy}/40 = \text{mm/yr}$ می‌باشد.

آنالیز شیمیایی صورت گرفته بر روی رسوب، بیان کننده این نکته می‌باشد که قسمت اعظم رسوب تشکیل شده در سطح داخلی لوله‌های مغزی شامل

در نهایت بر شدت خوردگی در چاه مورد مطالعه می‌باشد. مطابق شکل ۴ با افزایش عمق و افزایش دما و فشار از سر چاه تا ته چاه میزان خوردگی ناشی از پساب دفعی افزایش می‌یابد که این مورد نشان‌دهنده کاهش حلالیت‌پذیری و همچنین افزایش شدت خوردگی لوله مغزی می‌باشد. بنابراین کنترل پساب نمک‌زدایی برای تزریق به چاه دفع پساب برای جلوگیری از خوردگی تجهیزات چاه دفع پساب و لوله مغزی این چاه ضروری است. همچنین آنالیز فیزیکوشیمیایی نمونه‌های آب نشان می‌دهد که آب سازند و پساب نمک‌زدایی دارای شوری بالا که کاتیون‌های اصلی در آب شامل کلسیم (Ca^{+2})، منیزیم (Mg^{+2})، سدیم (Na^{+}) و پتاسیم (K^{+}) و آنیون‌ها شامل یون‌های منفی بیکربنات (HCO_3^{-})، کلرور (Cl^{-}) و سولفات (SO_4^{-2}) می‌باشد که میزان غلظت کلر بسیار بالا و در حدود 46295 mg/L برای پساب نمک‌زدایی می‌باشد [۳۰].

همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود میزان خوردگی ناشی از پساب نمک‌زدایی با افزایش عمق و طول لوله مغزی بیشتر می‌شود و در شرایط دمایی و فشاری از سرچاه تا ته چاه بیشتر از نرخ خوردگی حاصل از آب سازند در ناحیه آبدۀ مخزن چاه رگ سفید و اختلاط آب سازند با آب دفع پساب نمک‌زدایی می‌باشد. این شکل براساس میزان غلظت‌های و ترکیب یونی آب سازند، اختلاط دو آب با هم و در نهایت پساب نمک‌زدایی به تنهایی در اعماق مختلف لوله مغزی از سرچاه تا ته چاه و در این اعماق نرخ خوردگی قابل پیش‌بینی و محاسبه می‌باشد. میزان نرخ خوردگی پساب نمک‌زدایی به علت بالا بودن میزان املاح و یون‌های مساعد تشکیل خوردگی، محدوده pH یا اسیدیته مناسب پساب، وجود گازهای خورنده به‌طور ویژه دی‌اکسید کربن (CO_2) به میزان $120/22 \text{ ppm}$ و اکسیژن به میزان 20 ppm می‌باشد. این عوامل از عوامل موثر بر افزایش شدت خوردگی در پساب نمک‌زدایی و



شکل ۴ نرخ خوردگی (mpy) در لوله مغزی چاه دفع پساب نمک‌زدایی رگ سفید

خوردگی و پارگی لوله‌های انتقال پساب، ادوات درون چاهی همانند لوله‌های مغزی در چاه دفع پساب ضروری می‌باشد. نرخ خوردگی ناشی از پساب نمک‌زدایی با افزایش عمق لوله مغزی و طول آن بیشتر می‌شود. در شرایط دمایی و فشاری از سرچاه تا ته چاه میزان نرخ خوردگی و رسوب‌گذاری

نتیجه‌گیری

در این مقاله، بررسی ۱۰ شاخص مهم و کاربردی خوردگی و رسوب‌گذاری نشان‌دهنده بالا بودن پتانسیل خوردگی این پساب و نوع خوردگی بیشتر از نوع موضعی می‌باشد. بنابراین استفاده از بازدارنده‌های ضد خوردگی برای جلوگیری از

تنها رسوب کربنات کلسیم پتانسیل رسوب‌گذاری دارد. در نتیجه شاخص رسوب‌گذاری یا فوق اشباع شدگی برای رسوبات سولفات باریتم و سولفات کلسیم با افزایش درصد اختلاط دو آب تزریقی برای نمک‌زدایی و آب تولیدی همراه نفت کمتر از صفر ($SI < 0$) می‌باشد. در نتیجه این رسوبات در چاه مورد مطالعه در درصدهای بالای اختلاط دو آب (پساب نمک‌زدایی و آب سازند) نمی‌توانند تشکیل شوند.

علائم و نشانه‌ها

I : قدرت یونی

K_{sp} : ثابت تعادلی (M_2)

K_{st} : ثابت حلالیت (M^{-1})

Me : کاتیون

An : آنیون

P : فشار (psia)

SI : شاخص اشباع

SR : نسبت اشباع

T : دما ($^{\circ}F$)

TDS : کل ذرات محلول (mg/L)

CR_u : سرعت خوردگی یکنواخت (mpy)

Q : دبی کل آب تولیدی (bbl/day)

C_{Fe} : غلظت یون های آهن (ppm)

پساب نمک‌زدایی بیشتر از آب سازند در ناحیه آبدۀ مخزن و اختلاط آب سازند با آب پساب نمک‌زدایی می‌باشد. علت این امر بالا بودن میزان املاح و یون‌های مساعد تشکیل خوردگی و رسوب‌گذاری، محدوده pH یا اسیدیته مناسب پساب، وجود گازهای خورنده و به‌طور ویژه دی اکسید کربن (CO_2) به میزان ۱۲۰/۲۲ ppm و سولفید هیدروژن (H_2S) به میزان ۲۰ ppm می‌باشد. با افزایش عمق و در نتیجه افزایش دما و فشار از سر چاه تا ته چاه میزان خوردگی ناشی از پساب نمک‌زدایی افزایش می‌یابد که این مورد نشان‌دهنده کاهش حلالیت‌پذیری و همچنین افزایش شدت خورنده بودن آب پساب برای افزایش شدت خوردگی لوله مغزی می‌باشد. میزان تمایل رسوب‌گذاری انواع رسوبات معدنی با توجه به شاخص رسوب‌گذاری و فوق اشباع شدگی (SI) نشان‌دهنده تشکیل شدن رسوبات کربنات کلسیم (کلسیت) در سرچاه و ته چاه می‌باشد و با افزایش ترکیب درصد آب همراه نفت (آب سازند) و آب تازه برای جداسازی نمک از نفت، میزان تمایل رسوب‌گذاری رو به کاهش می‌گذارد. میزان تمایل رسوب‌گذاری سولفات باریتم در سرچاه ثابت است، در نتیجه پتانسیل تشکیل این رسوب تنها در سرچاه در چاه مورد مطالعه وجود دارد. در شرایط ته چاهی

منابع

- [1]. Kumar S., Naiya T. K. and Kumar T., "Developments in oilfield scale handling towards green technology-A review". Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol. 169, pp. 428-444, 2018.
- [2]. Bijani M., Mosayebi Behbahani R and Moghadasi J., "Designing effluent treatment of rag-e-safid1 desalination plant using reverse osmosis process", Journal of Science and Today's World, vol.4 pp. 413-417, 2015.
- [3]. Farshad F.F. and Rieke H. H., "Gas well optimization: A surface roughness approach," CI/PC/SPE Gas Technology Symposium Joint Conference, Calgary, Alberta, Canada, p.8,2008.
- [4]. Brondel D., Edwards R. and Hyman A., "Corrosion in oil industry," schlumberger oilfield review, Journal ID: ISSN 0923-1730; CODEN: OIREE7, Autumn: pp 4-69, 1994.
- [5]. Murugavela K., Chockalingama K. S. and Sritharb K., "Progresses in improving the effectiveness of the single-basin passive solar still", Desalination, Vol. 220, pp. 677-682, 2008.
- [6] Shabani A., Kalantariasl A., Parvazdavani M., and Abbasi S., "Geochemical and hydrodynamic modeling of

- permeability impairment due to composite scale formation in porous media*", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 176, pp. 1071-1081, 2018.
- [7]. Kent Muhlbauer W., "*Pipeline risk management manual ideas*," Techniques, and Resource, Gulf Publishing Company, Burlington, USA, Third Edition, 2004.
- [8]. Doubra P., Kamran-Pirzaman A., Mohammadi A. H. and Hassanalizadeh R., "*Thermodynamic modelling of scale (Calcite, Barite, Anhydrite and Gypsum) deposition from brine*", Journal of Molecular Liquids, Vol. 230, pp. 96-103, 2017
- [9]. Rice E. W. and Bridgewater L., "*Standard methods for the examination of water and wastewater*," 20th, APHA/AWWA/WEF, Washington, DC, 2012.
- [10]. Annual Book of American Standard Test Method, 1992.
- [11]. Pishnamazi S. A. "*The water and its corrosion in industry which analysis of corroded samples*," Isfahan, Iran: Arcan Publication; 1998.
- [12]. Langelier W. F. "*The analytical control of anti-corrosion water treatment*," J. Am. Water Works Assoc; Vol 10, No. 28, pp .1521-1500, 1936.
- [13]. Ryznar J. W, "*A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water*," J. Am .Water Works Assoc; Vol 36, No. 3, pp .494-472, 1944.
- [14]. Puckorius P. R. and Brooke J. M., "*A new practical index for calcium carbonate scale prediction in cooling tower systems*," Corrosion, Vol. 47, pp. 280–284 1991.
- [15]. Hadi M., "*Development a software for calculation of eight important water corrosion indices*," in: Twelfth National Congress on Environmental Health, Shaheed Beheshti University of Medical Sciences, Tehran, 2009.
- [16]. Larson T. E. and Skold R. V. "*Laboratory studies relating mineral quality of water to corrosion of steel and cast iron*," Corrosion; Vol 14, No. 6, pp. 288-285, 1958.
- [17]. Dye J. F., "*Calculations of the effect of temperature on pH, free carbon dioxide and the three form of alkalinity*," J. Am. Water Works Assoc., Vol 44 ,p.356, 1952.
- [18]. Dye J. F. "*Review of anticorrosion water treatment*," J. Am. Water Works Assoc., Vol 56, No. 4, pp .465-457, 1964.
- [19]. Ohara M., and Reid R. C., "*Modelling crystal growth rates from solutions*," Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1973.
- [20]. Hosny R., Desouky S. E. M., Ramzi M., Abdel-Moghny Th., El-Dars F. M. S., and Farag A. B., "*Estimation of the scale deposits near wellbore via software in the presence of inhibitors*," Journal of Dispersion Science and Technology, Vol 30: pp.203–211, 2009.
- [21]. Oddo J. E., and Tomson M. B., "*Why scale forms and how to predict it*," Society of Petroleum Engineers Production and Facilities, Feb. 1994.
- [22]. Dow Water Solutions, FILMTEC™ Reverse Osmosis Membrane, Technical Manual, Form No. 609-00071-1009, pp. 1-181, 2013 .
- [23]. Stiff Jr H. A., Davis L. E., "*A method for predicting the tendency of oil field waters to deposit calcium carbon-*

- ate," Journal of Petroleum Technology, Vol 4, Issue 9, pp. 213-216, 1952.
- [24]. Peña J., Garralón A., Gómez M. and Garralón G., "The thermodynamic and geochemical significance of the Stiff and Davis stability index", Journal of Membrane Science, Vol. 427, pp. 375-380, 2013.
- [25]. Moghadasi J., Müller-Steinhagen H., Jamialahmadi M. and Sharif A., "Prediction of scale formation problems in oil reservoirs and production equipment due to injection of incompatible waters," Produced Water Management in Oil and Gas International Conference, Cairo, Egypt, Vol. 14, pp.25 – 28, 2006.
- [26]. Zhang P., Zhang Z., Liu Y., Kan AT., and Tomson MB. "Investigation of the impact of ferrous species on the performance of common oilfield scale inhibitors for mineral scale control", Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 172, pp. 288-96, 2019.
- [27]. Moghadasi J., Jamialahmadi M., Muller-Steinhagen H. and Sharif A., "Scale Formation in oil reservoir and production equipment during water injection (kinetics of CaCO_4 and CaCO_3 crystal growth and effect on formation damage)," SPE 82233, presented at the SPE European Formation Damage Conference, May 13– 14. Hague, Netherlands, 1–12. 2003b.
- [28]. Ferguson R. J., "Mineral scale prediction and control at extreme TDS," Paper No. IWC-11-77.
- [۲۹]. رعیتی ر. و شهریاری فهلیانی ر., "بررسی علل خوردگی لوله‌های مغزی (Tubing) چاه تزریق پساب شماره ۲۳ کارخانه نمک‌زدایی بی بی حکیمه ۲- گچساران"، دومین همایش ملی نفت، گاز و پتروشیمی، گچساران، ۱۶ و ۱۷ اسفند، ۱۳۹۱.
- [30]. Qiu Z., Xiong C., Ye Z., Yi R., Zhang N., "Wellbore anti-corrosion technique research in B block on the right bank of Amu Darya river sour gas field". Anti-Corrosion Methods and Materials, Vol. 66, No. 1, pp. 67-73, 2019.
- [31]. Chilingar G. V., Mourhatch R. and Al-Ghahtani G., "The Fundamentals of Corrosion and Scaling (A Handbook for petroleum and environmental Engineers)," Gulf Publishing company, Houston, TX, First Edition, 2008.