

# بررسی جامع کارخانه تصفیه آب یکی از میدان‌های نفتی ایران برای افزایش عملکرد و بهره‌وری آن

سکینه شکراله‌زاده\*<sup>+</sup>، سمانه آشوری، محمد زاهد زاده، مژگان رادمهر، عماد رعایایی

تهران، شرکت ملی نفت ایران، پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخازن نفت و گاز

**چکیده:** یکی از مؤثرترین روش‌های ازدیاد برداشت از مخزن‌های نفتی و نگهداری فشار مخزن، تزریق آب می‌باشد و کیفیت آب تزریقی مهمترین عامل در موفقیت آمیز بودن عملیات سیلاب‌زنی می‌باشد. از مسایل و مشکل‌های مهم به هنگام تزریق آب، خوردگی و بسته شدن مخزن می‌باشد که سبب کاهش تزریق پذیری مخزن و افزایش هزینه‌های عملیاتی می‌شود. بنابراین هدف اصلی کارخانه‌های تصفیه آب کنترل عامل‌های اساسی آب مانند ذره‌های جامد معلق، اکسیژن محلول، باکتری‌ها و مواد محلول رسوب‌زا می‌باشد. در این مقاله مراحل تصفیه آب در یک کارخانه تزریق آب دریا از دیدگاه خوردگی و مدیریت مواد شیمیایی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور بازنگری و ارزیابی مرحله به مرحله سامانه تزریق آب که شامل ۴۰ کیلومتر خط لوله، تصفیه ۳ مرحله‌ای، برج هوازدا و مواد شیمیایی می‌باشد انجام شده است. این کارخانه که ۲۸ سال از فعالیت آن می‌گذرد آب تزریقی مورد نیاز دو میدان را تأمین می‌کند. در طول این سال‌ها به دلیل خوردگی و کنترل نشدن ذره‌های جامد معلق، به سامانه و مخزن آسیب و خسارت وارد شده است. همچنین یکی از نقاط ضعف مهم این سامانه، نبود سامانه پایش خوردگی می‌باشد که هرگز مورد مطالعه دقیق قرار نگرفته است. بر اساس اطلاعات میدانی و آزمون‌های آزمایشگاهی، مشکل‌های مهم موجود در سامانه تزریق آب ناشی از تصفیه نامناسب، حضور رسوب‌ها و نیز باکتری احیاکننده سولفات می‌باشد. با توجه به نفوذپذیری لایه تولیدی مخزن، کمترین اندازه صافی می‌بایست ۲ μm باشد؛ در حالی که در کارخانه ۱۰ μm می‌باشد. استفاده از اکسیژن‌زدای نامرغوب (آمونوم بی سولفیت) در غلظت بیش از حد نیاز در برج هوازدا، سبب افزایش غلظت یون سولفات و در نتیجه تشکیل رسوب کلسیم سولفات می‌شود. چگونگی به‌کارگیری بازدارنده‌های رسوب و خوردگی و نیز مواد باکتری کش برای به دست آوردن بیشترین بازده و کارایی به طور جزئی بررسی شده است. در این مقاله با استفاده از روش استاندارد NACE TM0299-99، سامانه پایش خوردگی بر مبنای نقاط حساس چرخه تزریق آب طراحی و معرفی شده است که با توجه به شباهت کلی تمامی سامانه‌های تزریق آب، سامانه پایش طراحی شده در سایر میدان‌ها نیز قابل استفاده می‌باشد. همچنین مشخص شد که با کمی تغییر در محل تزریق مواد شیمیایی، کارایی سامانه ۳۰٪ افزایش می‌یابد. نتیجه این پژوهش، تصفیه مؤثرتر آب، آسیب کمتر سازند، کاهش هزینه‌ها و صرفه جویی اقتصادی همراه با افزایش عمر مفید تأسیسات می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پایش خوردگی، سیلاب زنی، ازدیاد برداشت، بازدارنده، رسوب، تصفیه آب، مواد شیمیایی، صاف کردن.

**KEY WORDS:** Corrosion monitoring, Water flooding, Enhanced recovery, Inhibitor, Scale, Water treatment, Chemicals, Filtration.

+E-mail: s\_shokrolahzadeh@yahoo.com

\*عده دار مکاتبات

## مقدمه

تولید از میدان نفتی مورد مطالعه از سال ۱۹۷۹ میلادی با فشار اولیه ۴۰۰۰ psi آغاز شد. مخزن آن کربناته با شکاف کم، نفوذ پذیری به نسبت پایین (۱۵ md) و تخلخل (۲۰٪) می باشد. این میدان شامل میدان های A، C، D، E و یک میدان نفتی مشترک با امارات متحده عربی است. تزریق آب به این میدان از سال ۱۹۸۳ میلادی به منظور حفظ فشار و افزایش برداشت آغاز شد و در سال ۱۹۸۹ میلادی به دلیل آسیب و کاهش تزریق پذیری مخزن، متوقف شد. در سال ۱۹۹۲ میلادی، بعد از اسید کاری، دوباره برای مدت بیش از یک سال تزریق انجام گرفت و سرانجام در سال ۱۹۹۴ میلادی دوباره تزریق آغاز شد و تا به حال ادامه دارد. در حال حاضر آب دریای خلیج فارس توسط دو کارخانه به میدان های نفتی C، D و E تزریق می شود. کارخانه ای که در این مقاله مورد بررسی قرار می گیرد در سال ۱۹۷۷ میلادی ساخته شد که ۷۰۰۰ بشکه در روز، آب تزریقی میدان های C و D را تأمین می کند [۱، ۲]. تشکیل رسوب، خوردگی میکروبی و ذره های جامد معلق از مسایل مهم در این کارخانه پس از سالها می باشد. با توجه به اینکه سرمایه هنگفتی برای ساخت و عملیات روزمره چرخه تزریق آب صرف می شود، از این رو حفظ و نگهداری این سامانه در شرایط بهینه، نیازمند اطلاع یافتن از میزان خوردگی، رسوب گذاری و تمایل رشد زیستی در نقاط گوناگون این سامانه است؛ در نتیجه این مهم در این پژوهش مورد بررسی دقیق قرار گرفته است.

## سامانه تزریق آب

همان گونه که در شکل ۱ دیده می شود؛ آب دریا از عمق ۲۰m سطح خلیج فارس توسط پمپ های بالا آورنده کشیده می شود. برای کنترل باکتری ها، سدیم هیپو کلریت تولیدی توسط دو دستگاه الکترولایزر به میزانی به ورودی این پمپ ها تزریق می شود، که باقیمانده کلر در خروجی صافی های ۱۰ میکرونی به اندازه ۰/۵ - ۰/۴ باشد. سپس آب، به صافی های ۷۶۲ میکرونی وارد می شود. بعد توسط ۲ km خط لوله فولاد کربنی با پوشش داخلی سیمانی ویژه به سمت صافی های ۵۰ میکرونی هدایت می شود. آب پس از عبور از صافی ۵۰ میکرونی وارد برج هوازدا به منظور کاهش اکسیژن محلول از ۸ ppm به ۰/۲ ppm می شود. در برج هوازدا از اکسیژن زدای آمونیوم بی سولفیت استفاده می شود.

ظرفیت این برج ۱۵۰۰۰۰ bbl/day، ارتفاع و قطر آن به ترتیب ۱۲/۵ m و ۳ m می باشد. آب خروجی از برج به پمپ های تقویتی وارد و سپس به سمت پمپ های تزریقی می رود. در فاصله پمپ های تقویتی تا تزریقی و قبل از صافی های ۱۰ میکرونی مواد ضد خوردگی، ضد رسوب و باکتری کش به سامانه افزوده می شود. سرانجام آب تصفیه شده توسط خط لوله ۲۰" فولاد کربنی به طول ۳۳ km با پوشش داخلی رزین و سیمان از جزیره به سکوی تزریق منتقل می شود.

## بخش تجربی

## مواد و وسایل

نمونه های آب و رسوب تهیه شده از نقاط گوناگون کارخانه، مواد شیمیایی ضد رسوب، باکتری کش و ضد خوردگی که از انبار و کارخانه نمونه گیری شدند.

دستگاه های: XRD, Potentiostat/Galvanostat, pH Meter, Coulter Counter, XRF و سایر لوازم و وسایل مورد نیاز برای انجام آزمایش ها.

## روش آزمایش

به منظور بررسی کارخانه تزریق آب ۱۲ نقطه نمونه گیری که شامل ۷ نقطه نمونه آب، ۲ نقطه نمونه رسوب و ۳ نقطه نمونه مواد شیمیایی بود انتخاب شد (شکل ۱). نمونه های آب شامل ورودی و خروجی کارخانه، بالا و پایین برج هوازدا، بعد از تزریق مواد شیمیایی و روی خط لوله ۲ km با پوشش سیمانی بود. برای بررسی اثرهای آب و هوا و نیز چگونگی نگهداری مواد شیمیایی بر کیفیت و کارایی آنها، از هر ماده شیمیایی دو نمونه که یکی از انبار و دیگری از کارخانه بود گرفته شد. نمونه ها در کارخانه به مدت ۱ تا ۲ هفته تحت تابش نور خورشید قرار می گیرند؛ در حالی که دمای محیط در بیشتر ماه های سال بالای ۴۰ °C و هوا مرطوب می باشد.

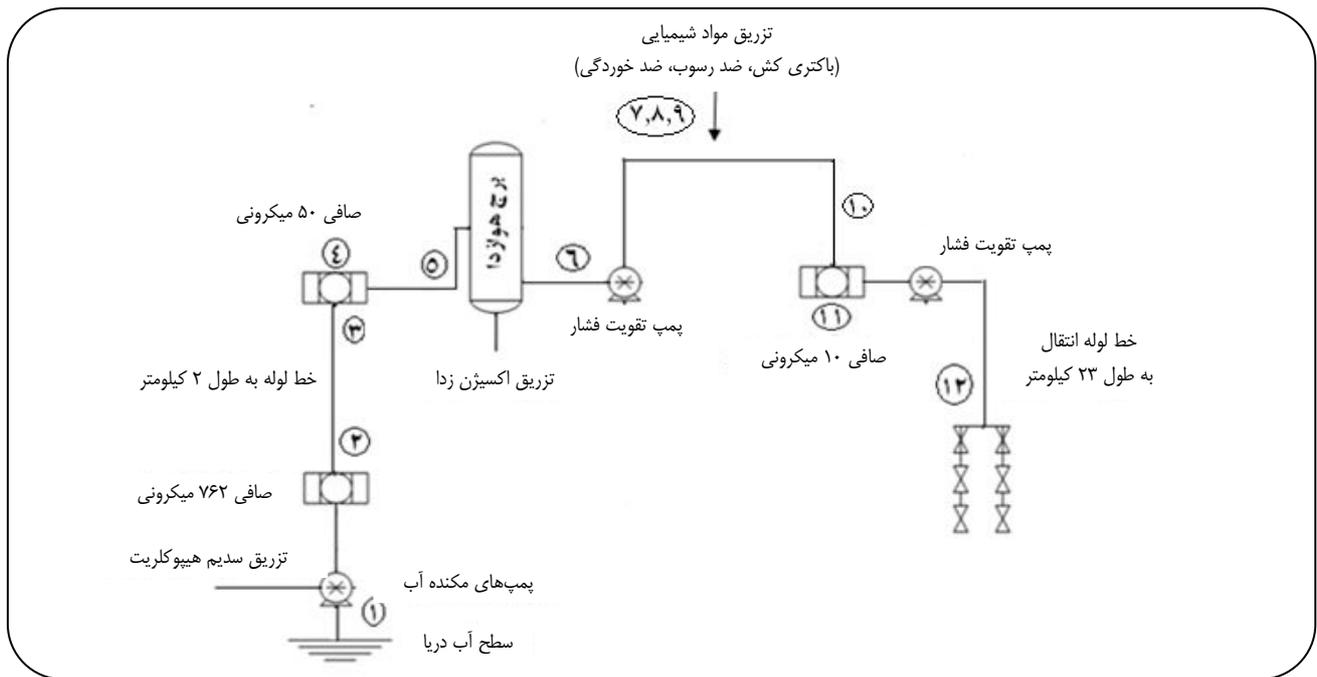
نمونه های آب و رسوب تجزیه شدند. غلظت یون های مهم مانند آهن، کلسیم، منیزیم، سولفات، کربنات و همچنین TSS<sup>(۱)</sup>، pH و قلیائیت اندازه گیری شد. با توجه به نتیجه های تجزیه آب، خوردگی و یا رسوب گذاری آب توسط اندیس استیف دیویس<sup>(۳)</sup> و مدل پیترز<sup>(۴)</sup> مشخص شد. کارایی و باقیمانده مواد شیمیایی

(۱) Total Suspended Solids

(۲) Total Dissolved Solids

(۳) Stiff &amp; Davis Index

(۴) Pitzer Model



شکل ۱- شماتیک کارخانه و نقطه‌های نمونه‌گیری.

در کارخانه می‌باشد. چنانچه شکل ۲ نیز بیانگر خوردگی در خط لوله ۱۸ اینچی کارخانه می‌باشد که به همین دلیل در طول انجام این پروژه تعویض شد.

کاهش وزن رسوبات صافی در دمای  $55.0^{\circ}\text{C}$  به میزان ۶۱٪ نشان دهنده منشا آلی رسوبات می‌باشد که می‌تواند تا قسمتی مربوط به جذب مواد شیمیایی افزوده شده به سامانه در پشت صافی باشد. مسئله جذب مواد شیمیایی توسط اندازه‌گیری باقیمانده ماده ضد رسوب، قبل و بعد از فیلتر ۱۰ میکرونی به اثبات رسید؛ چراکه نتیجه‌ها نشان داد که ۳۰٪ از ماده ضد رسوب پشت صافی جذب می‌شود (جدول ۳).

تجزیه XRF رسوب‌ها، نشان دهنده غلظت بالای یون آهن و کلسیم می‌باشد که مطرح کننده خوردگی و تشکیل رسوبات معدنی در سامانه می‌باشد. و آنالیز XRD، نشان دهنده فرآورده‌های خوردگی  $\text{FeO(OH)}$ ،  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  و  $\gamma\text{-FeO(OH)}$  می‌باشد. آزمایش‌های مربوط به باکتری‌های احیاءکننده سولفات (SRB)، توسط روش استاندارد API RP-38 نیز نشان دهنده فعالیت این میکروب در آب دریا، پشت صافی ۱۰ میکرونی می‌باشد.

بر اساس روش‌های استاندارد تعیین شد. سامانه پایش خوردگی با روش استاندارد<sup>(۱)</sup> NACE TM0299-99 طراحی شد.

## نتیجه‌ها و بحث

### تجزیه نمونه‌ها

تجزیه کامل نمونه‌های آب و رسوبات پشت صافی ۱۰ میکرونی در جدول ۱ و ۲ آمده است. چنانچه دیده می‌شود بعد از برج هوازدا غلظت یون سولفات از ۳۳۰۰ ppm به ۴۲۰۰ ppm افزایش یافته که سبب تشکیل رسوب سولفات می‌شود. با تزریق مواد شیمیایی که به تقریب اسیدی می‌باشند، TSS کاهش و TDS افزایش یافته است. همچنین در غلظت آهن کل تغییری دیده نمی‌شود. با توجه به pH آب تزریقی ( $\text{pH} = 7.5$ ) این آب به طور معمول خورنده نبوده و بیشتر به رسوب‌گذاری تمایل دارد. البته در صورت کنترل نکردن مناسب باکتری SRB<sup>(۲)</sup> در آب تزریقی، خوردگی از نوع میکروبی می‌تواند مطرح باشد که در این صورت آهن نامحلول در سامانه یا پشت صافی‌ها می‌ماند. با توجه به تجزیه رسوبات پشت صافی و بالا بودن مقدار آهن و نیز وجود باکتری SRB در نمونه‌ها خوردگی از مشکل‌های مطرح

(1) Standard Test Method: Corrosion Control and Monitoring in Seawater Injection System

(2) Sulfate Reducing Bacteria

جدول ۱- تجزیه نمونه های آب.

نقاط نمونه گیری	روش استاندارد (ASTM)	۱	۲	۳	۵	۶	۱۰	۱۲
SO <sub>4</sub> (mg/L)	D4130-08	۳۳۰۰	۳۳۰۰	۳۲۳۸	۳۳۰۰	۴۲۰۰	۳۰۰۰	۲۹۰۰
pH	D1293-12	۸٫۲	۸٫۱	۸٫۱	۸٫۱	۷٫۹	۷٫۹	۷٫۹
TDS(mg/L)	D5907-13	۴۲۰۰۰	۴۲۰۰۰	۴۲۰۰۰	۴۱۸۰۰	۴۲۷۰۰	۴۳۰۰۰	۴۳۰۰۰
TSS(mg/L)	D5907-13	۱٫۲	۱٫۲	۱٫۲	۰٫۷	۱٫۱	۰٫۹	۰٫۹
Alkalinity(mg/L)	D1067-11	۱۳۲	۱۳۶	۱۳۶	۱۳۶	۱۳۲	۱۳۲	۱۳۲
Ca(mg/L)	D511-09	۴۸۸	۴۹۶	۴۸۰	۴۸۸	۴۹۲	۵۰۰	۴۹۲
Mg(mg/L)	D511-09	۱۱۴۴	۱۱۴۴	۱۱۱۹	۱۱۰۹	۱۱۱۷	۱۱۲۷	۱۱۲۵
Fe(mg/L)	D1068-10	<۰٫۳	<۰٫۳	<۰٫۳	<۰٫۳	<۰٫۳	<۰٫۳	<۰٫۳
Cl(mg/L)	D512-12	۲۳۹۰۰	۲۳۹۰۰	۲۴۸۰۰	۲۴۸۰۰	۲۴۸۰۰	۲۴۸۰۰	۲۳۹۰۰

جدول ۲- تجزیه کامل رسوب صافی ۱۰ میکرونی.

نتیجه	واحد	نام تست
۶۱	Mass%	Loss @550°C
۶۹	Mass%	Loss @900°C
۴٫۵	Mass%	SiO <sub>2</sub>
۵٫۷	Mass%	Fe Content
۰٫۱	Mass%	Sr Content
۸٫۱	Mass%	Ca Content
۰٫۱۷	Mass%	Zn Content
۰٫۰۸	Mass%	K Content
۱٫۱	Mass%	Na Content
۰٫۴	Mass%	Mg Content
۰٫۲	Mass%	Cu Content
<۰٫۲	Mass%	Ti Content
۱٫۳	Mass%	S Content
<۰٫۱	Mass%	Cl Content

جدول ۳- باقیمانده ماده شیمیایی ضد رسوب قبل و بعد از صافی ۱۰ میکرونی.

نمونه	تجزیه اول (ppm)	تجزیه دوم (ppm)
شاهد	-	-
قبل از صافی ۱۰ میکرونی	۲۴	۲۴٫۶
بعد از صافی ۱۰ میکرونی	۱۶٫۵	۱۷٫۴
کاهش غلظت ماده شیمیایی (درصد)	۳۱٫۲۵	۲۹٫۲۶

نیز بیشتر می‌شود. به‌هرحال با توجه به نتیجه‌های مثبت آزمون SRB، پتانسیل برای خوردگی میکروبی (MIC<sup>(۱)</sup>) وجود دارد که توسط غلظت بالای یون آهن در نمونه رسوب‌ها به اثبات رسیده است. به منظور بررسی بیشتر و لحاظ نمودن ضریب فعالیت که اثر یون‌ها بر یکدیگر و اثر دما و فشار را در بر می‌گیرد از مدل ترمودینامیکی پیترز [۴،۵] در نرم افزار PVTSIM در دو دمای ۳۰°C و ۶۰°C استفاده شد. مدل پیترز از مدل‌های پیشرفته و مناسب ترمودینامیکی برای مدل‌سازی رسوب‌های معدنی در محلول‌های الکترولیت می‌باشد. محاسبه‌های مربوط به رسوب‌گذاری کلسیم کربنات نشان داد که این رسوب در سامانه تشکیل نمی‌شود؛ ولی کلسیم سولفات، استرانسیوم سولفات و باریت سولفات در نقطه‌های گوناگون کارخانه به‌ویژه بعد از برج هوازا دیده می‌شود. تمایل به رسوب‌گذاری دو رسوب اول با افزایش دما افزایش یافته ولی باریت سولفات کاهش می‌یابد (شکل ۴).

توزیع اندازه ذره‌های معلق آب دریا و نیز آب تزریقی توسط دستگاه Coulter Counter اندازه‌گیری شد که در شکل‌های ۵ تا ۷ نشان داده شده است. چنانچه دیده می‌شود با وجود کاهش ذره‌های معلق در سایزهای گوناگون (شکل ۵ و ۶) و نیز با وجود استفاده از صافی ۱۰ میکرونی، ذره‌های بزرگتر از ۱۰ میکرون همچنان در محل تزریق وجود دارند (شکل ۷). با توجه به نتیجه آزمایش‌هایی که نشان دهنده نبود خاصیت انعقاد کنندگی مواد شیمیایی می‌باشد؛ احتمال اینکه این ذره‌ها از انعقاد مواد تزریقی به‌وجود آمده باشند منتفی است. بنابراین مسئله یاد شده بیانگر نبود کارایی مناسب صافی‌ها می‌باشد و رسوب‌های پشت صافی وارد جریان آب می‌شوند. با توجه به نفوذپذیری لایه تولیدی مخزن، کمترین اندازه صافی می‌بایست ۲ μm باشد، درحالی که در کارخانه ۱۰ μm می‌باشد.



شکل ۲- خوردگی در خط لوله ۱۸ اینچی کارخانه.

### تعیین رسوب‌گذاری و یا خورنده بودن آب

به منظور تعیین رسوب‌گذاری و یا خورنده بودن آب تزریقی با توجه به نتیجه‌های آزمایشگاهی، اندیس استیف دیویس بر اساس معادله زیر به‌دست آمد [۳]:

$$S\&DSI = pH - pH_s \quad (۱)$$

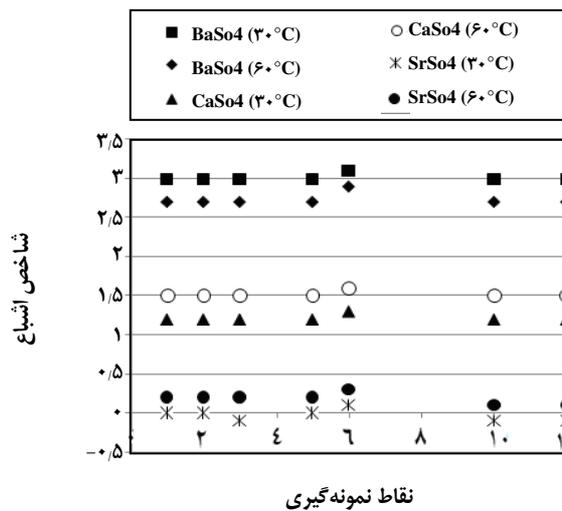
که  $pH_s$ ،  $pH$  اشباع سامانه می‌باشد و از معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید:

$$pH_s = pCa + pAlk + K \quad (۲)$$

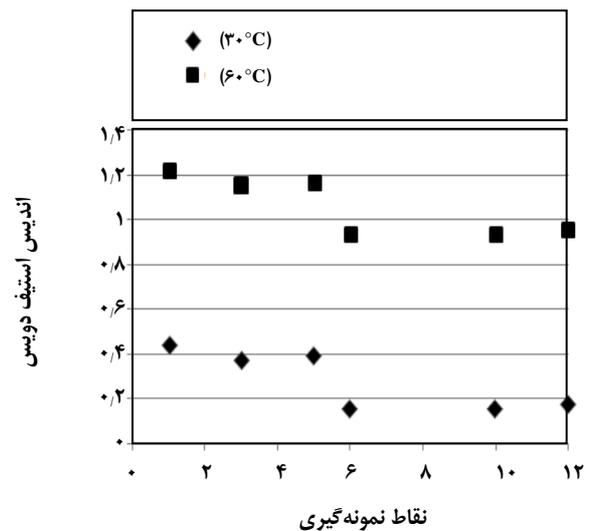
اگر  $pH$  آب کمتر از  $pH$  اشباع باشد،  $S\&DSI$  منفی بوده و آب پتانسیل رسوب‌گذاری خیلی کمی دارد، ولی خورنده است. اگر  $pH$  بیشتر از  $pH_s$  باشد، اندیس مثبت، سامانه فوق اشباع و آب تمایل به رسوب‌گذاری دارد. نتیجه‌های محاسبه‌های مربوط به اندیس استیف دیویس در نقاط نمونه‌گیری شده کارخانه در دو دمای ۳۰°C و ۶۰°C در شکل ۳ آمده است. این دو دما، دماهای حداقل و حداکثر جزیره در طول سال می‌باشند.

نتیجه‌ها نشان دهنده این است که آب دریا تمایل به رسوب‌گذاری در نقاط گوناگون کارخانه دارد و با افزایش دما تمایل رسوب‌گذاری

(۱) Microbial Induced Corrosion



شکل ۴ - تمایل رسوبگذاری رسوب‌های گوناگون بر اساس مدل ترمودینامیکی پیتزر در دمای ۳۰ و ۶۰ درجه سلسیوس.



شکل ۳- محاسبه‌های اندیس استیف دیویس در کارخانه تزریق آب در دو دمای ۳۰ و ۶۰ درجه سلسیوس.

### کارایی مواد شیمیایی

باکتری‌کش‌ها برای کنترل فعالیت باکتری‌های غیر هوازی (احیاءکننده سولفات) به سامانه تزریق می‌شود. به منظور مقاومت نکردن و سازگار نشدن باکتری‌ها با یک ترکیب دو نوع باکتری‌کش (A با پایه آلدئیدی و Q فسفونیوم سولفات) هر دو هفته یک بار استفاده می‌شود. مقدار تزریق باکتری‌کش‌ها متغیر از ۱۰ تا ۲۰ ppm به صورت پیوسته<sup>(۱)</sup> می‌باشد. عملکرد و کارایی باکتری‌کش‌ها بر روی باکتری‌های هتروتروف و SRB بر اساس روش آزمون API-RP38 بررسی شد. نمونه‌ها در روزهای گوناگون از انبار و کارخانه گرفته شد. نتیجه‌ها نشان داد که همه نمونه‌ها در غلظت‌های کمتر از ۵۰۰ ppm کارایی ندارند. بنابراین تزریق این ماده می‌بایست در غلظت مؤثر و به صورت شوک<sup>(۲)</sup> به کار رود. چراکه تزریق به صورت شوک مؤثرتر می‌باشد [۱۲ - ۱۰]. شایان گفتن است که با بررسی سایر کارخانه‌های موجود در میدان‌های نفتی ایران مشخص شد که تزریق باکتری‌کش در آنها به صورت شوک می‌باشد.

بازدارنده رسوب مورد استفاده در کارخانه مخلوطی از گروه‌های فسفونات و پلی‌اکریلات می‌باشد که به منظور جلوگیری از تشکیل رسوب‌های کلسیم کربنات، کلسیم سولفات، باریم سولفات و سایر رسوب‌ها به کار می‌رود. بر اساس نتیجه‌های آزمایشگاهی [۱۳، ۱۴]، بهترین بازده این ماده در غلظت ۳۰ ppm می‌باشد ولی مقدار مصرفی این ماده در کارخانه ۱۰ ppm می‌باشد.

مواد شیمیایی تزریقی به سامانه شامل اکسیژن‌زدا، باکتری‌کش، ضد خوردگی و ضد رسوب می‌باشد. در برج هوازدا مقدار اکسیژن تا ۰٫۶ ppm کاهش می‌یابد و باقیمانده اکسیژن توسط اکسیژن‌زداي آمونیوم بی‌سولفیت به مقدار ۲۰-۵۰ ppb کاهش می‌یابد. برای اطمینان خاطر از واکنش اکسیژن‌زدا با اکسیژن باقیمانده، مقدار اضافی آمونیوم بی‌سولفیت باید در حدود ۱٫۲ ppm باشد [۶]، ولی آزمایش‌های روتین نشان می‌دهد که مقدار ۲٫۵ - ۲ ppm آمونیوم بی‌سولفیت در سامانه باقی می‌ماند که سبب تشکیل ترکیب‌های سولفیت می‌شود، درحالی که بنا بر منابع علمی [۷، ۸] غلظت اکسیژن تا حد ۱۰۰ ppb هیچ مشکل جدی برای سامانه به وجود نمی‌آورد. بنابراین می‌توان با نصب حسگر اکسیژن در خروجی برج هوازدا و اندازه‌گیری دقیق میزان اکسیژن محلول باقیمانده، مقدار استوکیومتری ماده اکسیژن‌زدا و مقدار دقیق مورد نیاز برای حذف اکسیژن را محاسبه نموده و مقدار تزریق را اندکی بیشتر از آن در نظر گرفت تا هم از حذف کامل اکسیژن مطمئن شده و هم سولفیت اضافی در سامانه باقی نماند.

باکتری‌ها در آب تزریقی سبب خوردگی و بسته می‌شوند. سدیم هیپو کلریت در ابتدای هر سامانه تصفیه آب برای از بین بردن باکتری‌های هوازی افزوده می‌شود [۹]. بعد از برج هوازدا،

(۱) Continuous

(۲) Batch

کارایی این بازدارنده در برابر رسوبهای کلسیم کربنات و کلسیم سولفات بر اساس روش استاندارد NACE TM0374 در غلظت‌های ۱۰ و ۳۰ ppm ارزیابی شد که نتیجه‌ها در جدول ۴ آمده است. همان‌گونه که دیده می‌شود این ترکیب برای جلوگیری از تشکیل رسوبهای کلسیم سولفات کارایی مناسبی دارد ولی در برابر کلسیم کربنات حتی در غلظت ۳۰ ppm نیز چندان دلخواه نمی‌باشد. همچنین نمونه‌های گرفته شده از انبار در مقایسه با نمونه‌های کارخانه عملکرد بهتری داشتند.

بازدارنده خوردگی مورد استفاده در کارخانه از نوع آمین و محلول در آب می‌باشد. برای ارزیابی این بازدارنده آزمایش الکتروشیمیایی پلاریزاسیون Tafel با محلول ۳٪ آب نمک (NaCl) در حالت اشباع با اکسیژن و نیز بدون اکسیژن انجام گرفت. سرعت خطی آب در لوله با توجه به قطر الکتروده به سرعت چرخشی تبدیل شد.

شدت جریان تزریق آب ۷۰۰۰۰ bbl/day می‌باشد. بنابراین سرعت چرخشی بر اساس معادله‌های زیر به دست می‌آید:

$$V = Q / A \quad (۳)$$

$$A = \pi r^2 \quad (۴)$$

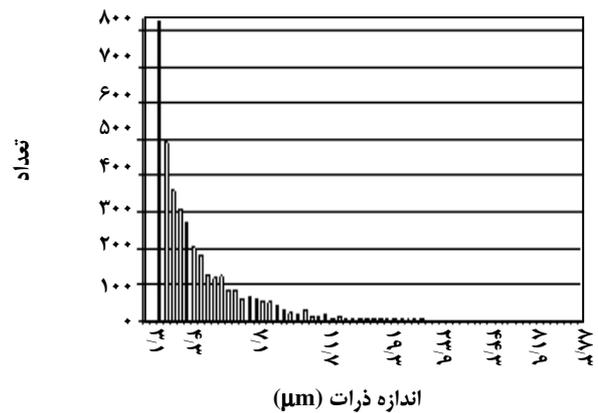
$$V = \pi / 60 \times D \times V_{rpm} \quad (۵)$$

که  $V$  سرعت خطی،  $Q$  شدت جریان تزریق آب،  $A$  سطح مقطع لوله،  $D$  قطر الکتروده کاری و  $V_{rpm}$  سرعت چرخشی می‌باشد. مقدار تزریق بازدارنده خوردگی ۱۵ ppm می‌باشد. نتیجه آزمایش‌ها نشان داد که این بازدارنده نه تنها سبب حفاظت از خوردگی لوله‌ها نمی‌شود بلکه باعث تندتر شدن خوردگی در غلظت‌های کمتر از ۴۰ ppm می‌شود. بررسی نتیجه‌های کارایی بازدارنده‌ها در نمونه گیری دوم، نشان دهنده کارایی بهتر نمونه‌های انبار در مقایسه با نمونه‌های کارخانه می‌باشد. که این بیانگر تأثیر گرما، نور خورشید و شرایط بد نگهداری بر روی بازدهی مواد می‌باشد (جدول ۵).

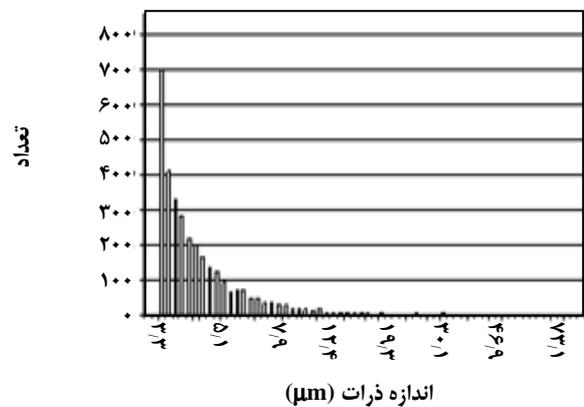
آزمایش جارست به روش ASTM D-2035 برای بررسی قدرت انعقاد کنندگی مواد شیمیایی با محلول آب نمک ۳٪ انجام گرفت که نشان دهنده عدم قدرت انعقاد کنندگی این مواد به تنهایی و نیز در حالت ترکیب با یکدیگر می‌باشد.

#### لزوم نصب سامانه پایش خوردگی

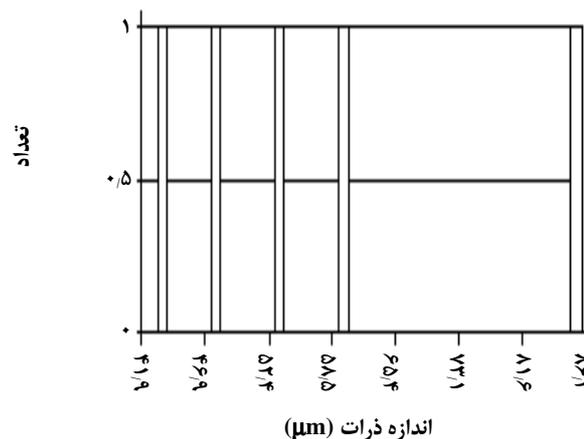
سامانه‌های پایش خوردگی نه تنها ما را از جزئیات خوردگی (وجود یا نبود و نرخ خوردگی) آگاه می‌کنند؛ بلکه ما را



شکل ۵ - پراکندگی ذره‌های آب دریا.



شکل ۶ - پراکندگی ذره‌های آب قبل از تزریق.



شکل ۷ - مقایسه توزیع ذره‌های بزرگتر از ۲۰ میکرون آب دریا (ستون اول و آخر) و آب تزریقی.

جدول ۴- کارایی بازدارنده رسوب برای دو رسوب کلسیم.

نمونه	غلظت بازدارنده (ppm)	کارایی بازدارنده در برابر $\text{CaCO}_3$ (%)	کارایی بازدارنده در برابر $\text{CaSO}_4$ (%)
انبار	۱۰	۳۳	۹۷
کارخانه	۱۰	۳۰/۴	۹۱
انبار	۳۰	۷۵/۱	۹۷
کارخانه	۳۰	۷۱/۱	۹۳

جدول ۵ - کارایی بازدارنده خوردگی.

غلظت بازدارنده (ppm)	سرعت خوردگی بدون اکسیژن (کارخانه) (mpy)	سرعت خوردگی اشباع از اکسیژن (mpy)	سرعت خوردگی (mpy)، عاری از اکسیژن، نمونه گیری دوم	
			انبار	کارخانه
۰	۱۳/۴	۲۱/۷	۱۴/۷	۱۴/۷
۵	۱۹/۸	۳۶/۹	-	-
۲۰	۱۳/۷	۲۹/۳	۳/۲	۷/۷
۳۰	۱۵/۶	۳۲/۹	-	-
۴۰	۱۱/۹	۲۷/۳	-	-
۵۰	۹/۴	۲۶/۳	۳/۱	۵/۳
۱۰۰	-	-	۱/۸	۷/۶
۵۰۰	-	۱۶/۳	۱/۶	۲/۳
۱۰۰۰	-	-	۱/۵	۲/۴

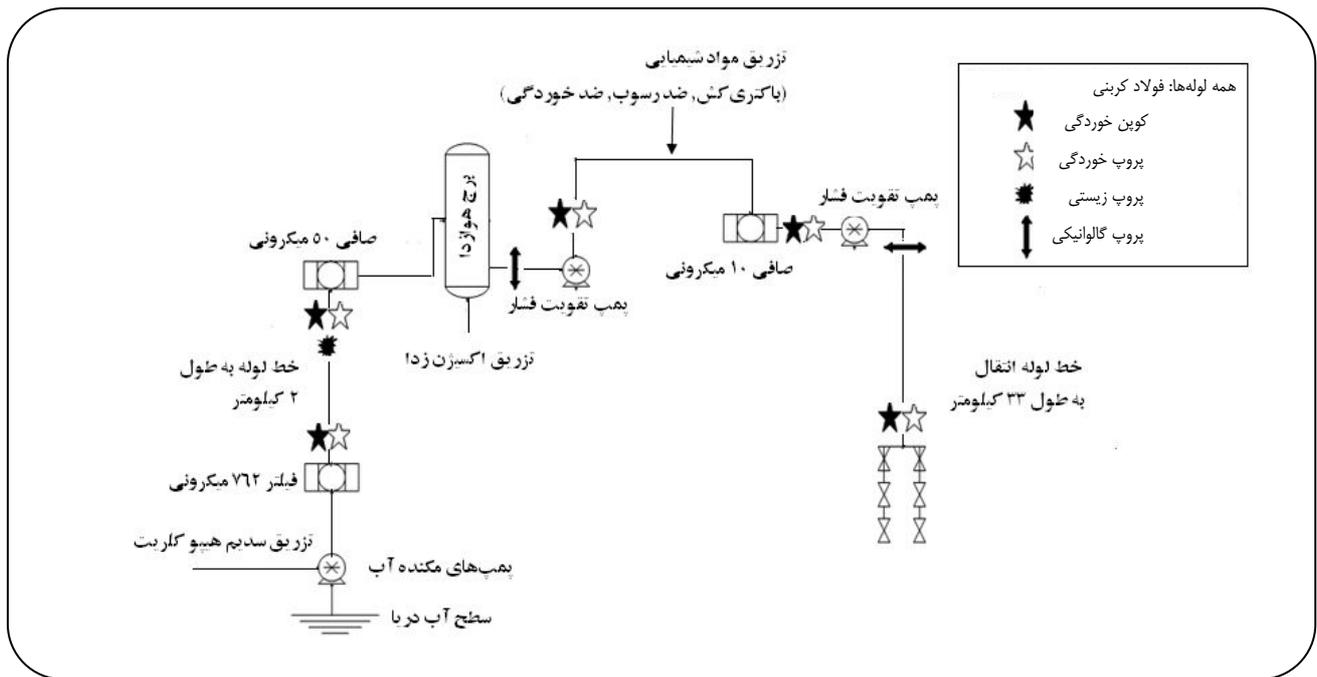
سامانه‌های پایش خوردگی می‌توانند شامل کوپن و پروب‌های خوردگی و تجهیزهای مربوط به نصب و پایش آنها باشند که هر کدام بسته به کاربردها انواع گوناگونی دارند. استاندارد NACE TM0299-99، به‌طور کلی در زمینه کنترل و پایش خوردگی در سامانه‌های آب دریا می‌باشد. خوردگی سامانه به‌طور معمول توسط اکسیژن، باکتری و ذره‌های جامد معلق رخ می‌دهد که توسط سامانه هوازدا، تزریق هیپو کلریت، باکتری‌کش و تصفیه کنترل می‌شود؛ ولی بهر حال سامانه تزریق آب دریا می‌بایست توسط کوپن‌ها و پروب‌ها پایش شود. بعد از مطالعه سایر کارخانه‌های تزریق آب [۶، ۱۵] و تعیین نقاط در معرض خوردگی و با مشورت کارشناسان شرکت کاپروکو<sup>(۳)</sup>، یک سامانه پایش خوردگی طراحی شد (شکل ۸). بر اساس این طراحی، در ۵ نقطه از کارخانه کوپن خوردگی و پروب خوردگی

در جریان چگونگی عملکرد هر یک از بخش‌های کارخانه و همچنین بازدهی مواد شیمیایی قرار می‌دهند. ابزار پایش خوردگی که با هزینه ناچیز و به سادگی قابل نصب می‌باشند، می‌توانند به میزان چشمگیری در هزینه‌های تعمیر، مواد شیمیایی و سایر هزینه‌های ناشی از صدمه به سامانه صرفه‌جویی نمایند. در کارخانه مورد بررسی هیچ‌گونه ابزار پایش خوردگی مانند کوپن<sup>(۱)</sup> و پروب خوردگی<sup>(۲)</sup> به‌کار نرفته است. اگر چه خوردگی سامانه توسط زدودن اکسیژن، افزودن مواد شیمیایی، اندازه‌گیری pH و تعداد ذره‌ها کنترل می‌شود؛ ولی شاهدی بر خوردگی سامانه به‌دلیل حضور باکتری‌ها و نیز فراورده‌های خوردگی وجود دارد. افزون بر این، در طول این پژوهش، تعویض خطوط لوله به دلیل خوردگی حفره انجام گرفت. بنابراین نصب سامانه پایش خوردگی در این کارخانه، پیشنهاد می‌شود.

(۱) Corrosion Coupon

(۳) Caproco Company

(۲) Corrosion Probe



شکل ۸ - سامانه مانیتورینگ خوردگی طراحی شده.

شیمیایی است. یک تخمین و برآورد تقریبی نشان می‌دهد که با نصب این سامانه پایش خوردگی در حدود ۷۰۰۰۰ دلار در سال صرفه جویی می‌شود؛ در حالی که هزینه‌ای در حدود ۶۰۰۰۰ دلار داشته و به مدت ۵ سال کار می‌کند.

### نتیجه گیری

- ۱- با توجه به اینکه غلظت بهینه بازدارنده رسوب ۳۰ ppm می‌باشد؛ پیشنهاد می‌شود مقدار تزریق به مقدار بهینه افزایش یافته و همچنین برای جلوگیری از اتلاف مواد شیمیایی در پشت صافی ۱۰ میکرونی، محل تزریق به بعد از آن منتقل شود.
- ۲- برای حذف اثر مخرب باکتری کش بر عملکرد مواد دیگر و نیز جلوگیری از سازگاری و تطابق باکتریها با محیط پیشنهاد می‌شود به جای تزریق پیوسته این ماده، تزریق به صورت شوک و با غلظت مواد مؤثر ۵۰۰ ppm همانند سایر کارخانه‌ها صورت گیرد.
- ۳- با توجه به تجزیه نمونه رسوب‌های (در بردارنده فراورده‌های خوردگی) و نیز وجود باکتری SRB در نمونه‌ها، خوردگی از مشکل‌های مطرح در کارخانه می‌باشد. خوردگی داخلی و خارجی لوله‌ها در طول مسیر سامانه با چشم غیر مسلح قابل دیدن می‌باشد. بنابراین نصب سامانه پایش خوردگی برای افزایش بازده کارخانه

برای تعیین نرخ خوردگی، در دو نقطه پروب گالوانیکی<sup>(۱)</sup> برای تعیین وجود یا نبود اکسیژن و در یک نقطه پروب زیستی<sup>(۲)</sup> برای بررسی حضور باکتری‌های غیر شناور در بدنه لوله کربن استیل در نظر گرفته شده است که به شرح زیر می‌باشد:

- نصب کوپن و پروب در ابتدا و انتهای خط لوله ۲ کیلومتری، که طولانی‌ترین خط لوله در داخل جزیره می‌باشد.

- نصب پروب زیستی در انتهای خط لوله ۲ کیلومتری برای بررسی حضور یا عدم حضور باکتری احیاء کننده سولفات.

- نصب پروب گالوانیکی بعد از برج هوازدا برای اندازه‌گیری مقدار اکسیژن باقیمانده در خروجی برج و تنظیم مقدار مصرف ماده اکسیژن زدا بر اساس اکسیژن باقیمانده، و بعد از آخرین پمپ تقویت فشار برای بررسی احتمال ورود اکسیژن از طریق پمپ‌ها به جریان آب.

- نصب کوپن و پروب خوردگی قبل و بعد از تزریق مواد شیمیایی برای بررسی عملکرد آنها.

- نصب کوپن و پروب خوردگی بر روی سکوی تزریق به دلیل زمان ماند طولانی در مسیر انتقال از جزیره به سکو.

یکی از برتری‌های این سامانه بهبود در کاربرد و ارزیابی مواد

(۱) Galvanic Probe

(۲) Biocide/Biofilm Probe

### قدردانی

این پروژه پژوهشی، آزمایشگاهی در پژوهشکده ازدیاد برداشت از مخزن‌های نفت و گاز شرکت ملی نفت ایران و با حمایت مالی شرکت نفت فلات قاره ایران به عنوان کارفرما انجام گرفته است که صمیمانه از هر دو تشکر و قدردانی می‌شود.

### فهرست نمادها

S&DSI <sub>c</sub>	اندیس استیف دیویس
MIC	خوردگی میکروبی
NACE	انجمن مهندسی خوردگی آمریکا
SRB	باکتری احیاکننده سولفات
TDS	کل ذرات جامد محلول
TSS	کل ذرات جامد معلق
XRD	پراش اشعه ایکس
XRF	فلوئورسانس اشعه ایکس

ضروری است؛ چراکه سبب اطلاع از جریان خوردگی سامانه، عملکرد درست دستگاه‌ها و مواد شیمیایی تزریقی می‌شود.

۴- نصب حسگر اکسیژن در خروجی برج هوازدا توصیه می‌شود. بدین‌وسیله می‌توان با اندازه‌گیری دقیق میزان اکسیژن محلول باقیمانده، مقدار استوکیومتری ماده اکسیژن‌زدا و مقدار دقیق مورد نیاز برای حذف اکسیژن را محاسبه نموده و مقدار تزریق را اندکی بیشتر از آن در نظر گرفت تا هم از حذف کامل اکسیژن مطمئن شده و هم سولفیت اضافی در سامانه باقی‌نماند.

۵- صافی‌ها بعد از سال‌ها استفاده، کیفیت خود را از دست داده‌اند. براساس نفوذپذیری پایین مخزن، جایگزینی صافی ۱۰ میکرونی با صافی ۲ میکرونی پیشنهاد می‌شود.

۶- مواد شیمیایی حساس به دما و رطوبت، باید به دقت نگهداری و مورد استفاده قرار گیرند تا کارایی و کیفیت آنها حفظ شود.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۶/۱۵ : تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۱/۲

### مراجع

- [1] Moghadasi J., Jamialahmadi M., Muller-Steinhagen H., Izadpanah M.R., [Formation Damage in Iranian Oil Fields](#), *SPE 73781*, February (2002).
- [2] Gao Chang, [Factors Affecting Particle Retention in Porous Media](#), *Emirates Journal for Engineering Research*, **12**, p. 1 (2007).
- [3] ASTM D4582-10, "Standard Practice for Calculation and Adjustment of the Stiff and Davis Index for Reverse Osmosis", American Society Testing and Materials, (2010).
- [4] "PVT SIM Manuals", Calsep Company, Version 15, (2005).
- [5] صبوری، سمانه؛ لطف‌اللهی، نادر؛ متحدین، پویا؛ [تعیین مقدار رسوب در فرایند تزریق آب به مخازن نفتی ایران، نشریه شیمی و مهندسی شیمی ایران، \(۱\) ۳۱، ص. ۱۱۵، \(۱۳۹۱\).](#)
- [6] Mitchell R.W., [The Forties Field Seawater Injection System](#), *SPE 6677*, June (1978).
- [7] Wheller D., [Treating and Monitoring 450000 B/D Injection Water](#), *Pet. Eng*, November (1975).
- [8] Ostroff, A. G., "Introduction to Oilfield Water Technology", Prentice-Hall, (1965).
- [9] Hamouda A.A., [Water Injection Quality in Ekofisk – UV Sterilization and Monitoring Techniques](#), *SPE 21048*, February (1991).
- [10] Barton Larry.L, "Sulfate-Reducing Bacteria", Plenum Press, New York, p.277 (1995).
- [11] Sequeira C.A.C., Tiller A.K., "Microbial Corrosion", Elsevier, p.191 (1988).
- [12] Zettlitzer Michael, Busch Matthiass, [Produced Water Cleaning and Re-Injection Experience - Zero Discharge to water](#), 4th International Conference on Produced Water Management, January (2007).

[13] Zahedzadeh M., Masoudi R., Saboormaleki M., [Feasibility Study of Produced Water Re-Injection in Siri Oil Field in Iran](#), EAGE First International Petroleum Conference and Exhibition, May (2009).

[۱۴] شکراله زاده، سکینه؛ زاهدزاده، محمد؛ رعایایی، عماد؛ رادمهر، مزگان؛ بررسی کارایی و تعیین غلظت بهینه بازدارنده رسوبات معدنی مورد استفاده در یکی از میادین نفتی ایران، پژوهش نفت، شماره ۶۷، ص. ۵۰. (۱۳۹۰).

[15] Bayona H.J., [A Review of Well Injectivity Performance in Saudi Arabia's Ghawar Field Injection Program](#), SPE 2553, (1993).