

## بررسی آزمایشگاهی تاثیر محلول آب هوشمند و سورفکتانت بر ازدیاد برداشت نفت در مخازن کربناته آهکی

صائب احمدی<sup>۱</sup>، امیر حسین سعیدی دهاقانی<sup>۱\*</sup>، محمد مهدی شادمان<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۳/۱۶

تاریخ تصحیح: -

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۰۸

### چکیده

بیشتر ذخایر نفتی جهان در مخازن کربناته شکافدار می باشند که به دلیل حالت ترشوندگی و تراکم شبکه ماتریسی سنگ بازده برداشت نفت پایینی دارند. اگر حالت ترشوندگی سنگ کربناته از حالت نفت دوست به آب دوست تغییر یابد. بازده برداشت نفت به دلیل آشام آب به داخل سنگ اشباع شده از نفت به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. آب هوشمند می تواند ترشوندگی سنگ کربناته را از حالت نفت دوست به حالت خنثی-آب دوست تغییر دهد و آشام آب را به شبکه ماتریسی سنگ افزایش دهد. در این پژوهش، تاثیر یون ها و سورفکتانت های مختلف در آب هوشمند بر حالت ترشوندگی سنگ کربناته با آزمایش های اندازه گیری زاویه تماس و آشام خودبخودی بررسی شد. آزمایش های آشام خودبخودی در سه سطح دما (۵۰، ۷۰ و ۹۰ درجه سانتیگراد) انجام شدند. تاثیر یون های مختلف، دما و غلظت سورفکتانت بر تغییر ترشوندگی سنگ کربناته در آزمایش آشام خودبخودی بررسی شد. نتایج نشان می دهد که حضور یون  $SO_4^{2-}$  حالت ترشوندگی سنگ کربناته را به مقدار زیادی تغییر می دهد. با افزایش غلظت یون  $SO_4^{2-}$  از  $0.033 \text{ mol/l}$  تا  $0.1 \text{ mol/l}$  بازیابی نفت از مقدار ۱۹٪ تا ۵۸٪ افزایش یافت. علاوه بر این با افزایش غلظت یون  $Mg^{2+}$  نیز مقدار بازیابی نفت افزایش یافت (از ۱۹ تا ۲۳٪). همچنین سورفکتانت کاتیونی CTAB، ترشوندگی سنگ کربناته را به مقدار زیادی تغییر داد و مقدار بازیابی نفت از مغزه کربناته از ۱۹٪ تا ۷۸٪ افزایش یافت.

واژگان کلیدی: مخازن کربناته، آب هوشمند، تغییر ترشوندگی، سورفکتانت

### ۱- مقدمه

مهمترین چالش در بهره برداری نفت از مخازن کربناته شکافدار که سبب کاهش درصد بازیافت نفت از آنها می شود، پدیده ماندن مقدار زیادی از نفت درون شبکه ماتریسی سنگ و چسبیدن به سطح سنگ است. دو عامل اصلی موجب این پدیده می شود، یکی حالت ترشوندگی سنگ کربناته که در بیشتر مخازن نفت دوست است و دیگری تفاوت زیاد مابین تراوایی پایین شبکه ماتریسی سنگ و تراوایی بالای شبکه شکافهای سنگ می باشد [۵-۱]. به دلیل بالا بودن تراوایی شبکه شکاف نسبت به شبکه ماتریسی سنگ، به هنگام جابجایی نفت توسط آب، نفت موجود در شکاف ها به سرعت تخلیه شده و حجم زیادی از نفت در داخل شبکه ماتریس سنگ باقی می ماند. اصلی ترین مکانیسم تولید نفت در مخازن کربناته شکافدار، مکانیسم آشام خودبخودی است که به دلیل نفت دوست بودن شبکه ماتریسی سنگ، این مکانیسم نمی تواند چندان موثر واقع شود و در نتیجه حجم زیادی از نفت همچنان درون شبکه

ماتریسی سنگ در مخزن باقی می ماند [۶-۷]. در نتیجه هر فرایندی که بتواند حالت ترشوندگی شبکه ماتریسی سنگ را به آب دوست تغییر دهد، فرایندی موثر در ازدیاد برداشت از مخازن کربناته شکافدار محسوب می شود. یکی از کاربردی ترین روش های نوظهور ازدیاد برداشت برای استفاده در مخازن کربناته شکافدار، روش تزریق آب هوشمند است. بحث تغییر شیمی آب تزریقی، اولین بار توسط آقای برنارد در سال ۱۹۶۷ مطرح شد که در آن زمان مورد توجه واقع نشد. در سال ۱۹۹۰ و با انتشار نتایج تحقیقات دانشگاه وایومینگ، مطالعات جدی تری در این زمینه آغاز شد. از این روش بسته به بینش هر گروه در مورد علت ازدیاد برداشت از طریق آن و پارامتر بهینه شده ی آب تزریقی، با نام های مختلفی یاد می شود. محققین شرکت نفت بریتانیا از اصطلاح آب با شوری کم، و محققین شرکت شل از اصطلاح آب طراحی شده جهت توصیف این روش استفاده می کنند [۸]. با این وجود آب هوشمند نام کلی است که تمامی این روش ها را در بر می گیرد. همچنین مطالعات پیشین تا حدودی نشان داده که مواد فعال سطحی به تنهایی نیز می توانند در تغییر ترشوندگی سطح کاهش چسپندگی سطحی و ازدیاد برداشت از مخازن کربناته موثر باشند [۹-۱۱]. اما برای کاربردهای میدانی، مقدار زیادی از مواد شیمیایی گران قیمت مورد نیاز است. لذا به دلایل اقتصادی شرکت های نفتی تمایل به اجرای این روش در حوزه های میدانی ندارند و استفاده از افزودنی های شیمیایی ارزان قیمت بسیار مورد توجه بوده و از اهمیت بسزایی برخوردار است. بنابراین به نظر می رسد ترکیب آب هوشمند و مقدار کمی از مواد فعال سطحی به عنوان سیال تزریقی می تواند در مقیاس میدانی قابل استفاده باشد. از این رو در این پژوهش اثر ترکیب آب هوشمند و سه نوع ماده فعال سطحی کاتیونی، آنیونی و غیر یونی بر روی حالت ترشوندگی سنگ کربناته و مقدار بازیابی نفت از مخازن کربناته بررسی شده است.

## ۲- بخش تجربی

### ۲-۱- مواد

#### ۲-۱-۱- سنگ

در این پژوهش از مغزه استوانه ای شکل از سنگ کربناته مناطق نفتی جنوب کشور در آزمایش های آشام خودبخودی استفاده است. همچنین برای آزمایش اندازه گیری زاویه تماس مغزه به شکل قرص هایی با ضخامت ۲ میلی متر برش داده شده است. شکل ۱ نمونه مغزه استفاده شده در این پژوهش را نشان می هد.



شکل ۱- نمونه مغزه کربناته استفاده شده در آزمایش های آشام خودبخودی

### ۲-۱-۲- نفت

از نفت میدان نفتی آب تیمور ایلام به عنوان فاز نفتی در این پژوهش استفاده شده است. جدول ۱ ترکیب درصد مولی نفت استفاده شده در این پژوهش را نشان می دهد. نفت موجود دارای  $SP.GR=0.9051$  و  $MW=298$  است.

جدول ۱. درصد مولی نفت استفاده شده در این پژوهش

ترکیبات	C2	C3	iC4	nC4	iC5	nC5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12 <sup>+</sup>
درصد مولی	0.1	0.14	0.15	0.87	1.82	2.73	12	8.75	7.41	10.24	6.17	6.11	44.5

### ۲-۱-۳- آب

در انجام آزمایش ها از آب یک بار تقطیر در ساخت محلول های آب هوشمند و مواد فعال سطحی و شستشوی سنگ ها استفاده شده است.

### ۲-۱-۴- نمک ها

جدول ۲ نمک های مورد استفاده در ساخت محلول های آب هوشمند را نشان می دهد، که از شرکت آلمانی مرک و با خلوص بالای ۹۹٪ تهیه شده اند.

جدول ۲. نمک های مورد استفاده محلول های آب هوشمند

فرمول شیمیایی	نمک
NaCl	کلرید سدیم
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	سدیم سولفات
MgCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	منیزیم کلراید شش آبه
CaCl <sub>2</sub>	کلسیم کلراید
NaHCO <sub>3</sub>	بی کربنات سدیم

## ۲-۱-۵- مواد فعال سطحی

از سه ماده فعال سطحی کاتیونی C12TAB، آنیونی SDS، و غیر یونی TX- 100 استفاده شد. این مواد ساخت شرکت مرک آلمان می باشند.

## ۲-۲- روش های آزمایشگاهی

## ۲-۲-۱- اندازه گیری زاویه تماس

قرص هایی به ضخامت ۲ میلی متر که از مغزه های کربناته برش داده شدند. به منظور نفت دوست شدن، در دمای C ۹۰ به مدت دو هفته در نفت قرار داده شدند. سپس سنگ ها با هپتان شسته و به مدت ۴۸ ساعت در محلول آب هوشمند و مواد فعال سطحی قرار داده شدند. در انتها نمونه ها را با آب مقطر شسته و مقدار زاویه تماس در دما و فشار اتمسفری اندازه گیری شد. شکل ۲ دستگاه اندازه گیری زاویه تماس را نشان می دهد که ساخته نویسندگان مقاله می باشد. اندازه گیری زاویه تماس با قرار دان یک قطره نفت از پایین بر سطح سنگ در محیط آبی در دمای اتاق و فشار اتمسفری انجام شده است، که پس از قرار گرفتن قطره نفت بر روی سنگ در محیط آبی تصویر قطره توسط دوربین ضبط شده و مقدار زاویه قطره با سطح افقی اندازه گیری می شود.



شکل ۲- دستگاه اندازه گیری زاویه تماس

## ۲-۲-۲- آزمایش آشام خودبخودی

برای انجام آزمایش آشام از سل های شیشه ای که تحمل دماهای بالا تا  $50.0^{\circ}\text{C}$  را دارا می باشند استفاده شده است. آب بندی درپوش سل با چسپ سیلیکون انجام شد. برای اندازه گیری حجم نفت برداشت شده از نمونه های سنگ مخزن، از پیپت هایی به حجم  $10\text{ ml}$  که به سل متصل می شوند، استفاده شد و هوای داخل حفرات مغزه با استفاده از یک پمپ خلا تخلیه شد. پس از خشک کردن مغزه ها در آون، وزن آنها اندازه گیری شد ( $W_d$ ). سپس با استفاده از پمپ، نفت به داخل مغزه مکش شده و مغزه از نفت اشباع می شود. در این مرحله وزن مغزه اشباع شده از نفت اندازه گیری می شود ( $W_s$ ). به منظور برقراری تعادل ترمودینامیکی بین سنگ و نفت، مغزه ها به مدت ۲ هفته در نفت خام در دمای  $90^{\circ}\text{C}$  قرار داده شدند. سپس مغزه ها را در سل های آشام قرار داده و پس از اضافه کردن محلول آب هوشمند و سورفکتانت (سیالات جدول ۳)، سل ها در حمام دما با دمای  $50$ ،  $70$  و  $90$  درجه سانتیگراد قرار داده شدند. با ورود آب به داخل مغزه و خروج نفت از سنگ، نفت خارج شده از مغزه با توجه به چگالی کمتر نسبت به آب به روی سطح آمده و با قرار گرفتن در بالای پیپت، حجم آن اندازه گیری می شود. میزان برداشت نفت از رابطه زیر بدست می آید که  $V_R$  حجم نفت جمع شده در بالای پیپت و  $V_t$  حجم کل نفت جذب شده در مغزه سنگ کربناته است.

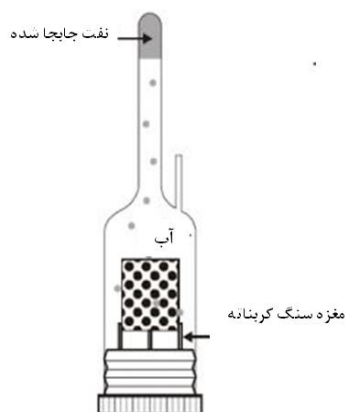
$$V_t = (W_s - W_d) / \rho_{oil} \quad (1)$$

در رابطه فوق  $W_s$  وزن مغزه در حالت اشباع،  $W_d$  وزن مغزه در حالت خشک و  $\rho_{oil}$  چگالی نفت است. درصد برداشت نفت از رابطه زیر بدست می آید. شکل ۳ شماتیک کلی آزمایش آشام خودبخودی را نشان می دهد.

$$R = V_R * 100 / V_t \quad (2)$$

## ۲-۲-۳- آماده سازی سیال های مورد استفاده در آشام خودبخودی و اندازه گیری زاویه تماس

جهت تهیه محلول پایه هوشمند از آبی که غلظت یون های موجود در آن برابر آب خلیج فارس است، استفاده شد. جدول ۳ غلظت هر یون ها و مقدار ماده فعال سطحی در سیالات استفاده شده در آزمایش های آشام و زاویه تماس را نشان می دهد. نمونه SW مربوط به آب دریای خلیج فارس است. در نمونه های ۲-۴ اثر غلظت یون  $\text{Mg}^{2+}$ ، ۵-۷ اثر یون  $\text{Ca}^{2+}$ ، ۸-۱۰ اثر یون  $\text{SO}_4^{2-}$ ، ۱۱-۱۲ اثر یون  $\text{Na}^+$ ، در آب هوشمند بدون حضور ماده فعال سطحی بررسی شده است. در محلول های ۱۳-۲۱ نیز محلول پایه همان آب خلیج فارس است، که غلظت های متفاوتی از سه سورفکتانت کاتونی CTAB، آنیونی SDS و غیر یونی TX-100 به آن اضافه شده است. به عبارتی در سیالات ۱۳-۲۱ تاثیر آب هوشمند همراه با سورفکتانت های مختلف بر تغییر ترشوندگی و میزان بازیابی نفت بررسی شده است.



شکل ۳- شماتیک کلی آزمایش آشام خودبخودی

جدول ۳. ترکیب درصد سیالات مورد استفاده در آزمایش آشام و زاویه تماس

TX-100 % wt	SDS % wt	CTAB % wt	K <sup>+</sup> (Mol/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (Mol/L)	Na <sup>+</sup> (Mol/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (Mol/L)	Ca <sup>2+</sup> (Mol/L)	Mg <sup>2+</sup> (Mol/L)	محلول	شماره
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	SW	۱
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۰	SW0Mg <sup>2+</sup>	۲
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۱۴۶	SW2Mg <sup>2+</sup>	۳
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۲۱۹	SW3Mg <sup>2+</sup>	۴
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰	۰/۰۷۳	SW0Ca <sup>2+</sup>	۵
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۲۴	۰/۰۷۳	SW2Ca <sup>2+</sup>	۶
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۳۶	۰/۰۷۳	SW3Ca <sup>2+</sup>	۷
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	SW0SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	۸
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۶۶	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	SW2SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	۹
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۱	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	SW3SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	۱۰
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۰	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	SW0Na <sup>+</sup>	۱۱
۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۱/۶۰۸	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	SW3Na <sup>+</sup>	۱۲
۰/۰	۰/۰	۰/۰۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	CTAB %۰/۰۵ wt	۱۳
۰/۰	۰/۰	۰/۱	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	CTAB %۰/۱ wt	۱۴
۰/۰	۰/۰	۰/۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	CTAB %۰/۳ wt	۱۵
۰/۰	۰/۰۵	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	SDS %۰/۰۵ wt	۱۶
۰/۰	۰/۱	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	SDS %۰/۱ wt	۱۷
۰/۰	۰/۳	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	SDS %۰/۳ wt	۱۸
۰/۰۵	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	TX100 %۰/۰۵ wt	۱۹
۰/۱	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	TX100 %۰/۱ wt	۲۰
۰/۳	۰/۰	۰/۰	۰/۰۱۲	۰/۰۰۲	۰/۵۳۶	۰/۰۳۳	۰/۰۱۲	۰/۰۷۳	TX100 %۰/۳ wt	۲۱

## ۳- نتایج و بحث

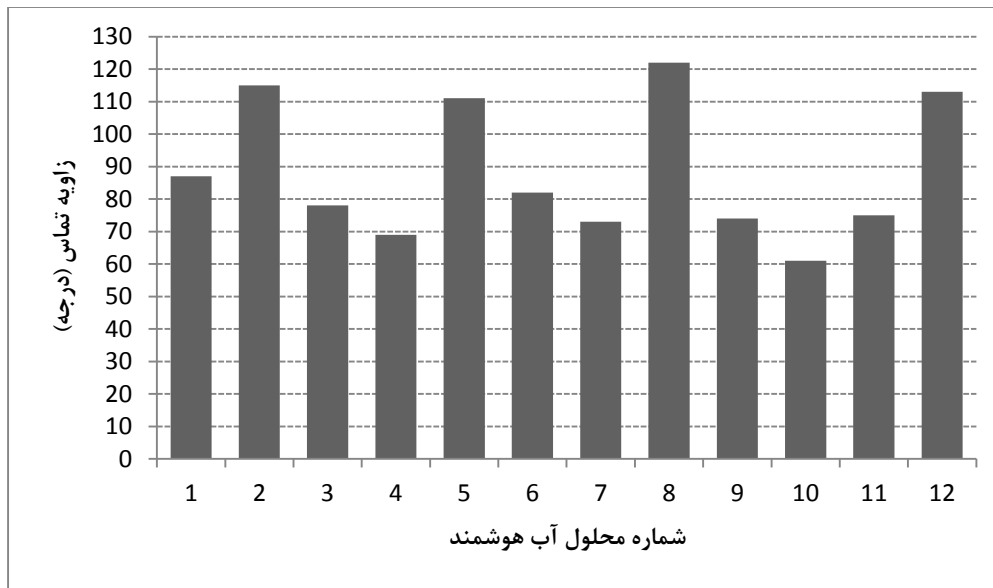
## ۳-۱ اندازه گیری زاویه تماس

جهت بررسی اطمینان از نفت دوست بودن سنگ ها پیش از قرار دادن آنها در محلول های آب هوشمند و مواد فعال سطحی، مقدار زاویه تماس بعد از قرار دادن نمونه سنگ در نفت اندازه گیری شد. شکل ۴ قطره پخش شده ماده نفتی بر روی سنگ را نشان می دهد که مقدار زاویه تماس آن ۱۶۱ درجه بوده و نشان دهنده نفت دوست بودن نمونه است.



شکل ۴- قطره نفت قرار گرفته بر روی سطح سنگ نفت دوست شده

پس از قرار دادن سنگ ها در محلول های سیالات آب هوشمند و سورفکتانت (سیالات ۲۱-۱) مقدار زاویه تماس برای هر یک از نمونه ها اندازه گیری شد، که کاهش آن نشان دهنده تغییر ترشوندگی سطح سنگ و جدا شدن مقداری از اسید های چرب موجود در نفت خام جذب شده از روی سطح سنگ است. شکل ۵ مقدار زاویه تماس را برای محلول های ۱۲-۱ نشان می دهد.



شکل ۵- مقادیر زاویه تماس قطره نفت بر روی سنگ کربناته برای محلول های آب هوشمند با غلظت متفاوت یون ها (سیالات ۱۲-۱)

نتایج شکل ۵ نشان می دهد که نمونه آب خلیج فارس (سیال ۱) مقدار زاویه تماس سطح سنگ را به مقدار ۸۷ درجه کاهش داده که نشان دهنده کارایی خوب این سیال در تغییر ترشوندگی سطح سنگ کربناته است. نتایج مربوط به سیالات ۴-۲ نشان می دهد که افزایش غلظت یون  $Mg^{2+}$  در محلول آب هوشمند مورد استفاده در تغییر ترشوندگی منجر به کاهش بیشتر زاویه تماس می شود. با افزایش غلظت یون  $Ca^{2+}$  در آب هوشمند نیز روند مشابهی مشاهده می شود. نتایج نشان می دهد که تاثیر یون  $Mg^{2+}$  بر ترشوندگی بیشتر از یون  $Ca^{2+}$  است. با افزایش غلظت یون  $SO_4^{2-}$  در آب هوشمند بیشترین کاهش در زاویه تماس مشاهده شد. ولی افزایش غلظت یون  $Na^+$  تاثیر منفی داشته و منجر به افزایش زاویه تماس نسبت به حالت پایه شد. نتایج زاویه تماس برای سنگ کربناته روند مشابهی با نتایج مطالعات پیشین بر روی سنگ چالکی دارد و می توان نتیجه گرفت مکانیسم حاکم غالب بر روی سنگ کربناته نیز مشابه سنگ چالکی می باشد [۱۲-۱۵]. همان گونه که پیشتر بیان شد عامل اصلی تغییر ترشوندگی بر روی سنگ های کربناته، جذب اسید های چرب موجود در نفت خام بر روی سطح سنگ می باشد، که با بار منفی روی سطح سنگ کربناته با بار مثبت جذب شده اند. مکانیسم حاکم بدین گونه است که افزایش غلظت یون  $SO_4^{2-}$  در محلول از بار مثبت سطح سنگ کاسته و توانایی کاتیون های دو ظرفیتی در جدا کردن اسید چرب از روی سنگ را افزایش می دهد، به همین دلیل با افزایش یون سولفات، مقدار زاویه تماس کاهش می یابد. افزایش غلظت کاتیون های دو ظرفیتی فعالیت و توانایی آنها را در کندن اسید چرب جذب شده بر روی نفت افزایش می دهد، اما افزایش یون  $Na^+$  منجر به کاهش فعالیت یون های دو ظرفیتی شده و مانع از دسترسی آنها به دولا به الکتریکی سطح می شود، بنابراین فعالیت یون های موثر کم شده و مقدار زاویه تماس نسبت به سیال پایه که مقدار یون  $Na^+$  در آن کم تر است، افزایش می یابد. شکل ۶ تاثیر غلظت سه سورفکتانت کاتیونی، آنیونی و غیر یونی به همراه آب هوشمند را نشان می دهد. نتایج



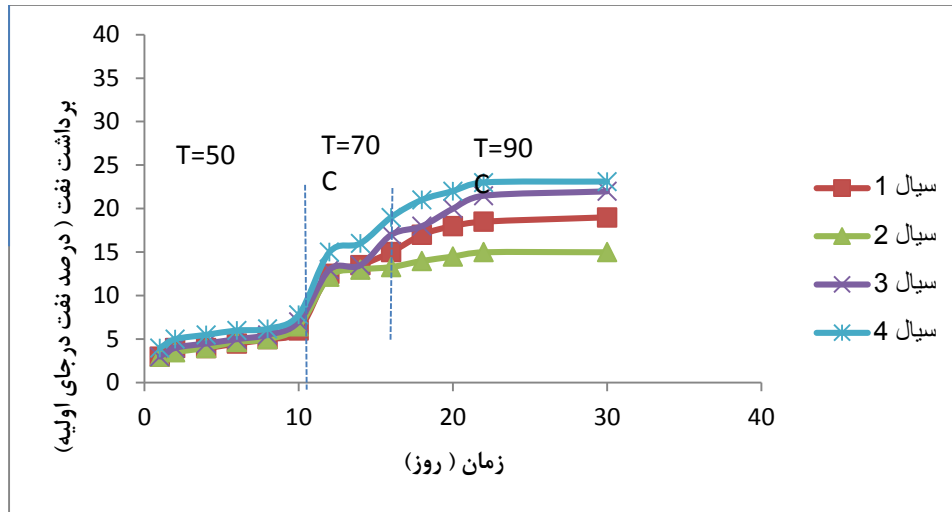
نشان می دهد که سورفکتانت CTAB بیشترین کارایی را در غلظت های بالا در کاهش زاویه تماس به همراه آب هوشمند دارد. سورفکتانت غیر یونی نیز مقداری زاویه تماس را کاهش داده و سطح سنگ را آب دوست تر می کند. اما سورفکتانت آنیونی SDS در غلظت های کم به همراه آب هوشمند تاثیری زیادی بر ترشوندگی سطح سنگ ندارد. دلیل این پدیده، به برقراری جاذبه الکترواستاتیک ماده فعال سطحی کاتیونی با اسید چرب دارای بار منفی از جذب شده بر روی سطح سنگ برمی گردد، اما در سورفکتانت آنیونی به دلیل دافعه فضایی آن با آنیون اسید چرب جذب شده، تنها از طریق اثر متقابل هیدروفوبیک که بین سر قطبی ماده فعال سطحی و قسمت هیدروکربنی آنیون اسید چرب بوجود می آید، می تواند به سطح نزدیک می شود. در نتیجه از آنجاییکه که اندرکنش هیدروفوبیک ضعیفتر از جاذبه الکترواستاتیک است، لذا سورفکتانت آنیونی به نسبت گونه کاتیونی اثر کمتری روی تغییر ترشوندگی دارد.



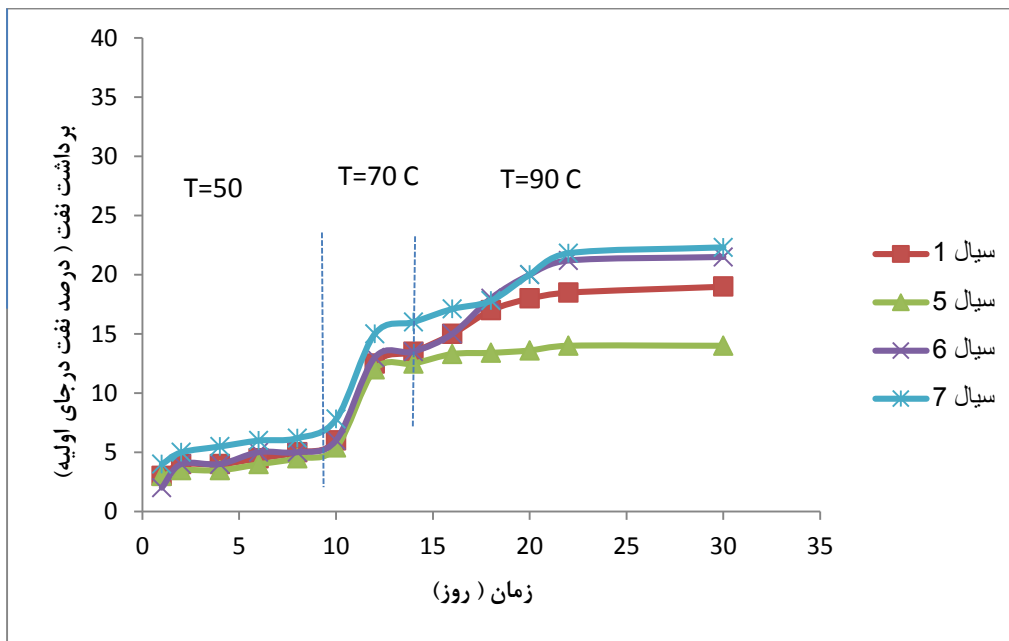
شکل ۶- مقادیر زاویه تماس قطره نفت بر روی سنگ کربناته برای محلول های آب هوشمند و سورفکتانت با غلظت متفاوت سورفکتانت (سیالات ۲۱-۱۳)

### ۳-۲- آزمایش آشام خودبخودی

آزمایش آشام خودبخودی برای محلول های ۱-۲۱ در سه دمای ۵۰، ۷۰، ۹۰ درجه سانتیگراد انجام شد. اشکال ۷ و ۸ تاثیر دما و غلظت یون های  $Ca^{2+}$  و  $Mg^{2+}$  را در مقدار بازیابی نفت از آزمایش آشام نشان می دهد. در دمای  $50^{\circ}C$  هنگامی که از سیالات آب هوشمند به تنهایی استفاده شد، مقدار بازیابی نفت از مغزه ها پایین بوده و افزایش غلظت یون های  $Ca^{2+}$ ،  $Mg^{2+}$  تاثیر چندانی بر افزایش برداشت نفت نداشت. ولی با افزایش دما مقدار برداشت نفت نسبت به دماهای پایین تر افزایش می یابد و فعالیت یون ها در محلول آب هوشمند نیز زیاد شده و افزایش یا کاهش غلظت یون ها بر مقدار نهایی برداشت نفت تاثیر گذار است.

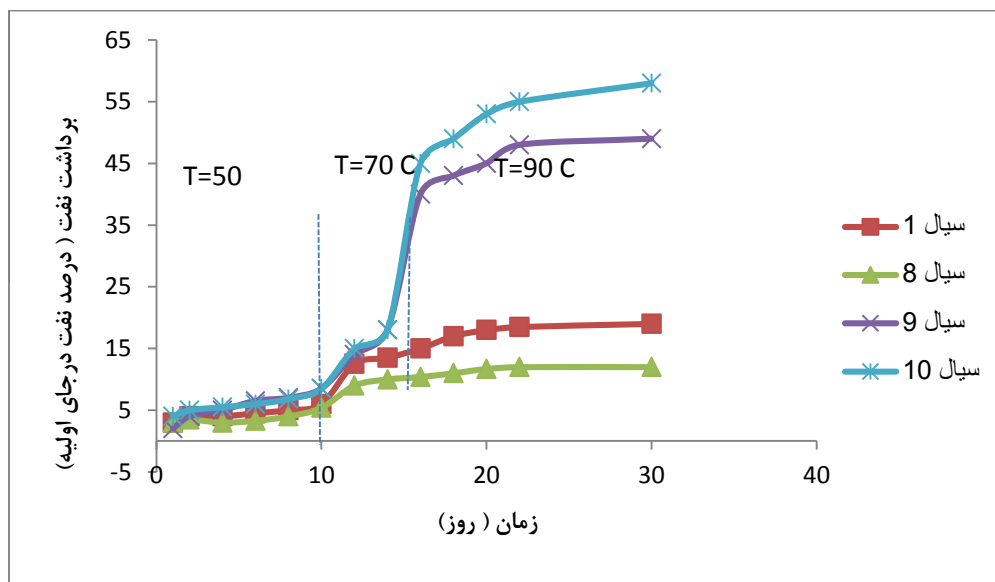


شکل ۶- تاثیر غلظت یون  $Mg^{2+}$  در محلول آب هوشمند بر میزان برداشت نفت در آزمایش آشام خودبخودی



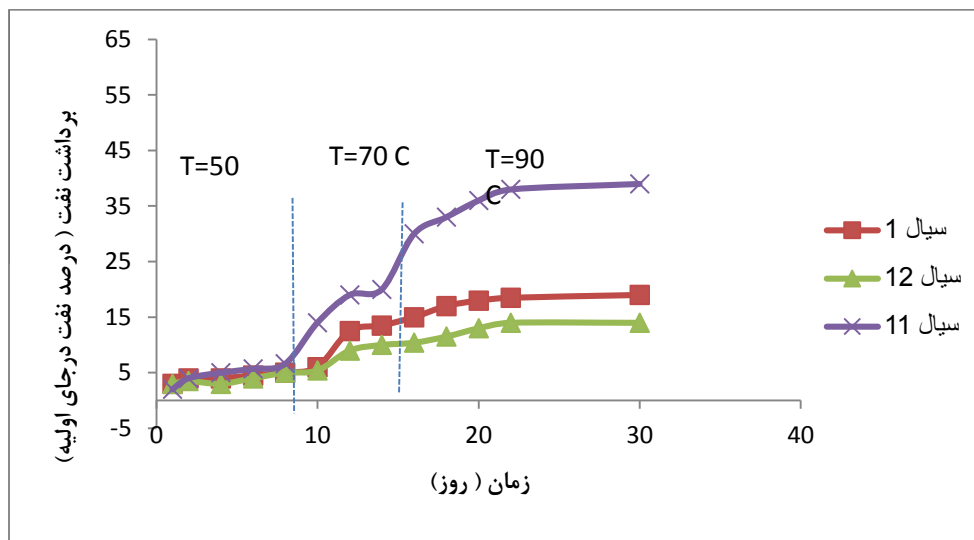
شکل ۷- تاثیر غلظت یون  $Ca^{2+}$  در محلول آب هوشمند بر میزان برداشت نفت در آزمایش آشام خودبخودی

نتایج شکل ۸ نشان می دهد که افزایش غلظت یون سولفات تاثیر چشمگیری بر میزان بازیابی نفت از مخازن کربناته با روش آب هوشمند در آزمایش آشام خودبخودی دارد. بطوریکه با افزایش غلظت یون  $SO_4^{2-}$  به سه برابر مقدار اولیه بازیابی نفت به حدود ۵۸٪ افزایش می یابد.



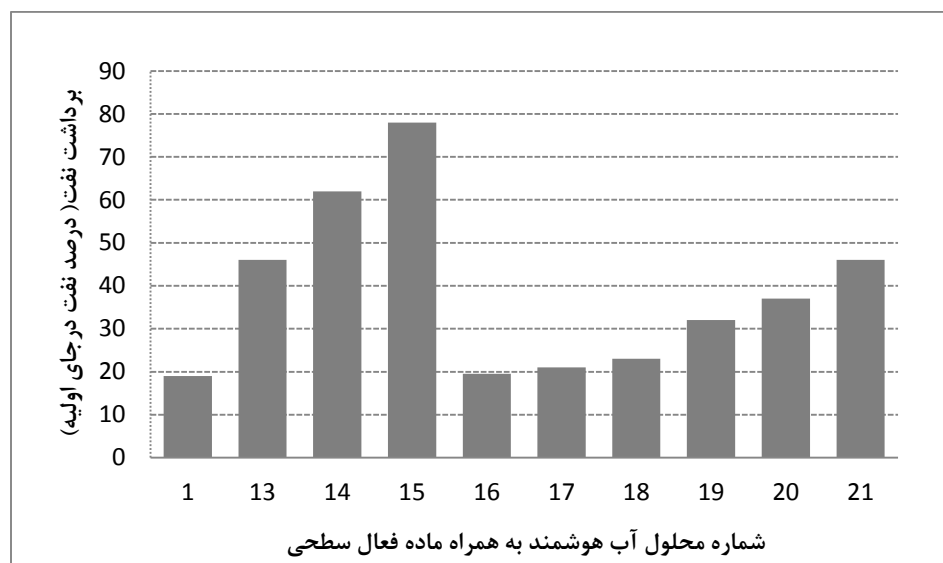
شکل ۸- تاثیر غلظت یون  $SO_4^{2-}$  در محلول آب هوشمند بر میزان برداشت نفت در آزمایش آشام خودبخودی

در شکل ۹ مشاهده می شود که افزایش غلظت یون  $Na^+$  مقدار بازیابی نفت را اندکی کاهش می دهد و به عبارتی از فعالیت یون های موثر در آب هوشمند می کاهد. اما کاهش مقدار یون  $Na^+$  موجب افزایش چشمگیر برداشت نفت می شود، به عبارتی با کاهش این یون دسترسی یون های فعال به اسید چرب جذب شده بر روی سطح افزایش می یابد.



شکل ۹- تاثیر غلظت یون  $Na^+$  در محلول آب هوشمند بر میزان برداشت نفت در آزمایش آشام خودبخودی

نتایج آزمایش های آشام خودبخودی در این پژوهش برای سنگ کربناته سازگار با پژوهش های محققین پیشین بر روی سنگ چالکی می باشد و به نظر می رسد که مکانیسم حاکم بر ازدیاد برداشت بر روی سنگ کربناته آهکی نیز تغییر ترشوندگی است. همچنین نتایج زاویه تماس در این پژوهش سازگار با نتایج آزمایش آشام خودبخودی بوده و به نوعی آن را تایید می نماید. نتایج آزمایش های آشام مربوط به محلول های آب هوشمند نشان می دهد که کارایی محلول ها در دماهای بالا بیشتر است. بنابراین آزمایش های آشام برای محلول های آب هوشمند و مواد فعال سطحی (سیالات ۲۱-۱۳) فقط در دمای  $90^{\circ}\text{C}$  انجام شدند. شکل ۱۰ میزان بازیابی نهایی نفت را برای محلول های ۲۱-۱۳ نشان می دهد که در اینجا نیز مشاهده می شود که مقدار بازیابی نفت در سورفکتانت کاتیونی به همراه آب هوشمند از بقیه مواد فعال سطحی بیشتر است.



شکل ۱۰- تاثیر غلظت سورفکتانت های مختلف در محلول آب هوشمند بر میزان برداشت نفت در آزمایش آشام خودبخودی در دمای  $90^{\circ}\text{C}$

#### ۴- نتیجه گیری

- ۱- با توجه به نتایج زاویه تماس و آزمایش آشام خودبخودی می توان دریافت که مکانیسم حاکم بر ازدیاد برداشت نفت با تکنیک آب هوشمند در سنگ های کربناته آهکی نیز تغییر ترشوندگی می باشد.
- ۲- غلظت کاتیون های دو ظرفیتی موجود در آب هوشمند مقدار زاویه تماس را کاهش داده و بازیابی نفت با آشام خودبخودی را افزایش می دهد.
- ۳- کاهش غلظت یون تک ظرفیتی  $\text{Na}^+$  برداشت نفت با آشام خودبخودی را افزایش می دهد.
- ۴- غلظت یون  $\text{SO}_4^{2-}$  به دلیل کاهش بار مثبت سطح و کاهش نیروی دافعه میان سطح و کاتیون های دو ظرفیتی بیشترین تاثیر را بر برداشت نهایی نفت دارد.

۵- در دماهای پایین آب هوشمند کارایی بسیار کمی بر فرایند آشام خودبخودی داشته اما با افزایش دما، فعالیت یون ها زیاد شده و بازیابی نفت به مقدار زیادی با روش آب هوشمند زیاد می شود

۶- از میان سه سورفکتانت CTAB ، SDS ، TX-100 ، افزایش غلظت سورفکتانت کاتیونی CTAB در محلول آب هوشمند، زاویه تماس سطح سنگ کربناته را به مقدار زیادی کاهش داده و بازیابی نفت را به مقدار زیادی افزایش می دهد.

## ۵- مراجع

- [1] L. Cuiec, *SPE*. (1984) 13211.
- [2] G.V. Chilingar, and, T.F. Yen, *Energy Sources II*. **7** (1983) 67.
- [3] L.E. Treiber, D.L. Archer, and W.W Owens, *SPE*. (1972) 03526.
- [۴] ص. احمدی، م. وفایی سفتی، ع. بهرامیان، ا. زنجیری، خ. جراحیان، دانشگاه سمنان، مجله اندیشه علوم، شماره ۲۶ (۱۳۹۲)، ۸۴-۷۳.
- [۵] ا. باقری، س. میربخشی، دانشگاه سمنان، مجله اندیشه علوم، شماره ۳۵ (۱۳۹۴)، ۸۴-۶۹.
- [6] A. M. Saidi., *Reservoir Engineering of Fractured Reservoirs: Fundamental and Practical Aspects, Total Publication, 1987.*
- [7] T.Austad, *Enhanced Oil Recovery Field Case Studies Book*, (2013).
- [8] Z. Yi and H. K. Sarma, *SPE*. (2012) 161631.
- [9] R.Gupta and K. K. Mohanty, *SPE*. (2008) 113407.
- [10] M.Salehi, S. J. Johnson, J. T, Liang , *Journal of Langmuir*. **24** (2008) 14099.
- [11] D. C. Standnes and T.Austad, *Journal of Petroleum Science & Engineering*. **28** (2000) 123.
- [12] S. Strand, et al, *Energy & Fuels*, **22** (2008) 3126.
- [13] M. A. Fernø, R.. Grønndal, J. Åsheim, A. Nyheim, M. Berge, A. Graue, *Energy & fuels*. **25** (2013) 1697.
- [14] J. Fathi, T. Austad, S. Strand, *Energy & Fuels*. **24** (2010) 2514.
- [15] A. Zahid, A. A. Shapiro, H. Stenby, *Energy & Fuels*. **26** (2012) 3407.

