

بررسی کارآیی و اثر افزودنی مهار کننده مهاجرت گاز بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی سیمان حفاری در شرایط واقعی چاه

حمید سلطانیان^{*}، محمد عطایی^۱، رضا خالو کاکائی^۱ و عزت ا... کاظمزاده^۲

۱- دانشکده معدن، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

۲- پژوهشکده مهندسی نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۴/۲۲ تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۱۲

چکیده

مهاجرت گاز و سیالات سازندی به درون ستون سیمان یکی از مشکلات متداول و در عین حال پرهزینه چاه‌های گازی و بعضی چاه‌های نفتی است، که می‌تواند پیامدهای زیانباری را به دنبال داشته باشد. در همین راستا، شرکت‌های مختلف نفتی افزودنی‌های مختلفی را تحت عنوان «ضد مهاجرت گاز» ارائه نموده‌اند تا خطر مهاجرت گاز به درون سیمان به مقدار قابل توجهی کاهش یا به طور کامل حذف گردد. با توجه به خصوصیات مخازن گازی و نفتی ایران، وجود این افزودنی‌ها در فرمول دوغاب سیمان اغلب چاه‌ها لازم است. مطالعات انجام شده بر روی یکی از مخازن گازی نشان داده است با وجود اینکه در ترکیب دوغاب سیمان چاه‌های این مخزن از افزودنی ضد مهاجرت گاز استفاده شده ولی در بیشتر موارد هنوز مشکل مهاجرت گاز مشاهده گردیده است. در این مقاله به منظور پیدا کردن عوامل احتمالی، سعی بر آن شد که افزودنی ضد مهاجرت گاز به کار گرفته شده در ترکیب دوغاب سیمان، با استفاده از دستگاه منحصر به فرد آنالیز مهاجرت گاز مورد کنترل کیفی قرار گیرد و تاثیر آن بر روی خواص مختلف دوغاب سیمان اعم از خواص فیزیکی و مکانیکی مشخص گردد. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحقیق می‌توان گفت که صرفاً با افزودن ماده ضد مهاجرت گاز قادر نخواهیم بود که از مهاجرت گاز در ستون دوغاب سیمان جلوگیری کنیم. لذا در طراحی دوغاب سیمان مطلوب، باید ضمن به دست آوردن مقدار مصرف بهینه، تمامی پارامترهای موثر در کنترل مهاجرت گاز که شامل کاهش مقدار آب آزاد در حد صفر، افت صافی زیر ۵۰ میلی لیتر API، مدت زمان رسیدن به مقاومت فشاری ۵۰۰ psi در کمتر از ۵ hr، مدت زمان نیم‌بندش بین ۳۰ تا ۷۰ Bc حداکثر ۲۵ min و رشد بسیار سریع مقاومت ژله‌ای بین ۲۵۰ تا (lb/100 ft²) ۵۰۰ است برآورده گردد، که خوشبختانه تمامی موارد فوق با کمک افزودنی ضد مهاجرت گاز (PK-90) ساخت داخل کشور تامین گردیده است.

کلمات کلیدی: مهاجرت گاز، افت صافی، دوغاب سیمان، مقاومت فشاری، افزودنی ضد مهاجرت گاز، مقاومت ژله‌ای، خواص رئولوژیکی

مقدمه

سیمان در این مرحله متفاوتند و مهمترین عامل، فشار روزه‌ای داخل سیمان است. تا زمانی که این فشار از فشار سازند گازدار بیشتر است، گاز قادر به ورود به داخل ستون دوغاب سیمان نخواهد بود و فشار روزه‌ای دوغاب سیمان تابع حجم آب موجود در ماتریکس دوغاب سیمان است و هر نوع کاهش در این حجم موجب کاهش متقابل فشار روزه‌ای دوغاب سیمان می‌شود و بنابراین به گاز اجازه می‌دهد که وارد دوغاب سیمان شود [۱ و ۲].

در طول فرآیند انتقال دوغاب سیمان از حالت یک سیال واقعی به یک ماده ژل نیم بند، دو پدیده در کاهش حجم آن موثر می‌باشند که عبارتند از [۳]:

- هیدراته شدن سیمان^۴

- افت صافی دوغاب سیمان

واضح است که کنترل پدیده اول مشکل می‌باشد اما امکان اینکه بتوان مقدار افت صافی دوغاب سیمان را با استفاده از مواد کنترل کننده افت صافی کاهش داد وجود دارد [۴].

کنترل افت صافی دوغاب سیمان باعث به حداقل رسیدن افت فشار روزه‌ای دوغاب سیمان می‌شود و به همین دلیل دوغابی با حداقل افت صافی، بهترین گزینه برای جلوگیری از مهاجرت گاز است [۵].

بر اساس استاندارد انجمن نفت آمریکا^۵ مناسبترین دوغاب سیمان از نظر مقابله با مهاجرت گاز دوغابی با افت صافی حداکثر ۵۰ cc در مدت زمان ۳۰ min است و در مقادیر بیش از این نه تنها نفوذپذیری سیمان افزایش می‌یابد بلکه ساختار سیمان نیز تضعیف می‌شود. توانایی گاز برای ورود به داخل دوغاب سیمان، تابعی از مقاومت برشی دوغاب سیمان است. هر چه دوغاب سیمان سریع‌تر بتواند مقاومت برشی خود را افزایش دهد، احتمال مقابله با مهاجرت گاز در داخل دوغاب سیمان بیشتر

مهاجرت گاز از داخل دوغاب سیمان به صورت ایجاد کانال بیشتر در هنگام مرحله تبدیل دوغاب سیمان از حالت مایع به جامد رخ می‌دهد. در هنگام عملیات سیمان کاری و در زمانی که دوغاب سیمان به صورت مایع است، مهمترین عاملی که از ورود گاز به داخل دوغاب سیمان جلوگیری می‌کند، فشار هیدرواستاتیکی دوغاب سیمان و گل حفاری بالای آن است. تا زمانی که این فشار بیشتر از فشار روزه‌ای^۱ سازند حاوی گاز باشد، گاز وارد ستون دوغاب سیمان نخواهد شد. علاوه بر چگالی، پارامتر دیگری که می‌تواند بر فشار هیدرواستاتیکی ستون دوغاب سیمان اثر گذارد، حالت مقاومت ژله‌ای دوغاب سیمان است. به این دلیل که توانایی دوغاب سیمان برای انتقال فشار هیدرواستاتیکی اش به مقاومت ژله‌ای آن بستگی دارد. در نتیجه، هر چه مقاومت ژله‌ای کمتر باشد، توانایی انتقال فشار هیدرواستاتیکی در فضای حلقوی بیشتر است، به همین دلیل در هنگام طراحی و مخلوط کردن دوغاب سیمان و همچنین سیالات جداساز^۲، لازم است بررسی‌های دقیقی صورت گیرد تا آنها قابلیت حفظ و انتقال فشار هیدرواستاتیکی بیشتر از فشار روزه‌ای سازند را دارا باشند. به هر حال جهت پیشگیری از هرزروی دوغاب سیمان و وقوع احتمالی فوران گاز یا مایع، فشار هیدرواستاتیکی در فضای حلقوی چاه در هر عمقی نباید از گرادیان فشار شکست^۳ سازند بیشتر باشد. زمانی که دوغاب سیمان شروع به هیدراته شدن می‌کند، از حالت یک سیال واقعی که تمام فشار هیدرواستاتیکی اش را منتقل می‌کند به یک ماده ژل مانند نیم بند تبدیل می‌شود، در این حالت ذرات سیمان، حالت یک توده خمیری شکل به خود می‌گیرند که دیگر فشار هیدرواستاتیکی را منتقل نمی‌کنند و در عوض، فشار هیدرواستاتیکی اولیه دوغاب سیمان در داخل خلل و فرج ماتریکس سیمان محصور می‌شود. در نتیجه، اقدامات لازم برای جلوگیری از ورود گاز به

1. Pore Pressure

2. Spacer Fluids

3. Formation Fracture Gradient

4. Cement Hydration

5. American Petroleum Institute (API)

با یک افزودنی ضد مهاجرت گاز، قادر خواهیم بود که تمامی عوامل ذکر شده را خنثی و از مهاجرت گاز جلوگیری کنیم. در این مقاله سعی شده است با انجام آزمایش‌های مختلف، اثرات یکی از افزودنی‌های ضد مهاجرت گاز پر استفاده در ایران مورد بررسی قرار گیرد [۶].

فرایند هیدراته شدن سیمان

هنگامی که هیدراته شدن سیمان آغاز می‌شود ذرات سیمان آب درون ساختار را به تدریج مصرف کرده و یک ساختار توده‌ای خمیری را به وجود می‌آورند، که انتقال فشار هیدرواستاتیکی کامل توسط ستون دوغاب سیمان را محدود می‌کند. تا زمانی که این فشار از فشار گاز سازند بالاتر باشد گاز نمی‌تواند به درون دوغاب سیمان وارد شود ولی به هر حال هر چه عمل هیدراته شدن سریع‌تر می‌شود آب بیشتر مصرف شده و در نهایت به نقطه‌ای می‌رسیم که فشار هیدرواستاتیکی ستون دوغاب سیمان از فشار سازندی کمتر می‌شود. در این نقطه حساس اگر مقاومت برشی سیمان بیشتر از نیروی برشی ایجاد شده توسط گاز باشد، فشار گاز نمی‌تواند بر ساختار ایجاد شده در سیمان غلبه کند و مهاجرتی صورت نمی‌پذیرد. شکل ۱ فرآیند هیدراته شدن دوغاب سیمان را در مراحل مختلف نشان می‌دهد [۷].

فرآیند هیدراته شدن سیمان، سه مرحله قبل از بندش سیمان را طی می‌کند که عبارتند از:

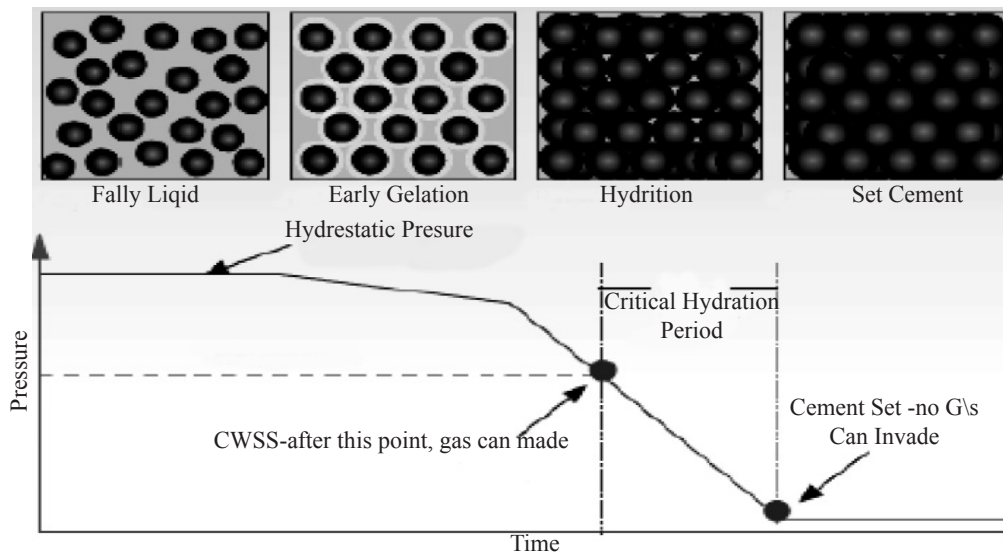
مرحله دوغاب سیمان

در این مرحله، سیمان در حال حرکت با فاز پیوسته و اکنش می‌دهد. این بدین معنی است که دوغاب سیمان در نقاط مختلف در داخل چاه خواص رئولوژیکی متفاوتی خواهد داشت. در این مرحله دوغاب سیمان در طول دوره زمانی هیدراته شدن، برای مدت زمان معینی از مدل پاور لاول^۱ پیروی می‌کند [۴ و ۸].

است. بر همین اساس زمانی که مقدار مقاومت برشی به ۵۰۰ psi برسد احتمال ورود حباب‌های گاز به داخل ستون دوغاب سیمان صفر خواهد بود. زمانی که هیدراته شدن دوغاب سیمان تمام می‌شود، سیمان به یک ماده صلب نفوذناپذیر تبدیل می‌شود. در این مرحله، مهاجرت گاز تنها از طریق کانال‌هایی واقع در سطح تماس سیمان با سازند و سیمان با لوله جداری امکان پذیر است. وجود چنین کانال‌هایی تابع کیفیت اتصال سیمان با سازند، سیمان با لوله جداری و همچنین وجود هر نوع شکست مکانیکی در سیمان است. با در نظر گرفتن این پدیده‌ها، راه‌حل‌های متفاوتی برای مقابله با مهاجرت گاز به درون دوغاب سیمان به کار گرفته شده است [۶].

اگر چه، مهاجرت گاز در عمق زیاد موضوعی پیچیده است، لیکن مهاجرت گاز در عمق کم حتی موضوعی بحث‌انگیزتر است، چرا که این عامل (عمق کم) باعث می‌شود که تامین فشار هیدرواستاتیکی لازم برای مقابله با لایه گازدار مشکل باشد، به علاوه وجود لایه‌های ضعیف و کم مقاومت مشکل دیگری به نام شکست سازند را به وجود می‌آورد. بنابراین از دوغاب‌های سنگین وزن برای اعمال فشار هیدرواستاتیکی بیشتر به خاطر ترس از هرزروی پرهیز می‌شود. علاوه بر این، دمای کم باعث تاخیر در دوره انتقالی سیمان از حالت سیال به حالت دوفازی و در نهایت به حالت ماده جامد صلب می‌شود. از آنجایی که دوغاب سیمان در حین این مراحل انتقالی بیشترین قابلیت انتقال گاز را دارد، لذا بایستی دوغاب سیمان را طوری طراحی کرد که در مقابل مهاجرت گاز کاملاً مقاوم باشد [۶].

افزودنی‌های ضد مهاجرت گاز زیادی توسط شرکت‌های مختلف به بازار ارائه شده است و به صورت وسیع در میداین گازی و نفتی استفاده می‌شوند. سوالی که در اینجا مطرح است این که بازدهی این افزودنی‌ها تا چه حد می‌باشد و با توجه به اینکه عوامل بسیاری در مهاجرت گاز دخیل هستند آیا صرفاً



شکل ۱- فرآیند هیدراته شدن دوغاب سیمان

مرحله ژلگی

مواجه می‌شود نیاز به آب بیشتری برای تکمیل واکنش خود دارد، زیرا بیشتر آب خود را به صورت تراویده از دست می‌دهد و دیگر آبی در دسترس نیست. برخی از ذرات سیمان اتصال نزدیکی خواهند داشت و بر عکس آن، ذرات دیگری با واکنش تکمیل نشده و مقداری خلل و فرج در ساختمان سیمان ایجاد خواهند کرد و اگر گازی در سازند موجود باشد، این گاز جریان پیدا کرده و این خلل و فرج داخل ساختمان سیمان را پر خواهد کرد. بعد از مدت زمان مشخصی، گاز تحت فشار می‌تواند مهاجرت کرده و این خلل و فرج را به هم متصل کند و شبکه‌های محلی را به وجود آورد و این شبکه‌های محلی می‌تواند منشاء پیدایش ترک‌های میکروسکوپی در ساختمان سیمان باشد [۴ و ۸].

فعالیت آزمایشگاهی

بدون تردید طراحی دوغاب سیمان مناسب و بهینه، موثرترین راه در جلوگیری از رخ دادن مهاجرت گاز است. لذا خصوصیات دوغاب سیمان طراحی شده بایستی مطابق با استانداردهای API به قرار زیر باشد [۸ و ۹]:

- آب آزاد^۱ در حد صفر

این مرحله بحرانی‌ترین مرحله‌ای است که بندش دوغاب سیمان طی می‌کند. در این مرحله دوغاب سیمان بیشتر فاز پیوسته خود را به شکل تراویده در سازند از دست داده و دیگر جریان نمی‌یابد و دارای یک شکل سه بعدی تیکسوتروپیک است که ذرات سیمان را به هم متصل می‌کند و این اتصال‌ها به اندازه کافی قوی نیستند که دوغاب بالای خود را تحمل کنند. در طول این مرحله، سیمان چرخه نخست انبساط (از طریق واکنش آب و سیمان) و انقباض (واکنش کامل و اتصالات ملکولی) را طی می‌کند. در این مرحله حفظ فشار فضای حلقوی بین چاه و لوله جداری ممکن است به حذف خلل و فرج موضعی که در طول این مرحله تشکیل می‌شود کمک کند. در طول این مرحله گرانی دوغاب سیمان به اندازه ۱۵۰ بار بیشتر از مقدار اولیه در حین مخلوط شدن می‌رسد و تمام ذرات، اتصال‌های سه بعدی قوی‌تری در این مرحله تشکیل می‌دهند و در نتیجه دو چرخه پدیدار می‌گردد که طی آنها سیمان منبسط و منقبض می‌شود [۴ و ۸].

مرحله بندش سیمان

این مرحله به دنبال مرحله ژلگی اتفاق می‌افتد. در آغاز این مرحله، سیمانی که با منطقه متخلخل

1. Free Water

مهاجرت گاز استفاده شده بود ولی برخی چاه‌ها با مشکل مهاجرت گاز مواجه شده که نهایتاً به عملیات سیمان کاری ترمیمی منتهی شده بود. برای پیدا کردن دلایل احتمالی، برنامه دوغاب سیمان یکی از چاه‌های مشکل‌دار مورد بازبینی قرار گرفت و به طور همزمان اثرات مختلف افزودنی ضد مهاجرت گاز مربوطه بر روی دوغاب سیمان مشخص بررسی شد. فرمول اولیه دوغاب سیمان برای لوله جداری ۷ اینچ در جدول ۱ نشان داده شده است. جدول ۲ ترکیبات و فرمول‌های مختلفی از دوغاب سیمان را نشان می‌دهد، در این فرمول‌ها تلاش بر این بوده است که با ثابت نگه داشتن وزن مخصوص دوغاب سیمان و مقدار مصرف سایر افزودنی‌ها به جز ماده ضد مهاجرت گاز، اثر این افزودنی بر روی تمامی خصوصیات دوغاب سیمان که شامل آب آزاد، خواص رئولوژیکی، زمان نیم بندش، مقاومت فشاری، افت صافی استاتیکی و مدت زمان انتظار جهت شروع مجدد عملیات حفاری است مورد بررسی قرار گیرد. جداول ۳ و ۴ خواص رئولوژیکی دوغاب‌های طراحی شده را نشان می‌دهند.

- افت صافی استاتیکی خیلی کم (کمتر از ۵۰ cc (API
 - خواص رئولوژیکی مناسب
 - کوتاه بودن مدت زمان رسیدن به مقاومت فشاری ۵۰۰ psi
 - زمان انتقالی^۱ بسیار کوتاه
 - رشد سریع مقاومت ژله‌ای ۲۵۰ تا ۱b/100 ft² (حداکثر ۲۰ min)
 - کوتاه بودن زمان نیم بندش بین ۳۰ تا ۷۰ BC (حداکثر ۲۵ min)
 - به طور کلی طراحی این نوع دوغاب سیمان شامل چهار مرحله است:
 جمع‌آوری اطلاعات سرچاهی (شامل درجه حرارت، فشار، وزن گل حفاری و غیره)، تحلیل اطلاعات به دست آمده، طراحی دوغاب سیمان و در نهایت تست‌های آزمایشگاهی برای رسیدن به خواص مطلوب دوغاب سیمان و اصلاحات مورد نیاز. طبق مراحل ذکر شده ابتدا اطلاعات مربوط به یکی از مخازن گازی جمع‌آوری شد و پس از تجزیه و تحلیل اطلاعات مذکور، با وجود اینکه در فرمول دوغاب سیمان چاه‌های این مخزن گازی از افزودنی‌های ضد

جدول ۱- فرمول اولیه دوغاب سیمان برای لوله جداری ۷ اینچ

اطلاعات چاه			
دمای استاتیک: ۲۱۲ °F		دمای گردشی: ۱۵۳ °F	
نوع آب مصرفی: آب حفاری		نوع کلاس سیمان مصرفی: کلاس G	
وزن دوغاب سیمان: ۱۱۶ pcf ^۲			
ترکیبات دوغاب سیمان			
شماره	نوع افزودنی	مقدار مصرف	واحد
۱	ضد مهاجرت گاز	۰/۵	گالن بر کیسه
۲	کاهنده اصطحاک ^۳	۰/۳۵	درصد وزنی سیمان
۳	کندگر ^۴	۰/۳	درصد وزنی سیمان
۴	ضد کف ^۵	۰/۰۰۳	گالن بر کیسه

1. Transition Time
 2. Pound Per Cubic Foot
 3. Dispersant
 4. Retarder
 5. Antifoam

جدول ۲- ترکیبات دوغاب‌های سیمان مختلف

شماره دوغاب سیمان	سیمان کلاس G (پوند)	آب (گالن بر کیسه)	ضد مهاجرت گاز (گالن بر کیسه)	کندگر (درصد وزنی سیمان)	کاهنده اصطحکاک (درصد وزنی سیمان)	ضد کف (گالن بر کیسه)
۱	۱۱۰	۶/۲	۰	۰/۳	۰/۳۵	۰/۰۰۳
۲	۱۱۰	۵/۳	۰/۵	۰/۳	۰/۳۵	۰/۰۰۳
۳	۱۱۰	۴/۹	۱	۰/۳	۰/۳۵	۰/۰۰۳
۴	۱۱۰	۴/۶	۱/۲	۰/۳	۰/۳۵	۰/۰۰۳
۵	۱۱۰	۴/۲	۱/۶	۰/۳	۰/۳۵	۰/۰۰۳

جدول ۳- نتایج خواص رئولوژیکی دوغاب سیمان تنش برشی (lb/100 ft²)

شماره دوغاب	نرخ برش (دور در دقیقه)					
	۳	۶	۱۰۰	۲۰۰	۳۰۰	۶۰۰
۱	۳	۴	۱۸	۲۷	۴۱	۷۵
۲	۲	۵	۲۳	۴۳	۵۹	۱۱۵
۳	۳	۶	۲۵	۴۷	۶۵	۱۱۲
۴	۱	۳	۱۸	۳۵	۵۲	۹۹
۵	۲	۳/۵	۱۹	۳۲	۴۳	۶۳

جدول ۴- گرانیوی پلاستیکی و نقطه واروی مربوط به دوغاب‌های مختلف

شماره دوغاب	۱	۲	۳	۴	۵
نقطه واروی ^۱ (lb/100 ft ²)	۶/۵	۵	۵	۱	۷
گرانیوی پلاستیکی ^۲ (سنتی پویز)	۳۴/۵	۵۴	۶۰	۵۱	۳۶

آزمایش آب آزاد

آزمایش آب آزاد مطابق با استاندارد انجمن نفت آمریکا (API RP 10 B) و در شرایط اتمسفری انجام شده و نتایج آن در جدول ۵ نشان داده شده است. با توجه به نتایج حاصل شده از آزمایش‌ها، با افزایش مقدار افزودنی ضد مهاجرت گاز، آب آزاد سیستم دوغاب سیمان نیز کاهش می‌یابد، که اتفاق می‌تواند اثرات بسیار مطلوبی در پایداری دوغاب سیمان به خصوص در چاه‌های انحرافی و افقی داشته باشد که احتمال مهاجرت گاز در این نوع چاه‌ها بیشتر است.

سیمان به حالت سیال باقی مانده و قابل پمپ کردن است و در آزمایشگاه به مدت زمانی اطلاق می‌شود که قوام سیمان^۳ به BC^۴ ۷۰ برسد. این آزمایش در شرایط واقعی چاه در دمای گردش ۱۸۰ °F و فشار ۵۰۰۰ psi انجام شده است و نتایج آن در جدول ۶ آمده است و همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود با افزایش مقدار افزودنی ضد مهاجرت گاز، نه تنها مدت زمان نیم بندش دوغاب سیمان کوتاه گردیده است بلکه مدت زمان رسیدن دوغاب از BC ۳۰ تا BC ۷۰ که نقش بسیار مهمی در جلوگیری از مهاجرت گاز را دارد به طور محسوسی کاهش یافته است.

آزمایش زمان نیم بندش

زمان نیم بندش دوغاب سیمان مدت زمانی است که دوغاب

1. Yeild Point (YP)
2. Plastic Viscosity
3. Cement Consistency
4. Berden Unit of Consistency (Bc)

جدول ۵- نتایج آزمایش آب آزاد دوغاب‌های مختلف

شماره دوغاب	۱	۲	۳	۴	۵
درصد آب آزاد	۵	۳	۲/۵	۲	۰/۵

جدول ۶- نتایج آزمایش زمان نیم بندش دوغاب‌های سیمان مختلف

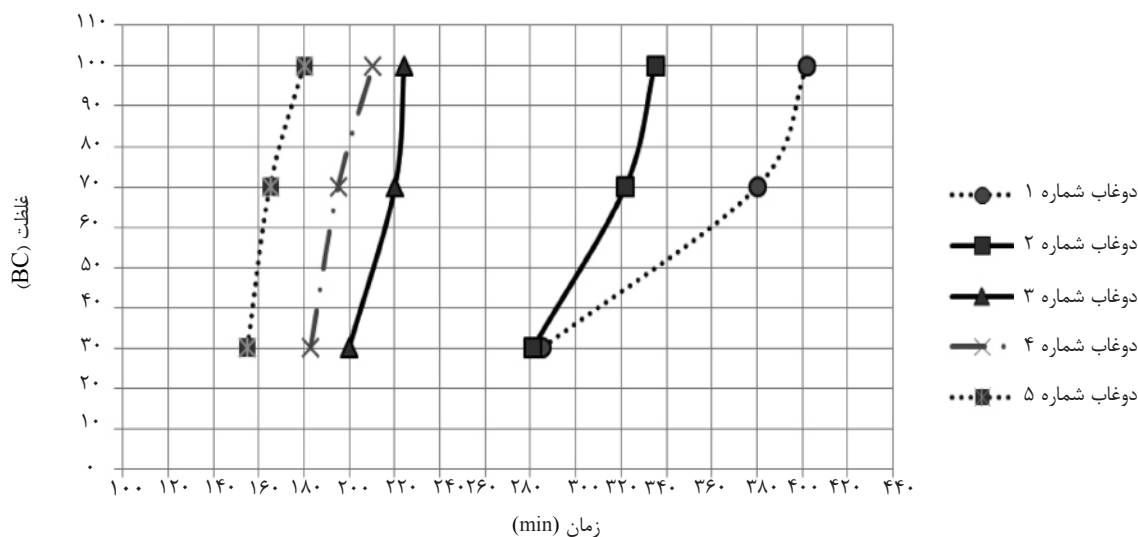
شماره دوغاب سیمان	زمان رسیدن به گرانیروی ۳۰ BC (min)	زمان رسیدن به گرانیروی ۷۰ BC (min)	زمان رسیدن به گرانیروی ۱۰۰ BC (min)
۱	۲۸۵	۳۸۰	۴۰۲
۲	۲۸۱	۳۲۲	۳۳۵
۳	۲۰۰	۲۲۰	۲۲۴
۴	۱۸۳	۱۹۵	۲۱۰
۵	۱۵۵	۱۶۵	۱۸۰

سیمان اندازه‌گیری می‌شود، میزان مقاومت فشاری و مدت زمان رسیدن به حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز جهت شروع مجدد عملیات حفاری است. در طول عملیات سیمان کاری، حفاری چاه متوقف می‌گردد و پس از اینکه مقاومت فشاری سیمان حداقل به (۵۰۰ psi) رسید ادامه عملیات حفاری امکان‌پذیر خواهد بود. بنابراین زمان رسیدن به حداقل مقاومت فشاری یک عامل بسیار مهم جهت شروع مجدد عملیات حفاری^۲ است.

همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار افزودنی ضد مهاجرت گاز این فاصله زمانی به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. در ترکیب دوغاب سیمان شماره ۵، کمترین فاصله بین ۳۰ تا ۱۰۰ BC مشاهده می‌گردد که بیان‌گر کوتاهترین زمان ممکن برای حالت ژل شدگی دوغاب سیمان و احتمال مهاجرت گاز در ستون دوغاب سیمان است.

آزمایش مقاومت فشاری^۱

یکی از پارامترهای بسیار مهم که در طراحی دوغاب



شکل ۲- تغییرات الگوی زمان بندش در دوغاب‌های سیمان شماره ۱ تا ۵

1. Compressive Strength
2. Wait on Cement (WOC)

محسوسی کاهش می‌یابد، به نحوی که زمان شروع به توسعه مقاومت فشاری در دوغاب سیمان شماره ۵ نسبت به دوغاب سیمان شماره ۱ حدود ۸۰٪ کاهش یافته و به ۵ hr می‌رسد. این مسئله بیان‌گر اثر مثبت افزودنی ضد مهاجرت گاز روی عمل هیدراته شدن دوغاب سیمان و عاملی در جهت جلوگیری از مهاجرت گاز در ساختار سیمان می‌باشد. جدول ۸ نشان دهنده مقاومت فشاری سیستم‌های مختلف بعد از ۵۰ hr است، که با افزایش مقدار افزودنی ضد مهاجرت گاز در ترکیبات سیمان، میزان مقاومت فشاری سیمان افزایش می‌یابد.

یکی از روش‌های اندازه‌گیری مقاومت فشاری سیمان، استفاده از دستگاه مقاومت فشاری آلتراسونیک^۱ با روش عبور امواج از درون ستون سیمان می‌باشد که در این مقاله تمامی آزمایش‌ها بر اساس روش استاندارد API RP 10 و در شرایط دمایی استاتیک ته چاهی^۲ ۲۱۲ °F و فشار ۳۰۰۰ psi اندازه‌گیری گردیده است. جدول ۷ مدت زمان سیستم‌های مختلف دوغاب سیمان را نشان می‌دهند، که طول می‌کشد تا به مقاومت فشاری اولیه ۵۰ psi برسد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود با افزایش مقدار افزودنی ضد مهاجرت گاز این مدت زمان به طور

جدول ۷- مدت زمان انتظار جهت شروع مجدد عملیات حفاری (WOC) برای دوغاب‌های سیمان مختلف

شماره دوغاب سیمان	۱	۲	۳	۴	۵
زمان رسیدن به مقاومت اولیه (دقیقه: ساعت)	۲۶:۲۲	۱۸:۵۶	۱۰:۵۹	۹:۵۶	۵:۴۶

جدول ۸- مقاومت فشاری دوغاب‌های سیمان مختلف بعد از ۵۰ hr

شماره دوغاب سیمان	۱	۲	۳	۴	۵
مقاومت فشاری سیمان پس از ۵۰ ساعت (psi)	۲۵۵۰	۲۶۸۰	۲۹۰۰	۳۱۵۰	۳۳۰۰

می‌باشد. تست‌های افت صافی توسط دستگاه افت صافی دینامیکی^۳ در شرایط دمایی گردشی ته چاه^۴ ۱۸۰ °F و فشار ۱۱۰۰ psi انجام شده است که نتایج آن در جدول ۹ نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها با افزایش مقدار افزودنی ضد مهاجرت گاز، مقدار افت صافی دوغاب سیمان به طور محسوسی کاهش می‌یابد که این موضوع می‌تواند به عنوان عاملی در جهت جلوگیری از مهاجرت گاز باشد.

آزمایش افت صافی

یکی از عواملی که باعث کاهش آب دوغاب سیمان در داخل چاه و در نتیجه کاهش فشار هیدروستاتیک آن می‌شود، افت صافی دوغاب سیمان در اثر مواجهه با محیط متخلخل و نفوذپذیر است، که خود می‌تواند یکی از عوامل فوق‌العاده موثر مهاجرت گاز در ستون دوغاب سیمان باشد. بر اساس استاندارد API بهترین ترکیب دوغاب سیمان، دوغابی با افت صافی کمتر از ۵۰ cc است که این مقدار با توجه به وزن دوغاب سیمان متفاوت

جدول ۹- نتایج آزمایش افت صافی دوغاب‌های سیمان مختلف

شماره دوغاب سیمان	۱	۲	۳	۴	۵
افت صافی استاتیکی (cc)	۴۰۰	۳۱۰	۲۰۱	۱۱۰	۵۳

1. Ultra Sonic Cement Analyzer (UCA)
2. Bottom Hole Static Temperature (BHST)
3. Modified Chandler Model 7120 Stirred Fluid Loss Test
4. Bottom Hole Circulating Temperature (BHCT)

بحث و نتایج

به BC ۱۰۰ و میزان زمان لازم برای توسعه ژل در دوغاب سیمان از مقدار ۲۵۰ تا ۵۰۰ lb/100 ft² باید حداکثر ۲۰ min باشد. همچنین میزان افت صافی دوغاب سیمان بین ۳۰ تا ۵۰ cc در ۳۰ min مطابق آزمایش استاندارد API است. بنابراین دوغاب سیمان شماره ۶ شرایط لازم، جهت بررسی در دستگاه آنالیز مهاجرت سیال را دارا بود. شکل‌های ۶ و ۷ نتایج حاصل از آزمایش مهاجرت گاز به درون ستون دوغاب سیمان را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت ژله‌ای، جهت محاسبه الگوی تغییرات فشار منفذی دوغاب سیمان به عنوان داده‌های ورودی به دستگاه آنالیز مهاجرت سیال استفاده شد. کلیه شرایط واقعی چاه شامل عمل‌آوری دوغاب سیمان، رخدادن افت صافی، کاهش فشار منفذی دوغاب سیمان و در نهایت مهاجرت سیال سازندی به درون ستون دوغاب سیمان در این دستگاه شبیه‌سازی شده است. با کاهش فشار منفذی سیمان و نزدیک شدن به فشار سازند گازدار (شکل ۶) فرایند نفوذ دادن سیال گازی به داخل دوغاب سیمان آغاز می‌شود. در ادامه، با افزایش اختلاف فشار تزریق گاز به دوغاب سیمان در داخل دستگاه، فشار منفذی دوغاب سیمان به زیر فشار تزریق گاز افت می‌کند. این امر بیانگر عدم مهاجرت گاز به داخل ساختار سیمان است، زیرا ارتباط فشاری بین گاز تزریق شده و دوغاب سیمان وجود ندارد و با گذشت زمان به علت ژل شدگی و گسترش مقاومت فشاری امکان نفوذ گاز از بین می‌رود. میزان مهاجرت گاز به داخل دوغاب سیمان برابر با ۸۰ cc طی ۵ hr بوده است (شکل ۷). بنابر این نرخ مهاجرت گاز برابر با cc/min ۲/۶۷ بوده است. با ارجاع به منابع علمی موجود در زمینه دستگاه FMA حداکثر میزان قابل قبول مهاجرت گاز برابر با cc/min ۳۰ می‌باشد.

با توجه به نتایج حاصل شده کاملاً مشهود است که فرمول دوغاب سیمان شماره ۱ که فاقد افزودنی ضد مهاجرت گاز است، حداقل شرایط استاندارد API برای جلوگیری از مهاجرت گاز را نداشته و به همین دلیل طراحی دوغاب سیمان چاه مذکور نتوانسته است جلوی مهاجرت گاز را بگیرد. در سایر سیستم‌های مختلف به ترتیب با افزایش مقدار افزودنی ضد مهاجرت گاز شرایط به سمت بهبود پیش رفته و نمونه شماره ۵ تمامی شرایط مورد نظر جهت مقابله با مهاجرت گاز را دارا می‌باشد اما با اطمینان نمی‌توان گفت که این ترکیب بهینه‌ترین ترکیب دوغاب سیمان است، لذا جهت اطمینان باید با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری مهاجرت گاز در شرایط واقعی چاه آزمایش نمود که لازمه آن داشتن میزان مقاومت ژله‌ای دوغاب سیمان می‌باشد، برای این منظور فرمول موجود در جدول ۱۰ را انتخاب نموده و در عمل تست مهاجرت گاز را انجام دادیم. این فرمول در حقیقت همان فرمول شماره ۵ می‌باشد که با اندکی تغییرات جزئی برای تست مهاجرت گاز در نظر گرفته شده است (به این فرمول، فرمول شماره ۶ اطلاق می‌کنیم). میزان افت صافی دوغاب سیمان شماره ۶ نسبت به دوغاب سیمان شماره ۵ تغییر محسوسی نداشته است (جدول ۱۱). جهت بررسی دوغاب سیمان به منظور کنترل مهاجرت گاز مجموعه کامل آزمایش‌های افت صافی، زمان نیم بندش، مقاومت فشاری و مقاومت ژله‌ای قبل از آزمایش اصلی مهاجرت گاز به درون دوغاب سیمان انجام شد. در ادامه دوغاب سیمانی جهت تست با دستگاه آنالیز مهاجرت سیال^۱ انتخاب شد، که در کلیه آزمایش‌های فوق نتایج قابل قبولی از خود ارائه نمود. شکل‌های ۳ تا ۵ به ترتیب نتایج آزمایش‌های زمان بندش، توسعه مقاومت فشاری و مقاومت ژله‌ای را نشان می‌دهند. جهت ارزیابی افزودنی ضد مهاجرت گاز در دوغاب سیمان، زمان لازم جهت افزایش گرانیروی دوغاب سیمان از ۳۰

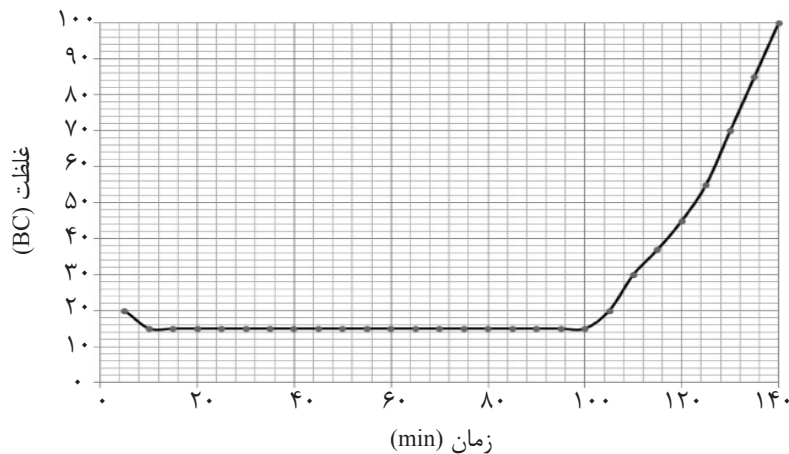
1. Fluid Migration Analyzer (FMA)

جدول ۱۰- دوعاب سیمان طراحی شده جهت اندازه‌گیری میزان مهاجرت گاز

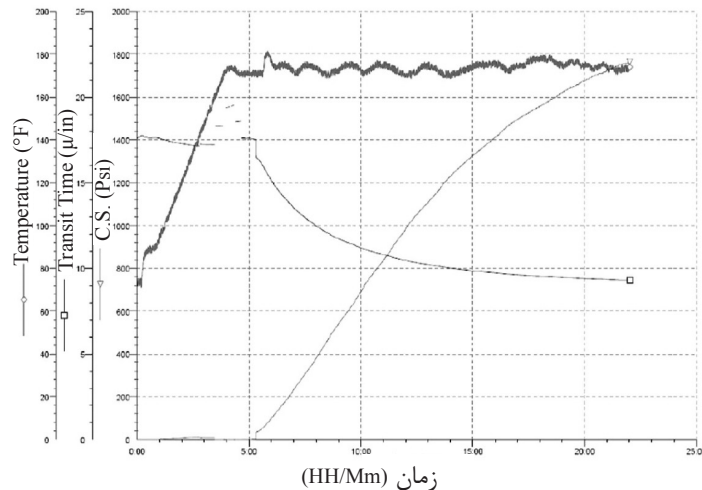
ترکیب دوعاب سیمان					
شماره دوعاب سیمان	سیمان کلاس G (پوند)	ضد مهاجرت گاز (گالن بر کیسه)	کندگر (پوند بر کیسه)	کاهنده اصطحاک (پوند بر کیسه)	آب حفاری (گالن بر کیسه)
۶	۱۱۰	۱/۵	۰/۴۴	۰/۴۴	۴/۹۸

جدول ۱۱- نتایج پارامترهای اندازه‌گیری شده دوعاب سیمان شماره ۶

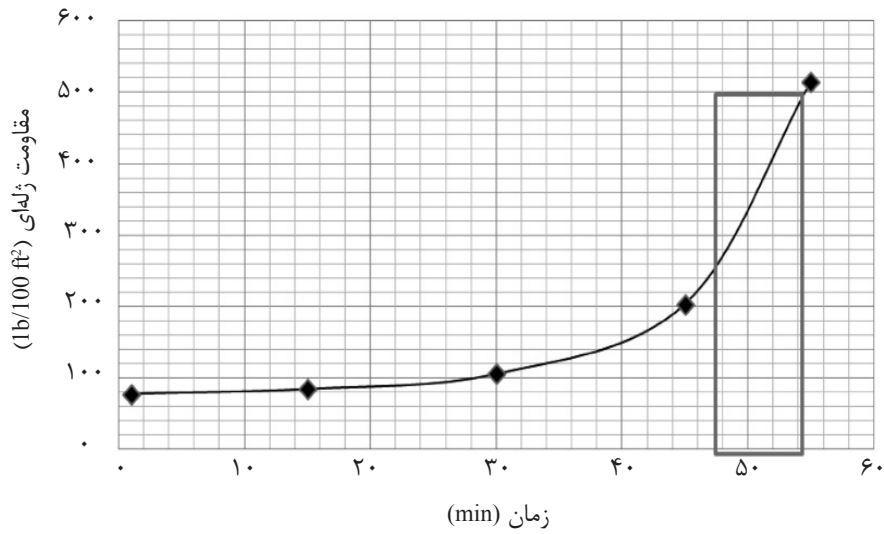
پارامترهای دوعاب سیمان					
وزن دوعاب سیمان (lb/ft ³)	تخلخل Φ (%)	زمان نیم بندش در فشار ۳۰۰۰ پام و دما ۱۸۰ °F (min)	مقاومت فشاری ۲۴ ساعته در فشار ۳۰۰۰ پام و دما ۱۸۰ °F (psi)	افت صافی استاتیکی در فشار ۱۰۰۰ پام و دمای ۱۸۰ °F (cc)	حجم واحد دوعاب سیمان (بشکه بر کیسه)
۱۱۵	۶۲	۱۳۸	۱۷۶۵	۴۰	۰/۳۵۴



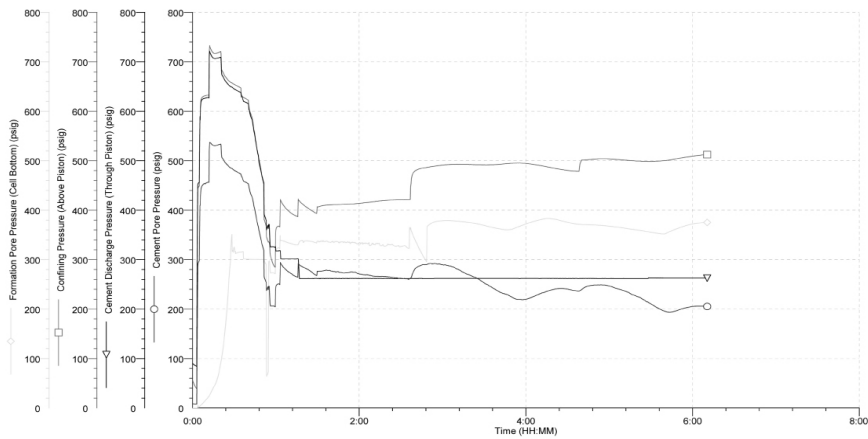
شکل ۳- آزمایش زمان نیم بندش دوعاب سیمان شماره ۶



شکل ۴- الگوی توسعه مقاومت فشاری دوعاب سیمان شماره ۶



شکل ۵- تغییرات مقاومت ژلهای دوغاب سیمان شماره ۶

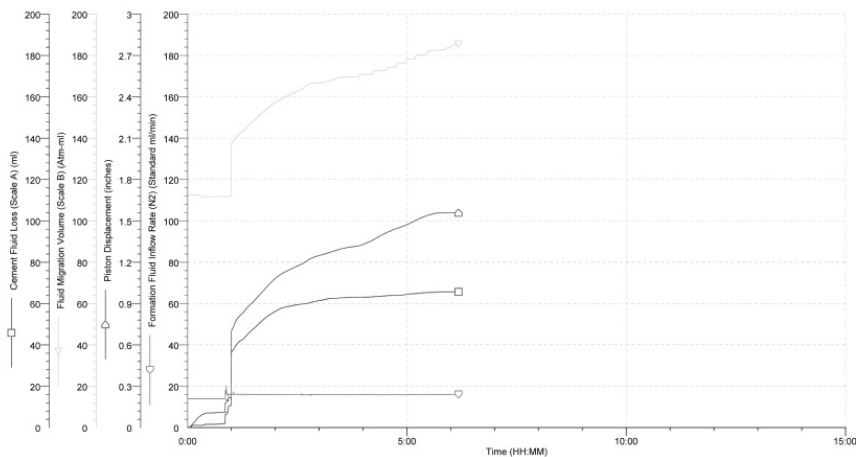


CHANDLER
ENGINEERING

Test File Name: 115-0001 D600 NISOC NO1.tst
Printed: 04/21/2014 02:28:41

Page 1

شکل ۶- تغییرات فشار منفذی و فشار تزریق گاز دوغاب سیمان طی آزمایش مهاجرت گاز



CHANDLER
ENGINEERING

Test File Name: 115-0001 D600 NISOC NO1.tst
Printed: 04/21/2014 02:29:19

Page 1

شکل ۷- تغییرات حجم سیال نفوذی به داخل دوغاب سیمان و صافاب خارج شده از آن در تست مهاجرت گاز

نتیجه گیری

- خواص رئولوژیکی مطلوب با افزایش مقدار افزودنی ضد مهاجرت گاز ایجاد می‌شود، که می‌تواند اثر مثبتی بر روی جابجایی گل حفاری و قرار دادن جریان سیمان در شرایط متلاطم داشته باشد.

- افزودنی ضد مهاجرت گاز اثر مطلوبی بر روی زمان نیم بندش دوغاب سیمان داشته و در انباشتگی زیاد می‌تواند به عنوان تندکننده عمل نماید.

- با افزایش مقدار افزودنی ضد مهاجرت گاز، مدت زمانی که طول می‌کشد تا گرانیروی دوغاب سیمان از ۳۰ BC به ۷۰ BC برسد به طور محسوسی کاهش می‌یابد که همین عامل می‌تواند اثر مطلوبی بر روی کنترل مهاجرت گاز داشته باشد، حداکثر زمان مجاز برای این حالت برابر با ۲۰ min است.

- بارزترین اثر مثبت افزودنی ضد مهاجرت گاز، کنترل افت صافی دوغاب سیمان است که با زیاد شدن مقدار افزودنی ضد مهاجرت گاز افت صافی در حد استانداردهای API به دست می‌آید. میزان پیشنهادی برای دوغاب‌های مورد نظر جهت کنترل مهاجرت گاز برابر با حداکثر ۵۰ cc API است.

- افزایش افزودنی ضد مهاجرت گاز، اثر مثبتی بر روی مقاومت فشاری و عمل هیدراته شدن دوغاب سیمان داشته و همچنین مدت زمانی که طول می‌کشد تا دوغاب سیمان به مقاومت فشاری ۵۰ و سپس ۵۰۰ psi برسد به طور محسوسی کاهش می‌یابد. حداکثر انقباض و کم شدن حجم سنگ سیمان طی زمان توسعه مقاومت فشاری، بین ۵۰ تا ۵۰۰ psi به ویژه ۵۰ تا ۱۵۰ psi رخ می‌دهد. وقوع انقباض در سیمان سبب توسعه ریز حلقوی‌ها بین سیمان و لوله جداره و سیمان با سازند شده و یکی از مهمترین سازوکارهای مهاجرت گاز به پشت

لوله جداره می‌باشد.

- یکی از مهمترین آزمایش‌ها در ارزیابی دوغاب‌های سیمان جهت جلوگیری از نفوذ سیالات سازندی، آزمایش مقاومت ژله‌ای استاتیکی است. قبل از انجام آزمایش مهاجرت گاز با دستگاه FMA باید از نتایج آزمایش مقاومت ژله‌ای استاتیکی برای انجام محاسبات اولیه آزمایش مهاجرت گاز استفاده نمود.

- با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گفت که صرفاً با این افزودنی ضد مهاجرت گاز ما قادر نخواهیم بود که از مهاجرت گاز جلوگیری کنیم لذا در طراحی دوغاب سیمان بهینه باید مجموعه‌ای از عوامل مختلف را در نظر بگیریم. یکی از مهمترین عوامل، به کارگیری میزان بهینه مصرف افزودنی ضد مهاجرت گاز است. تصور اینکه با افزایش میزان مصرف افزودنی ضد مهاجرت گاز به مقدار دلخواه میزان مهاجرت گاز به درون ستون دوغاب سیمان کم می‌شود اشتباه است، زیرا هر افزودنی در کنار تاثیرات مثبتی که دارد، ممکن است عوارض جانبی منفی نیز بر روی خواص دوغاب سیمان داشته باشد مانند کندگری بیش از حد، توسعه ژل شدگی نامطلوب، افزایش زمان توسعه مقاومت فشاری و غیره.

- با استفاده از الگوریتم طراحی دوغاب سیمان، می‌توان میزان بهینه مصرف افزودنی ضد مهاجرت گاز را تعیین کرد. این امر سبب ارتقاء شاخص‌های طراحی و همچنین کاهش هزینه‌های آن می‌شود. همچنین با بومی سازی افزودنی‌های کلیدی و شاخص مانند افزودنی ضد مهاجرت گاز (PK-90) می‌توان سبب صرفه‌جویی ارزی قابل توجهی در صنعت نفت گشت.

مراجع

- [1]. Bonett A. and Pafitis D., "Getting to the root of gas migration," *Oil Field Review Spring.*, pp. 36-49, 1996.
- [2]. Carter G. and Slagle K., "A Study of completion practices to minimize gas communication," Paper SPE 3164 Presented at Meeting., Held in Amarillo, Texas, Nov. 16-17, 1970.
- [3]. Rogers M. J. and Dillenbeck R. L., "Transition time of cement slurries, definitions and misconceptions related to annular fluid migration," SPE 90829, 2004.
- [4]. Baret J. F. and Daccord G., *How fluid loss influences primary cementing: literature review and methodology*, SPE 25150, pp. 133-138, 1994.
- [5]. Carré G., Pradié E., Christie A., Delabroy L. and Greeson D. F., "High expectations from deepwater wells," *Oil Field Review.*, pp. 36-51, 2003.
- [6]. Webster W. W. and Eikerts J. V., "Flow after cementing - field and laboratory study," SPE 8259, pp. 23-26, 1979.
- [7]. Buraik K. A., Abdulqer K. A. and Basibes R., "Prevention of shallow gas migration through cement," SPE 47745, 1998.
- [8]. Robert M., "Gas flow in cements," SPE 11207, 1985.
- [9]. Stewart R. B. and Schouten F. C., "Gas invasion and migration in cemented annuli," SPE Drilling Engineering, PP. 77-82, 1988.
- [10]. Jennings S. S. and Ansari A. A., "Gas migration after cementing greatly reduced," SPE 11209, 2003.
- [11]. Boumgarte C., Thiercelin M. and Klaus D., "Case studies of expanding cement to prevent micro annular formation," SPE 56535, 1999.
- [12]. Aiqin W., Chengzhi Z. and Ningsheng Z., "The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement," *Cement and Concrete Research*, pp. 1721-1726, 1999.
- [13]. Rahimirad M. and Baghbadorani D. J., "Properties of oil well cement reinforced by carbon nanotubes", SPE 156985, 2012.