تحقیقات بتن
سال هفدهم، شمارهٔ اول
بهار ۱۴۰۳
ص ۴۵ – ۳۵
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸

بررسی تأثیر ترکیب سیمان چاه نفت بر یکپارچگی غلاف سیمان

محمد برخوردار
کارشناسی ارشد مهندسی نفت، دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند.
سید شهاب طباطبایی مرادی *
استادیار دانشکده مهندسی نفت و گاز، دانشگاه صنعتی سهند.

چکیده

حفظ یکپارچگی چاه که تا حد زیادی به ویژگی‌های سیمان وابسته است، می‌تواند سبب جلوگیری از خسارات جبران‌ناپذیر محیط زیست شود. سیمان به منظور حفظ یکپارچگی باید دارای تخلخل و تراوایی کم، مقاومت کافی پیوند در سطوح تماس و ویژگی‌های مکانیک سنگی مناسب به منظور مقاومت در برابر تنش‌ها باشد. در این پژوهش، ترکیبات سیمان شامل سیمان پورتلند، سیلیکافلور و اکسیدمنیزم ساخته و به منظور ارزیابی توانایی ترکیبات در ایجاد یکپارچگی، آزمایشات بر روی مواد اولیه، دوغاب و سنگ سیمان انجام شدند. این آزمایشات شامل اندازه‌گیری‌های چگالی، سیال آزاد، تخلخل، تراوایی، مقاومت پیوند، مقاومت فشاری و مدول یانگ بود. نتایج نشان داد که با افزودن سیلیکافلور مقدار تخلخل و تراوایی سنگ سیمان به ۹/۷۶ درصد و ۰/۰۳۷ میلی دارسی کاهش و با افزودن اکسیدمنیزیم، مقدار مقاومت پیوند و مدول یانگ به ۵۰۳/٤ و ٤۱۸/۳۲ مگاپاسگال افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که افزودن این مواد باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود.

واژه‌های کلیدی: **سیمان، یکپارچگی، مقاومت پیوند، تخلخل، تراوایی، مقاومت فشاری.**

* نویسنده مسئول: stabatabaee@sut.ac.ir

۱- مقدمه

در طول عملیات حفاری، لوله‌های جداری، به‌منظور جلوگیری از آلوده شدن آب‌های زیر زمینی، کمک به پایداری و جلوگیری از ریزش دیواره رانده می شوند. بعد از راندن لوله جداری، بین سازند و لوله جداری با هدف ثابت کردن لوله‌ها در محل مورد نظر و محافظت از آن در برابر تنش‌های موجود، سیمان می شود. در نتیجه سازند، لوله جداری و سیمان تشکیل یک سیستم جامد را می‌دهند که هر جزء از آن دارای خواص مکانیکی متفاوت است و باید در برابر تنش‌های القا شده به سیستم در شرایط مختلف از جمله تولید یا تزریق، تنش‌های ناشی از حفاری، عملیات‌های تکمیل و تعمیر چاه و تنش‌های ناشی از فعالیت‌های تکتونیکی یکپارچگی خود را حفظ کند. در صورتی که هر کدام از این اجزا، یکپارچگی خود را از دست دهد، یکپارچگی کل چاه به خطر می‌افتد که مشکلات بعدی نظیر فوران چاه، نشت ناخواسته سیال مخزنی، مشکلات زیست‌محیطی و در نهایت هدررفت زمان و سرمایه را در پی دارد [۱-۳].

تا کنون تعاریف مختلفی از یکپارچگی چاه بر مبنای استانداردهای مختلف ارائه شده است. اما با در نظر گرفتن تعاریف مختلف، می توان نتیجه گرفت که مفهوم یکپارچگی چاه، ایجاد محیطی ایزوله و پایدار در طول عمر یک چاه است که از جریان ناخواسته سیالات سازندی جلوگیری کند. با توجه به این تعریف، یکپارچگی چاه تا حد زیادی به سیمان و ویژگی‌های آن وابسته است. نقش اصلی سیمان در حفظ یکپارچگی چاه ایجاد یک محیط ایزوله در پشت لوله‌های جداری و در محل تماس سازندها است. در واقع غلاف سیمان که در فضای حلقوی بین لوله جداری و سازند قرار می‌گیرد، به‌عنوان مانع فیزیکی درون چاه از جریان ناخواسته سیالات از لایه‌ای به لایه‌ی دیگر و درنهایت به سطح جلوگیری می‌کند [۴].

سیمان مناسب به منظور حفظ یکپارچگی چاه باید دارای تخلخل و تراوایی پایین باشد تا از نفوذ سیال به درون سیمان جلوگیری کند. همچنین خواص مکانیکی سیمان باید به گونه‌ای باشد که در برابر تنش‌های وارده در طول عمر یک چاه مقاومت نماید. به غیر از این موارد، پیوند بین سیمان-لوله جداری و سیمان-سازند نیز باید دارای مقاومت کافی باشد تا از جریان سیالات از مرزهای تماس سیمان جلوگیری کند. به منظور تشکیل پیوند مستحکم در مرزهای تماس، سیمان باید دارای کمترین خاصیت انقباض باشد. بدین معنا که حجم سیمان پس از سفت شدن نسبت به حجم دوغاب اولیه کاهش پیدا نکند [۵-۷].

در موضوع نقش سیمان حفاری در حفظ یکپارچگی چاه، پژوهش‌های مختلفی با انجام مطالعات آزمایشگاهی یا مدلسازی صورت گرفته است. ویگنس و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی علل عدم یکپارچگی در چاه‌های نفت و گاز پرداختند. در این پژوهش تعداد ۴۰۶ چاه بررسی که از بین آن‌ها ۷۵ حلقه چاه مشکل عدم یکپارچگی داشتند. نتایج پژوهش نشان داد که عوامل مرتبط با لوله تولیدی، لوله جداری، سیمان و شیرهای ایمنی درون چاهی مهمترین دلایل عدم حفظ یکپارچگی در چاه‌های مورد مطالعه بوده‌اند [۸].

تئودوریو و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی یکپارچگی سیستم لوله جداری، سیمان و سازند پرداختند. پژوهشگران بیان داشتند که با توجه به افزایش نیاز به انرژی، بهره‌برداری از ذخایر نفت در مخازن عمیق‌تر و دارای شرایط پیچیده‌تر ضروری است. در این شرایط، احتمال از بین رفتن یکپارچگی چاه در اثر از بین رفتن پیوند سیمان، ایجاد ترک‌های شعاعی و تغییر شکل پلاستیک سیمان افزایش می‌یابد. بنابراین پژوهشگران استفاده از ترکیبات پیشرفته سیمان شامل افزونه‌هایی نظیر فیبر، رزین اپوکسی، پلیمر وگرافیت را جهت افزایش راندمان عملیات سیمانکاری پیشنهاد کردند [۹].

یوان و همکاران (۲۰۱۳) با در نظر گرفتن دو ترکیب شکننده و الاستیک، تأثیر عواملی مانند مکان چاه، قطر حفره، دما، موقعیت لوله جداری، فشار منفذی و ضرایب یانگ و پوآسون سیمان را بر یکپارچگی چاه بررسی نمودند. در نتیجه‌گیری پژوهشگران نشان دادند که استفاده از ترکیب سیمان الاستیک تا ۱۲ درصد مقاومت مچالگی لوله جداری را افزایش داده و در نتیجه عملکرد بهتری در حفظ یکپارچگی چاه دارد [۱۰].

طباطبایی‌مرادی و همکاران (۲۰۱۵) با در نظر گرفتن شرایط حفظ یکپارچگی چاه به توسعه ترکیب‌های سیمان دارای ویژگی‌هایی نظیر حداقل سیال آزاد، زمان بندش کافی، مقاومت فشاری زیاد و انبساط‌پذیری پرداختند. در این پژوهش ۴ ترکیب سیمان به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج نشان داد که ترکیب بهینه سیمان در حفظ یکپارچگی، حاوی ۷۰ درصد جرمی سیمان پرتلند، ۱۵ درصد جرمی تترا اکسیدمنگنز و ۱۵ درصد جرمی پودر

سیلیکا بود [۱۱].

شرپرز (۲۰۱۵) به تحلیل یکپارچگی سیمان با در نظر گرفتن تنش‌های متفاوت در طول عمر چاه و تغییر ویژگی مواد پرداخت. نتایج پژوهش نشان داد که به منظور حفظ یکپارچگی چاه، توسعه ترکیب سیمان با ویژگی عایق‌کنندگی بالا ضروری است. مراحل مورد تحلیل در این پژوهش شامل مرحله حفاری، سیمان‌کاری، راندن لوله جداری، تکمیل چاه، تولید و رهاسازی چاه بود که در هر مرحله آنالیزهای دو بعدی و سه بعدی شبکه شکستگی‌های سیمان انجام شد [۱۲].

در سال ۲۰۱۹، فی و همکاران به بررسی عوامل موثر بر حفظ یکپارچگی چاه در مناطق با فشار و دمای بالا پرداختند. نتایج نشان داد که از بین رفتن یکپارچگی سیمان به دلیل تغییر شکل پلاستیک، ترک خوردن شعاعی سیمان و از بین رفتن پیوند سیمان با سازند و لوله جداری، یکپارچگی چاه را تهدید کرده و می‌تواند منجر به مهاجرت گاز در فضای حلقوی گردد [۱۳].

وو و همکاران در سال ۲۰۲۰ با استفاده از مدل‌سازی عددی و مطالعات آزمایشگاهی به بررسی یکپارچگی سیمان در سیستم لوله جداری–سیمان–سازند پرداختند. بدین منظور و برای یافتن رابطه بین تنش‌های وارده و تغییر شکل طولی از تست فشاری و برای ارزیابی یکپارچگی سیمان از تنش شعاعی و حلقه‌ای استفاده شد. نتایج نشان داد که بیشترین احتمال از بین رفتن یکپارچگی سیمان در محل اتصال سیمان با لوله جداری وجود دارد. در صورتی که تنش اعمالی هم‌راستا با پیوند باشد، بیشترین احتمال شکست و درصورت اعمال نیروی عمود بر پیوند، احتمال شکست کمتری مورد انتظار است. نتایج همچنین نشان داد که در صورت استفاده از سیمان دارای ضریب یانگ پایین و نسبت پواسون بالا احتمال شکست کاهش می یابد [۱۴].

لامیک و همکاران (۲۰۲۱) به بررسی مقاومت پیوند بین سیمان–لوله جداری و سیمان–سازند در هنگام عملیات حفاری یک چاه پرداختند. بدین منظور آزمایشات استاتیکی و دینامیکی بر روی سیستم لوله جداری–سیمان–سازند و تحت‌تأثیر نیروی محوری انجام شد. بر مبنای نتایج، حد شکست پیوند سیمان–لوله جداری و سیمان–سازند به‌دست آمده و احتمال حفظ یکپارچگی چاه با در نظر گفتن عمر مفید سیمان، لوله جداری و سازند تحت تأثیر شرایط مختلف ارائه شد [۱۵].

هدف این مقاله بررسی تأثیر ویژگی‌های مهم سیمان شامل تراوایی، تخلخل، استحکام پیوند سیمان در سطوح تماس و مقاومت سنگ سیمان در برابر تنش‌های وارده بر یکپارچگی غلاف سیمان با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی است. بدین منظور، ابتدا سیمان حفاری و افزودنی‌های مورد استفاده در جهت افزایش یکپارچگی غلاف سیمان بررسی و سپس ترکیبات سیمان طراحی شده و ویژگی‌های مختلف نظیر تخلخل، تراوایی، مقاومت فشاری و ضرایب الاستیک اندازه‌گیری می شوند.

۲- روش انجام پژوهش

به منظور انجام این پژوهش، ابتدا ترکیبات سیمان جهت انجام آزمایشات انتخاب شده و پس از آماده‌سازی دوغاب و سنگ سیمان، آزمایشات مختلفی به منظور ارزیابی تأثیر ویژگی‌های سیمان بر یکپارچگی آن انجام می‌پذیرند.

۲-۱- مواد اولیه و روش آماده‌سازی نمونه

به منظور آماده‌سازی ترکیبات سیمان از سیمان حفاری کلاس G، اکسیدمنیزیم و سیلیکافلور استفاده شد. انجمن نفت آمریکا سیمان‌های مورد استفاده در چاه‌های نفت و گاز را با توجه به عمق چاه، دما و فشار به ۸ دسته (A-H) تقسیم می‌کند [۱۶]. سیمان‌های کلاس G و H به طور گسترده‌ای در صنعت نفت و گاز استفاده می‌شود چرا که امکان استفاده در شرایط متفاوت درون چاه را با استفاده از افزودنی‌های مختلف دارند [۱۷]. در این پژوهش از سیمان حفاری کلاس G یکی از کارخانه‌های سیمان داخل کشور استفاده شد. سیمان ارسالی دارای رنگ خاکستری و چگالی ۳/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب بود. بر اساس اعلام شرکت سازنده، اجزای سیمان مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

به‌طور رایج به منظور تنظیم ویژگی سیمان از افزودنی‌های مختلفی استفاده می‌گردد. در این پژوهش از افزودنی‌های سیلیکافلور و اکسیدمنیزم استفاده شد. هدف از افزودن اکسیدمنیزیم به ترکیب سیمان، افزایش قابلیت انبساط سیستم و افزایش مقاومت پیوند سیمان با لوله جداری و سازند است. در واقع افزایش حجم سنگ سیمان در اثر افزودن اکسیدمنیزیم سبب جبران انقباض سیمان و افزایش فشار به مرز تماس سیمان با لوله جداری و سازند می‌شود. در نتیجه این افزایش فشار، مقاومت پیوند سیمان افزایش یافته و

احتمال جریان پیدا کردن سیال در مرز پیوند سیمان کاهش می یابد [۱۸].

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان حفاری کلاس G

اجزا تشکیل دهنده	درصد
MgO	۱/۹۵
SO_3	۱/۵۴
Loss On Ignition	۰/۹۳
Insoluble Residue	۰/۴۵
C_3S	۶۰/۶
C_3A	۲
$C_4AF + 2C_3A$	۱۸/۳
Na_2O	۰/۶۲
Impurity	۱۳/۶۱

سیلیکا فلور به‌دلیل دارا بودن ذرات ریزتر از سیمان، در هنگام تکمیل هیدراسیون بین ذرات سیمان قرار می گیرد و سبب افزایش انسجام ذرات سنگ سیمان می شود که در نتیجه آن تخلخل و تراوایی سنگ سیمان کاهش می‌یابد. با کاهش تراوایی سنگ سیمان، امکان عبور سیال درون سیمان کاهش می‌یابد که این موضوع سبب افزایش یکپارچگی سیمان می‌شود [۱۹].

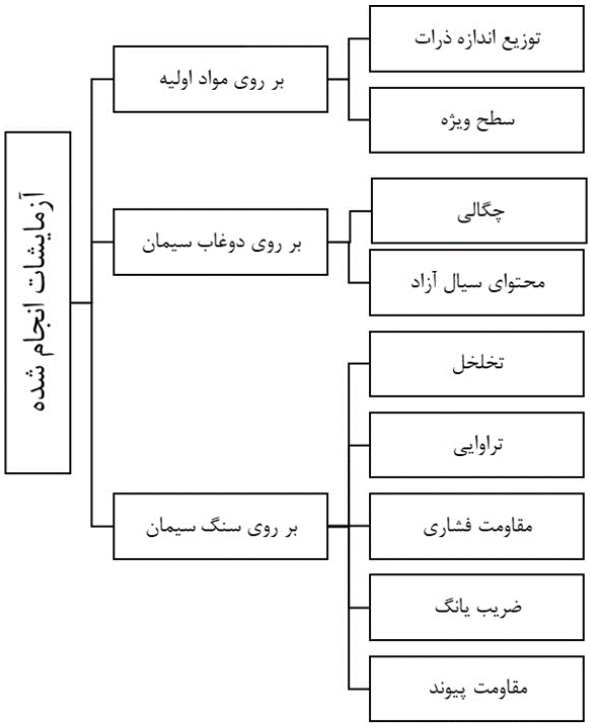
آماده‌سازی دوغاب و سنگ سیمان بر اساس رویه‌های استاندارد صورت پذیرفت. بدین منظور، ابتدا جرم سیمان و افزودنی‌های مورد نیاز با استفاده از ترازو اندازه‌گیری و سپس با توجه به جرم سیمان و افزودنی‌ها، جرم آب اندازه‌گیری شد. جهت تهیه دوغاب سیمان، ابتدا آب را در ظرف همزن ریخته و پس از تنظیم سرعت همزن در سرعت ۴۰۰۰ دور بر دقیقه، مواد اولیه در مدت ۱۵ ثانیه به ظرف همزن اضافه شد. سپس سرعت همزن به ۱۲۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۳۵ ثانیه افزایش یافت تا ترکیب یکنواخت دوغاب به دست آید. در دوغاب‌های آماده شده، نسبت جرم آب به جرم سیمان بر اساس استاندارد انجمن نفت آمریکا، برابر با ۰/۴۴ در نظر گرفته شد. بر این مبنا سه ترکیب سیمان آماده و مورد بررسی قرار گرفتند: یک نمونه شاهد شامل سیمان کلاس G و آب، نمونه شاهد همراه با اکسیدمنیزیم به میزان ۳ درصد جرمی و نمونه شاهد همراه با سیلیکافلور به میزان ۵ درصد جرمی.

علاوه بر دوغاب، جهت انجام آزمایش های سنگ سیمان، نیاز به استفاده از قالب‌های نمونه می باشد تا نمونه دارای حجم و شکل مشخص باشد. در این پژوهش از قالب‌های استوانه‌ای و مکعبی (شکل ۱) استفاده گردید.

شکل ۱ - قالب‌های مورداستفاده جهت تهیه نمونه سنگ سیمان

۲-۲- آزمایشات

به منظور ارزیابی یکپارچگی ترکیبات سیمان، آزمایشات مختلفی (شکل ۲) بر روی مواد اولیه، دوغاب و سنگ سیمان انجام پذیرفت.



شکل ۲- لیست آزمایشات انجام شده

آزمایشات انجام شده بر روی مواد اولیه شامل آنالیز توزیع اندازه ذرات و محاسبه سطح ویژه بود. به منظور مشخصه‌سازی توزیع اندازه ذرات از دستگاه تحلیلگر اندازه ذرات استفاده شد. در این دستگاه برای اندازه‌گیری دانه‌بندی ذرات از آنالیز شکست پرتوهای لیزر استفاده می‌شود. علاوه بر توزیع اندازه ذرات، سطح ویژه سیمان و افزودنی‌ها هم می‌تواند در تحلیل نتایج به‌دست آمده کاربرد داشته باشند. سطح ویژه در واقع نسبت مساحت ماده جامد بر واحد جرم است که برای به دست آوردن آن می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد [۲۰]:

$$d = \frac{6 \times 10^3}{\rho\, S} \qquad (۱)$$

در رابطه بالا، ρ چگالی (گرم بر سانتی‌مترمکعب)، S سطح ویژه (مترمربع بر گرم) و d قطر ذرات (نانومتر) است.

آزمایشات انجام شده بر روی دوغاب سیمان شامل اندازه‌گیری چگالی و محتوای سیال آزاد بود. جهت اندازه‌گیری چگالی، پس از آماده‌سازی دوغاب هریک از ترکیبات مورد آزمایش، نسبت جرم به حجم دوغاب سیمان توسط ترازو و استوانه مدرج محاسبه و چگالی سیالات گزارش شد.

محتوای سیال آزاد می‌تواند در ارزیابی پایداری رسوبی دوغاب سیمان کاربرد داشته باشد. با کم شدن مقدار سیال آزاد، احتمال ایجاد کانال جهت عبور سیال کاهش می یابد، که سبب افزایش مقاومت پیوند سیمان با لوله جداری و سازند و در نتیجه افزایش یکپارچگی می شود. جهت اندازه‌گیری مقدار سیال آزاد، (cc) ۲۵۰ دوغاب تهیه شده در استوانه مدرج (شکل ۳) و در دمای اتاق قرار داده شد و بعد از گذشت ۲ ساعت میزان سیال آزاد جمع شده در بالای دوغاب به‌عنوان محتوای سیال آزاد گزارش شد.

با استفاده از حجم سیال آزاد و رابطه زیر می توان درصد سیال آزاد را نیز محاسبه نمود [۱۸]:

$$\%FF = \frac{FFC \times \rho}{m} \times 100 \qquad (۲)$$

در رابطه فوق، FF درصد سیال آزاد، FFC حجم سیال آزاد (سانتی‌مترمکعب)، ρ چگالی دوغاب (گرم بر سانتی‌مترمکعب) و m جرم ابتدایی دوغاب قبل از هم زدن (گرم) است.

آزمایشات انجام شده بر روی سنگ سیمان شامل اندازه‌گیری و محاسبه تخلخل، تراوایی، مقاومت فشاری تک محوره، ضریب یانگ و مقاومت پیوند سیمان بوده است.

برای اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی نمونه‌ها، ابتدا دوغاب در قالب مکعبی ریخته شد و پس از تکمیل فرآیند هیدراسیون در دمای محیط به مدت ۷۲ ساعت، نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱/۵ و ارتفاع ۳ اینچ از نمونه مکعبی سنگ سیمان مغزه‌گیری شدند.

شکل ۳- تست محتوای سیال آزاد

تراوایی در واقع توانایی سیمان برای عبور سیال از خود را نشان می‌دهد. جهت حفظ یکپارچگی، سنگ سیمان باید دارای تراوایی بسیار کم باشد تا مانع از جریان سیالات در فضای حلقوی شود. برای اندازه‌گیری تراوایی سنگ سیمان در این پژوهش از دستگاه تراوایی‌سنج گازی مغزه استفاده شد. برای محاسبه تراوایی، میزان دبی سیال (گاز نیتروژن) از نمونه تهیه شده اندازه‌گیری و پس از مشخص نمودن مقدار گرانروی گاز، مقدار تراوایی نمونه با استفاده از معادله دارسی محاسبه گردید.

برای اندازه گیری تخلخل مؤثر سنگ سیمان در این پژوهش از تخلخل‌سنج هلیومی استفاده شد. بعد از آماده کردن نمونه و قرارگیری در محفظه دستگاه، با تزریق گاز هلیوم و استفاده از قانون بویل امکان محاسبه تخلخل نمونه فراهم گردید.

یکی از شاخص‌های مهم در بررسی سنگ سیمان، مقاومت فشاری آن است که بیانگر مقاومت آن در برابر نیروهای فشاری محوری است. در این پژوهش از دستگاه جک تک محوره به همراه سنسورهای کرنش برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری سنگ سیمان،

ضریب یانگ و مقاومت پیوند استفاده شد. به منظور سنجش مقاومت فشاری و ضریب یانگ نمونه، مطابق با استاندارد ASTM C39M از قالب استوانه‌ای با ارتفاعی بین دو تا سه برابر قطر باید استفاده گردد. بدین منظور قالب استوانه‌ای دارای قطر ۳/۶ سانتی‌متر و ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر ساخته و مورد استفاده قرار گرفت. پس از ساخت قالب، دوغاب در قالب ریخته شده و نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار داده شدند تا خشک شوند. بعد از گذشت ۲۴ ساعت، نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت درون آب با دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند.

به منظور محاسبه ضریب یانگ از شیب نمودار تنش-کرنش در قسمت خطی آن استفاده شد. با توجه به این موضوع که منحنی تنش-کرنش عمدتاً به صورت خطی نمی‌باشد، شیب خط مماس بر منحنی در نقطه ۵۰ درصدی از حداکثر تنش، به عنوان ضریب یانگ محاسبه گردید.

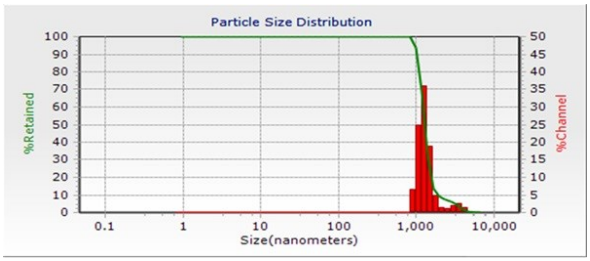
به منظور محاسبه مقاومت پیوند سیمان با لوله جداری از دو قالب استوانه‌ای (شکل ۴) متحدالمرکز استفاده شد. بین دو استوانه دوغاب ریخته شد و به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفت. در این تست قالب به‌گونه‌ای در زیر جک فشار قرار می‌گیرد که نیرو به استوانه داخلی وارد شود. برای اندازه‌گیری مقاومت پیوند، از نسبت نیروی وارده بر مساحت سطح تماس سیمان و لوله فلزی استفاده می‌گردد.

شکل ۴- قالب جهت تست مقاومت پیوند سیمان

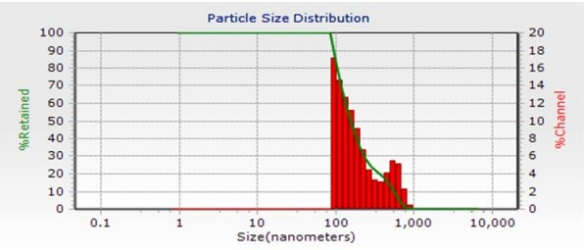
۳- نتایج و بحث

در این قسمت، نتایج آزمایشات انجام شده بر روی مواد اولیه، دوغاب و سنگ سیمان ارائه خواهد شد. مواد اولیه مورد استفاده در این پژوهش شامل سیمان حفاری، سیلیکا فلور و اکسید منیزم بود. در شکل‌های ۵-۷، نتیجه تست توزیع اندازه ذرات برای سیمان حفاری، اکسیدمنیزیم و سیلیکافلور ارائه شده است.

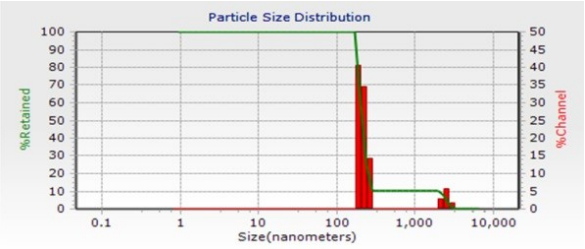
با توجه به شکل‌های ۵-۷، توزیع اندازه ذرات سیمان حفاری کلاس G بین ۸۱۸ تا ۵۵۰۰ نانومتر، ذرات اکسید منیزیم بین ۸۵/۹ تا ۹۷۲ نانومتر و ذرات سیلیکافلور بین ۱۷۱/۹ تا ۳۲۷۰ نانومتر اندازه‌گیری شد. بر اساس نتایج، ذرات سیمان حفاری بزرگ‌ترین اندازه و اکسید منیزیم دارای کوچک‌ترین اندازه ذرات است. اطلاع از اندازه ذرات در تفسیر نتایج سایر آزمایشات کاربرد خواهد داشت. چرا که ذرات با اندازه کوچکتر فضای خالی بین ذرات بزرگتر را اشغال کرده و باعث کاهش تخلخل و تراوایی می‌شوند.



شکل ۵- نمودار اندازه توزیع ذرات سیمان حفاری کلاس G



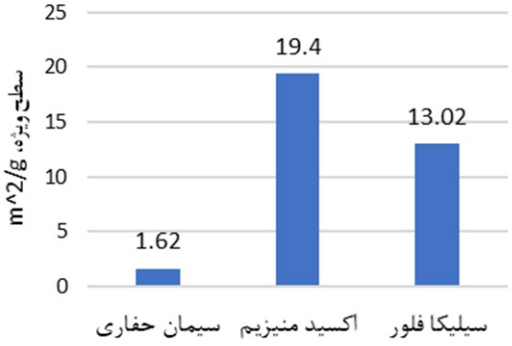
شکل ۶- نمودار اندازه توزیع ذرات اکسیدمنیزیم



شکل ۷- نمودار اندازه توزیع ذرات سیلیکا فلور

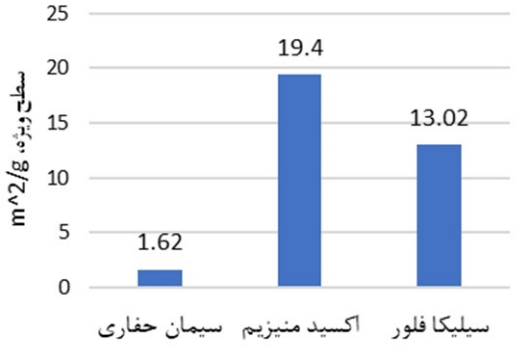
با توجه به چگالی پودر خشک سیمان حفاری (۳/۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، اکسیدمنیزم (۳/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب) و سیلیکافلور (۲/۶۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب)، مقدار سطح ویژه برای بیشترین توزیع اندازه ذرات به دست آمد. نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود، ذرات دارای اندازه کوچکتر، سطح ویژه بیشتری دارند. بدین صورت که بیشترین

مقدار سطح ویژه برای اکسیدمنیزیم و کمترین مقدار سطح ویژه مربوط به سیمان حفاری به دست آمد. نتایج محاسبه سطح ویژه در تحلیل محتوای سیال آزاد دوغاب سیمان کاربرد دارد. به‌طور کلی، ذرات دارای سطح ویژه بالاتر با جذب بیشتر سیال، محتوای سیال آزاد کمتری دارند.



شکل ۸- نتایج محاسبات سطح ویژه

پس از تست مواد اولیه، دوغاب سیمان برای ترکیبات مختلف بر اساس روش ارائه شده ساخته و آزمایشات بر روی آن انجام پذیرفت. نتایج تست محتوای سیال آزاد دوغاب سیمان، در شکل ۹ ارائه شده است. مقدار محتوای سیال آزاد اندازه‌گیری شده برای نمونه دوغاب سیمان برابر ۱/۲ درصد است که با افزودن سیلیکافلور و اکسیدمنیزیم به ترکیب به ترتیب به ۰/۴ و ۰/۶ درصد کاهش می یابد. حجم سیال آزاد به طور قابل توجهی به توانایی جذب سیمان حفاری و افزودنی‌ها ارتباط دارد. در واقع سطح ویژه مواد در توانایی جذب نقش اساسی را ایفا می کند. افزودن سیلیکا فلور و اکسید منیزیم به ترکیب دوغاب سبب افزایش سطح ویژه و در نتیجه کاهش سیال آزاد می گردد. با توجه به مقدار محاسبه شده سطح ویژه، سطح ویژه اکسیدمنیزیم بیشتر از سیلیکافلور است. اما به دلیل بیشتر بودن درصد جرمی سیلیکا فلور (۵ درصد جرمی سیمان) نسبت به اکسید منیزیم (۳ درصد جرمی سیمان) در ترکیب دوغاب، درصد محتوای سیال آزاد نمونه‌ای که در آن از سیلیکا فلور استفاده شده است کمتر از نمونه‌ای است که در آن اکسید منیزیم وجود دارد. کاهش درصد محتوای سیال آزاد سبب افزایش پایداری رسوبی دوغاب و در نتیجهٔ آن افزایش یکپارچگی می‌شود، چرا که محتوای سیال آزاد در فرایند تشکیل سنگ سیمان در فضای حلقوی، امکان ایجاد کانال در قسمت بالایی حفره چاه (به خصوص در چاه‌های جهت‌دار) را مهیا می سازد که سبب کاهش استحکام پیوند سیمان با لوله جداری و سازند می گردد.

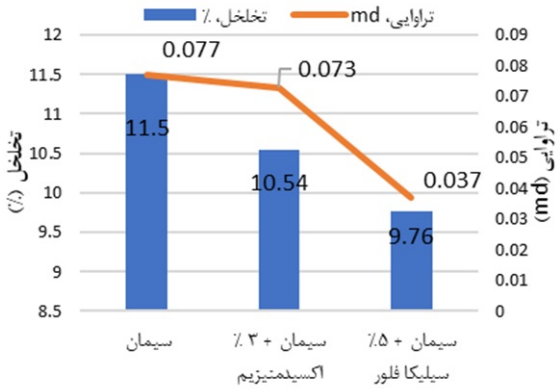


شکل ۹- نتایج تست محتوای سیال آزاد

همچنین چگالی دوغاب سیمان ۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب اندازه‌گیری شد که با افزودن اکسیدمنیزیم مقدار چگالی دوغاب سیمان به ۲/۰۴۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب (به دلیل بالاتر بودن چگالی اکسید منیزیم نسبت به سیمان حفاری) افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با افزودن سیلیکا فلور به دوغاب سیمان چگالی آن به ۱/۹۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب (به دلیل کمتر بودن چگالی سیلیکا فلور نسبت به سیمان حفاری) کاهش می‌یابد.

با اتمام تست‌های دوغاب سیمان، سنگ سیمان پس از فرآیند قالب‌گیری و خشک شدن مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی نمونه‌های سنگ سیمان در شکل ۱۰ ارائه شده است.

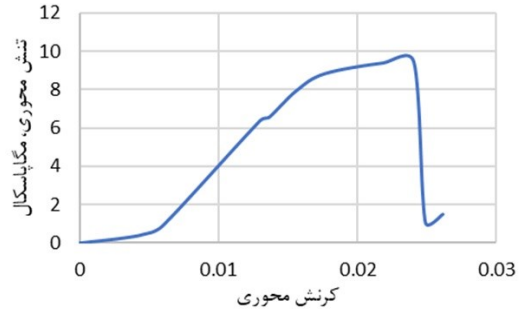
مقدار تخلخل سنگ سیمان تهیه شده در این پژوهش ۱۱/۵ درصد اندازه‌گیری شد که با افزودن سیلیکافلور و اکسیدمنیزیم، مقدار تخلخل آن به دلیل ریز بودن ذرات مواد افزودنی نسبت به سیمان به ترتیب به ۹/۷۶ و ۱۰/۵۴ درصد کاهش یافت. با توجه به تست اندازه ذرات انجام شده، سایز ذرات اکسیدمنیزیم و سیلیکافلور کمتر از سیمان می باشد. لذا این ذرات فضای بین ذرات درشت‌تر سیمان را اشغال کرده و تخلخل را کاهش داده‌اند. کاهش تخلخل، افزایش یکپارچگی غلاف سیمان را در پی دارد. با کم شدن تخلخل مؤثر در سنگ سیمان، مقدار تراوایی آن نیز کاهش می یابد. مقدار تراوایی سنگ سیمان ۰/۰۷۷ میلی دارسی اندازه گیری شد که با افزودن سیلیکافلور و اکسیدمنیزیم به ترکیب، تراوایی آن به ترتیب به ۰/۰۳۷ و ۰/۰۷۳ میلی دارسی کاهش پیدا کرد. با توجه به کاهش تراوایی، امکان جریان یافتن سیال از داخل غلاف سیمان کم می گردد که باعث بهبود خواص یکپارچگی آن می‌شود.



شکل ۱۰- نتایج تست تخلخل و تراوایی

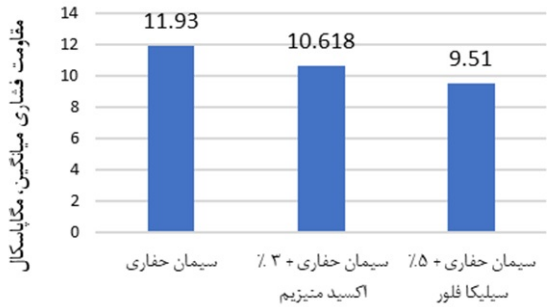
پس از اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی، رفتار مکانیکی سنگ سیمان تحت تأثیر تنش تک محوره ارزیابی و پارامترهای مقاومت فشاری و ضریب یانگ به دست آمد. به منظور کاهش خطا، برای هر ترکیب سه تست انجام و نمودار تنش-کرنش برای هر تست رسم گردید. شکل ۱۱ نشان‌دهنده یکی از نمودارهای تنش-کرنش برای سیمان است.

بر این اساس مقدار میانگین مقاومت فشاری برای هر سه ترکیب محاسبه و در شکل ۱۲ ارائه شده است. با توجه به نتایج، افزودن سیلیکافلور و اکسیدمنیزیم باعث کاهش مقاومت‌فشاری سیمان شده است. دلیل این امر، کاهش درصد وزنی سیمان به عنوان ماده اصلی تشکیل‌دهنده سنگ سیمان است. نمونه دارای سیلیکافلور دارای کمترین مقاومت فشاری می باشد، چرا که درصد کاهش سیمان در این نمونه بیشتر از دو نمونه دیگر است. از دیدگاه مطالعات یکپارچگی چاه، کاهش مقاومت فشاری مطلوب تلقی نمی‌گردد. اما ذکر این نکته ضروری است که مقاومت فشاری حاصله در هر سه ترکیب برای مقاومت در برابر فشارهای وارده در طول عمر چاه کافی می باشد.



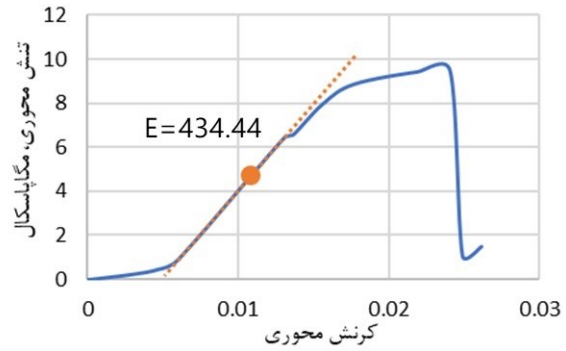
شکل ۱۱- نمودار تنش-کرنش برای سیمان بدون افزودنی

مقدار ضریب یانگ طبق توضیحات قبلی از نمودار تنش-کرنش و برای هر ترکیب و با سه تکرار به دست آمد. میانگین سه تکرار به عنوان ضریب یانگ برای هر ترکیب گزارش شد. شکل ۱۳ نحوهٔ محاسبه ضریب یانگ برای یکی از آزمایشات را نشان می‌دهد.

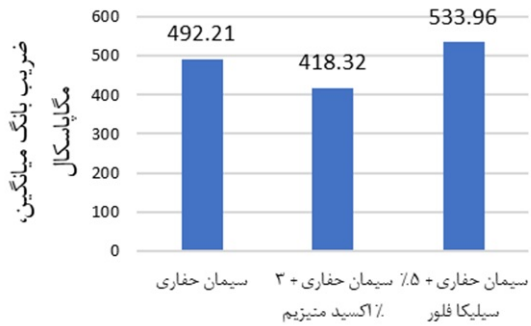


شکل ۱۲- نتایج تست مقاومت فشاری

شکل ۱۴ میانگین ضریب یانگ برای نمونه‌های سه ترکیب را نشان می‌دهد. نتایج نشان دهنده این است که ترکیب دارای سیلیکافلور بیشترین ضریب یانگ را دارد. در مورد تفسیر نتایج ضریب یانگ، ذکر این نکته ضروری است که ترکیبات دارای ضریب یانگ بالاتر نسبت به تغییر شکل در برابر فشارهای وارده مقاومتر هستند. بدین معنا که اگر سه ترکیب فوق در برابر تنش‌های یکسان قرار بگیرند، میزان تغییر شکل در ترکیب حاوی سیلیکا فلور کمتر است که این امر کاربرد این ترکیب را به منظور فراهم کردن یکپارچگی بهتر مشخص می سازد.

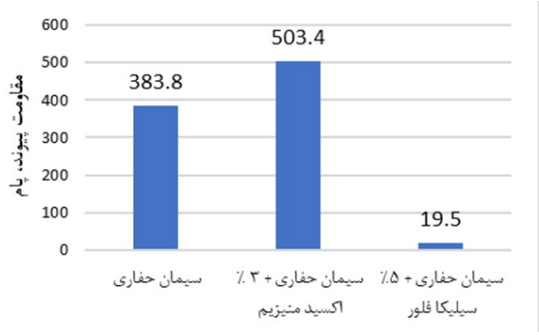


شکل ۱۳- محاسبه ضریب یانگ برای سیمان بدون افزودنی



شکل ۱۴- نتایج تست ضریب یانگ

پس از اندازه‌گیری ضریب یانگ برای هر سه ترکیب، میزان مقاومت پیوند سیمان با لوله جداری ارزیابی گردید. با توجه به حداکثر نیروی اعمال شده به سیمان حفاری (۲۹۱۳/۸۸ پوند)، سیمان حفاری و ۳ درصد اکسیدمنیزم (۳۸۲۱/۷۵ پوند)، سیمان حفاری و ۵ درصد سیلیکافلور (۱۴۷/۷ پوند) مقدار مقاومت پیوند برای هر ۳ ترکیب به دست آمد (شکل ۱۵).



شکل ۱۵- نتایج تست مقاومت پیوند

نتایج شکل ۱۵ نشان می‌دهد که افزودن اکسیدمنیزیم به ترکیب سیمان سبب افزایش حجم سنگ سیمان و افزایش مقاومت پیوند سیمان حفاری و در نتیجه آن افزایش یکپارچگی غلاف سیمان می‌گردد. از سوی دیگر، افزودن سیلیکافلور به ترکیب سیمان، سبب کاهش چسبندگی سیمان می‌شود که کاهش مقاومت پیوند سیمان حفاری و در نتیجه آن کاهش یکپارچگی غلاف سیمان را به دنبال دارد.

٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی آزمایشگاهی ویژگی‌های سیمان و تأثیر آن بر یکپارچگی سیمان پرداخته شد. بدین منظور، از ترکیب‌های مختلف سیمان استفاده و تست‌های تخلخل، تراوایی، محتوای سیال آزاد، مقاومت فشاری، ضریب یانگ و مقاومت پیوند انجام شد. مهم‌ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

- با افزودن سیلیکافلور به ترکیب، مقدار تخلخل، تراوایی و درصد سیال آزاد سیمان نسبت به نمونه شاهد (ترکیب سیمان و آب) به ترتیب به میزان ۵۲، ۱۵/۲ و ۶۶ درصد کاهش یافت. اگر چه کاهش تخلخل، تراوایی و درصد سیال آزاد سبب افزایش خاصیت یکپارچگی سنگ سیمان می شود، اما با توجه به نتایج به دست آمده از تست های مکانیکی، این نمونه شرایط ایده‌آل را ندارد.
- سنگ سیمان تهیه شده از ترکیب سیمان و آب، دارای بیشترین مقاومت فشاری است. اما تخلخل، تراوایی و درصد آب آزاد بیشتری نسبت به دو نمونه دیگر دارد که سبب کاهش خاصیت یکپارچگی سنگ سیمان می شود. نتایج به دست آمده از تست مقاومت سیمان این نمونه از نمونه دارای اکسید منیزیم ۳۱٪ کمتر است.
- با افزودن اکسیدمنیزیم به ترکیب سیمان، مقاومت پیوند سیمان ۳۱ درصد افزایش، تخلخل ۵/۲ درصد، تراوایی ۹ درصد و درصد سیال آزاد ۵۰ درصد نسبت به نمونه شاهد کاهش یافت. این ترکیب دارای خواص فیزیکی و مکانیکی مناسبی به جهت افزایش یکپارچگی سیمان است و به عنوان ترکیب ایده‌آل در این پژوهش مشخص شد.

پیشنهاد می‌گردد به منظور تأیید نتایج به دست‌آمده، آزمایشات بیشتری با در نظر گرفتن غلظت‌های مختلف از مواد افزودنی در پژوهش‌های آینده مورد بررسی قرار گیرد.

٥- مراجع

[1]. Himmelberg, N.C., "Numerical Simulations for Wellbore Stability and Integrity for Drilling and Completions", Masters Theses. Missouri University of science and technology, 2021.

[2]. Mohammed, A.I., Oyeneyin, B., Atchison, B., Njuguna, J. "Casing Structural Integrity and Failure Modes in a Range of Well Types - A Review", Journal of Natural Gas Science and Engineering, 68, 102898, 2019.

[3]. Bois, A.P., Vu, M.H., Ghabezloo, S., Sulem, J., Garnier, A., Laudet, J.B. "Cement Sheath Integrity for CO_2 Storage–An Integrated Perspective, Energy Procedia, 37: 5628-5641, 2013.

[4]. Bellabarba, M., Bulte-Loyer, H., Froelich, B., Le Roy-Delage, S., van Kuijk, R., Zeroug, S., Guillot, D., Moroni, N., Pastor, S., Zanchi, A. "Ensuring zonal isolation beyond the life of the well", Oilfield, 20(1):18-31, 2008.

[5]. Lavrov, A., Torsæter, M. "Physics and Mechanics of Primary Well Cementing", Springer Briefs in Petroleum Geoscience & Engineering, 2016.

[6]. Himmelberg, N.C. "Numerical Simulations for Wellbore Stability and Integrity for Drilling and Completions", Masters Theses. Missouri University of science and technology, 2014.

[7]. Torbergsen, H.E.B., Haga, H.B., Sangesland, S., Aadnoy, B.S., Sæby, J., Johnsen, S., Rausand, M., Lundeteigen, M. A. "An Introduction to Well Integrity", Norwegian University of Science and

Technology. 2012.
[8]. Vignes, B., Aadnøy, B.S. “Well-Integrity Issues Offshore Norway”, SPE Production & Operations, 25(02): 145–150, 2010.
[9]. Teodoriu, C., Ugwu, I.O., Schubert, J.J. “Estimation of Casing-Cement-Formation Interaction using a new analythical model”, SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition, 2010.
[10]. Yuan, Z., Schubert, J., Teodoriu, C., Gardoni, P. “HPHT Gas Well Cementing Complications and its Effect on Casing Collapse Resistance”, SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition, 2013.
[11]. Tabatabaee Moradi, S.Sh., Nikolaev, N.I., Naseri, Y. “Developing High Resistant Cement Systems for High-pressure, High temperature Applications”, SPE Russian Petroleum Technology Conference, 2015.
[12]. Schrepers, G. “A Framework for Wellbore Cement Integrity Analysis”, 49th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 2015.
[13]. Phi, T., Elgaddafi, R., Al Ramadan, M., Ahmed, R., Teodoriu, C. “Well Integrity Issues: Extreme High-Pressure High-Temperature Wells and Geothermal Wells a Review”, SPE Thermal Well Integrity and Design Symposium, 2019.
[14]. Wu, U., Salehi, S. “A Numerical and Experimental Study on Cement Integrity Based on a Novel Method”, Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 2020.
[15]. Lamik, A., Pittino, G., Prohaska-Marchried, M., Krishna, R., Thonhauser, G., Antretter, T. “Evaluation of Cement-Casing & Cement-Rock Bond Integrity During Well Operations”, SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, 2021.
[16]. Bahafid, S., Ghabezloo, S., Duc, M., Faure, P., Sulem, J. “Effect of the hydration temperature on the microstructure of Class G cement: CSH composition and density”, Cement and Concrete Research, 95: 270-281, 2017.
[17]. API. Specification for cements and materials for well cementing. in: ANSI/API SPECIFICATION 10A. American Petroleum Institute, 2005.
[18]. Tabatabaee Moradi, S.Sh., Nikolaev, N.I. “Sedimentation Stability of Oil Well Cements in Directional Wells”, IJE Transactions A: Basics 30(7): 1105-1109. 2017.
[19]. Grabowski, E., Gillott, J.E. “Effect of replacement of silica flour with silica fume on engineering properties of oilwell cements at normal and elevated temperatures and pressures”, Cement and Concrete Research, 19(3): 333–344, 1989.
[20]. Rahaei, M.B., Yazdani rad, R., Kazemzadeh, A., Ebadzadeh, T. “Mechanochemical synthesis of nano TiC powder by mechanical milling of titanium and graphite powders”, Powder Technology, 217: 369–376, 2012.

Investigating the effect of oil well cement composition on the cement sheath integrity

Mohammad Barkhordar
MSc of Petroleum Engineering, Faculty of Petroleum and Natural Gas Engineering, Sahand University of Technology.
Seyyed Shahab Tabatabaee Moradi*
Assistant Professor, Faculty of Petroleum and Natural Gas Engineering, Sahand University of Technology.

Abstract

Oil and gas wells are drilled to provide a secure path for petroleum production. These wells are usually cased and cemented to establish a long-term integrity during the life of the well. After drilling each section, the cement is pumped and placed between the casing and underground formations to secure the position of the casings. The increasing demand of energy has been pushed the companies to drill and develop wells in more hostile conditions in terms of pressure and temperature. In these circumstances, the well integrity problems are more challenging. Maintaining the integrity of the oil and gas wells, which is largely dependent on the characteristics of the cement, can prevent irreparable damage to the environment. In order to maintain well integrity, cement sheath must have low porosity, low permeability, sufficient bond strength at the contact surfaces, and suitable rock mechanical properties to withstand the induced stresses along the useful life of the well. In this research, cement compositions based on Portland cement, silica flour and magnesium oxide were developed and experimentally tested to evaluate their ability of well integrity provision. Tests were performed on raw materials, cement slurry and set cement samples. These tests included measurements of slurry density, slurry free fluid, set cement porosity, permeability, bond strength, compressive strength, and Young's modulus. The results showed that with the addition of silica fluor, the porosity and permeability of set cement decreased to 9.76% and 0.037 mD respectively, and with the addition of magnesium oxide, the bond strength and Young's modulus increased to 503.4 and 418.32 MPa respectively. Also, the results showed that the addition of these materials leads to a reduction in the cement compressive strength. The obtained results were mainly due to the different characteristics of dry raw materials. Silica flour and magnesium oxide have smaller particles in comparison with Portland cement. These smaller particles have larger specific surface areas, which leads to a reduction of free fluid content in the slurries. On the other hand, the smaller particles may fill the void space of larger cement particles, and therefore less porosity and permeability are expected in the compositions.

Keywords: Cement, Integrity, Bond strength, Porosity, Permeability, Compressive strength.

* Corresponding Author: stabatabaee@sut.ac.ir