

مقاله پژوهشی

مطالعه آزمایشگاهی اثر ذرات LCM بر گرادیان شکست سازند جهت بهبود مقاومت سازی دیواره چاه

سیدمرتضی میرعباسی^۱؛ محمدجواد عامری شهرابی^{۲*}؛ فریدرضا بیگلری^۳؛ محسن کرمی^۴؛ علیرضا نصیری^۵

۱. دانشجوی دکتری مهندسی نفت؛ دانشکده نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۲. دانشیار؛ دانشکده مهندسی نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۳. دانشیار؛ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۴. کارشناس ارشد مهندسی نفت؛ دانشکده نفت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
۵. پژوهشگر مهندسی نفت، پردیس توسعه صنایع بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۰۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۲۲

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2022.306727.1154

واژگان کلیدی	چکیده
مقاوم سازی سازند ارزیابی آزمایشگاهی مواد کنترل کننده هرز روی رویکرد پیشگیرانه گرادیان شکست سازند	سیال حفاری نقش بسیار مهمی در طول عملیات حفر یک چاه بازی می‌کند و می‌تواند عامل وقوع بسیاری از مشکلات و یا درمان به‌موقع چالش‌ها باشد. از جمله این چالش‌ها می‌توان به هرز روی سیال اشاره کرد که هزینه و زمان عملیاتی را به شدت بالا می‌برد. راه‌حل کلیدی جهت حل این مشکل، بهبود فشار قابل تحمل سازند و مقاومت سازی دیواره چاه به کمک سیال حفاری است. هدف این مطالعه، طراحی و ساخت دستگاه «ارزیابی مقاومت سازی دیواره چاه» جهت شبیه‌سازی فرآیند شکست سازند و بررسی اثر ذرات کنترل کننده هرز روی (LCM) بر بهبود خواص پوششی گل و گرادیان شکست سنگ می‌باشد. لذا در این مقاله از مغزه‌های استوانه‌ای بتنی به‌عنوان نمونه سنگ استفاده شده و گل پایه آبی بنتونایتی حاوی ۲ نوع مختلف LCM به‌عنوان سیال حفاری در نظر گرفته شده است. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان می‌دهد که افزودن LCM‌های مختلف به سیال حفاری، می‌تواند منجر به افزایش فشار شکست سنگ (FBP) و فشار بازشدگی مجدد شکاف (FRP) در نمونه‌های بتنی شود و به ترتیب تا ۳۳ و ۷۲ درصد به بهبود آن‌ها کمک کند. در نتیجه می‌توان قبل از ورود به سازندهایی که امکان هرز روی در آن‌ها بالاست، به‌طور پیوسته از ذرات LCM در سیال حفاری جهت بالا بردن فشار شکست سازند، استفاده کرد.

۱. پیش‌گفتار

و نامتراکم، سازندهای شکافدار طبیعی و سازندهای غاری شکل و حفره‌ای رخ می‌دهد (Howard and Scott, 1951; Nasirov, 2005; Brandl et al., 2011; Ghalambor et al., 2014). در مقابل آن، هرز روی القایی^۱ در شکاف‌های القایی ناشی از حفاری به علت پنجره گل باریک‌تر در سازندهای تخلیه‌شده^۲، سازندهای آب عمیق و چاه‌های انحرافی رخ می‌دهد (Messenger, 1981; Nayberg, 1987; Wang, 2007). چراکه در سازندهای عمیق دریایی، با افزایش عمق آب، تنش روباره که مجموع وزن آب و سنگ

ورود ناخواسته و کنترل نشده حجمی از سیال حفاری به سازند را هرز روی سیال حفاری می‌نامند که در آن، تمام و یا بخشی از ستون سیال حفاری از دست می‌رود و می‌تواند منجر به مشکلات جانبی از جمله گیر لوله، ناپایداری دیواره چاه، فوران چاه و مشکلات ایمنی گردد (Messenger, 1981; Devereux 1999). هرز روی طبیعی^۱ سیال حفاری در سازندهای مختلف همچون لایه‌های متخلخل، لایه‌های سست

¹ Natural fluid loss

² Induced fluid loss

³ Depleted formation

R, 2016; Feng et al., 2018; Liu and Abousleiman, 2018; He et al., 2019; Yang et al., 2020) از سوی دیگر، رویکرد درمانی پس از مواجهه با هرز روی در حین عملیات استفاده شده و با هدف انسداد شکاف^{۱۱} و یا ایزوله کردن نوک ترک با استفاده از ذرات LCM انجام می‌گردد. در این حالت، ذرات LCM موجود در کیک گل، با تشکیل یک مانع در دهانه شکاف و یا نوک آن، از ورود سیال به شکاف ممانعت کرده و ارتباط فشار درون چاه و شکاف قطع می‌شود. (Fuh et al., 1992; Alberty and Mclean 2004; Dupriest, 2005; Razavi, 2016; Zhong et al., 2019) به منظور جلوگیری از ایجاد شکاف‌های القایی در دیواره یک چاه، لازم است در برنامه‌ی حفاری آن، بیشترین وزن گلی که سازند به ازای هر عمق می‌تواند تحمل کند، در نظر گرفته شود. این حداکثر فشار، می‌تواند مستقیماً از آزمایش نشستی^{۱۲} (LOT) به دست آید. این آزمایش عمدتاً در زیر آخرین پاشنه جداری انجام می‌شود تا حداکثر وزن گل مجاز را برای حفاری قسمت بعدی چاه، مشخص کند. (Van Oort & Vargo, 2008). آزمایش نشستی یکی از رایج‌ترین و شناخته شده‌ترین روش‌ها، جهت ارزیابی مقاومت سازند در صنعت حفاری است. برای انجام این آزمایش، ابتدا چاه بسته شده و سپس فشار ته چاهی با تزریق پیوسته پمپ‌های گل به داخل چاه، به آرامی افزایش می‌یابد. با تجزیه و تحلیل نمودار فشار ته چاهی بر حسب زمان، «فشار ایجاد شکاف»^{۱۳} (FIP) مشخص خواهد شد. اگر فشار ته چاهی از «فشار شکست سازند»^{۱۴} (FBP) بیشتر شود، «فشار گسترش شکاف»^{۱۵} (FPP) و «فشار بسته شدن شکاف»^{۱۶} (FCP) به دست خواهند آمد؛ که این

بالایی است، کاهش می‌یابد و این امر، بر گرادیان شکست سازند تأثیر خواهد داشت. همچنین در حفاری چاه‌های انحرافی، پنجره گل به دلیل افزایش انحراف چاه به شدت باریک می‌شود.

در انتخاب روش و تکنولوژی مناسب، جهت مقابله با مشکل هرز روی، نوع لایه هرز رو و شدت هرز روی باید در نظر گرفته شود. به طور معمول، هرز روی بر اساس شدت آن، به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شود (Devereux, 1999; Mostafavi Toroqi 2011):

هرز روی تراوشی^۴: نرخ هرز روی کمتر از ۱۰ بشکه در ساعت
 هرز روی جزئی^۵: نرخ هرز روی ۱۰-۲۰ بشکه در ساعت
 هرز روی شدید^۶: نرخ هرز روی ۱۵۰-۵۰ بشکه در ساعت
 هرز روی کامل: بدون بازگشت، با نرخ هرز روی بیش از ۵۰۰ بشکه در ساعت

یکی از شناخته‌ترین روش‌ها جهت مقابله با هرز روی، «مقاوم‌سازی دیواره چاه»^۷ است که هدف آن، افزایش فشار قابل تحمل سازند و وسیع‌تر نمودن پنجره گل ایمن حفاری می‌باشد (Van Oort et al., 2011; Salehi, 2012; Feng et al 2016). مقاوم‌سازی دیواره چاه را می‌توان با دو رویکرد پیشگیرانه^۸ و درمانی^۹ مورد مطالعه قرار داد (Feng and Gray, 2017; Shahri, 2015).

در رویکرد پیشگیرانه، با اضافه کردن ذرات جامد کنترل‌کننده‌ی هرز روی (LCM) به سیال حفاری و بهبود خواص پوششی^{۱۰} کیک گل، از ایجاد شکاف جدید و یا رشد شکاف‌های کوچک قبلی جلوگیری می‌شود. در واقع با تشکیل یک لایه کیک گل کم‌تراوا بر روی نواحی اطراف دیواره چاه از افزایش فشار منفذی و تنش‌های کششی جلوگیری می‌شود (Guo et al., 2014; Cook et al., 2016; Salehi and)

⁴ Seepage loss

⁵ Partial fluid loss

⁶ Severe loss

⁷ Wellbore Strengthening (WBS)

⁸ Preventive

⁹ Remedial

^{۱۰} Plastering effect

^{۱۱} Fracture bridging/plugging

^{۱۲} Leak-Off Test (LOT)

^{۱۳} Fracture Initiation Pressure (FIP)

^{۱۴} Formation Breakdown Pressure (FBP)

^{۱۵} Fracture Propagation Pressure (FPP)

^{۱۶} Fracture Closure Pressure (FCP)

مطالعه آزمایشگاهی اثر ذرات LCM بر گرادبان ...

آزمایش، آزمایش نشتی توسعه یافته ۱۷ (XLOT) نام دارد.
(Cook et al., 2011; Feng, 2016). با ازسرگیری تزریق

¹⁷ Extended Leak of Test (XLOT)

Savari et al., 2013; Mansour, 2017; Nasiri et al., 2017, 2018; Jeennakorn, 2017; Alshubbar et al., 2018; Paes de Godoi et al., 2018; Yang et al. (2018; Liu et al., 2020; AlAwad, 2020

۱.۲ رویکرد دوم: ارزیابی فشار شکست مغزه در حضور ذرات LCM

در این حالت، از تست *LOT* به کمک دستگاه شکاف هیدرولیکی جهت اندازه‌گیری میزان فشار شکست مغزه استفاده می‌شود. این آزمایش در دو حالت سیال حفاری با *LCM* و بدون ذرات انجام شده و فشارهای شکست نمونه در این دو حالت با هم مقایسه می‌شوند (Morita et al., 1990; Liberman, 2012; Contreras Puerto Dudley et al., 2014). سلول‌های بارگذاری سه محوره^{۲۲} (Dudley et al., 2000; Aadnoy et al., 2007; Nwaoji, 2012; Alsaba, 2015; Rahimi et al., 2016; Ma et al, 2019) و سه محوره‌ی واقعی^{۲۳} (Guo et al., 1985, 1988; DEA 13, 1985, 2019; Zhong et al., 2014) دو نوع از دستگاه‌های رایج استفاده شده در این دسته می‌باشند؛ که برای شبیه‌سازی آزمون شکاف هیدرولیکی به کار می‌روند. این آزمایش‌ها، نسبت به آزمایش‌های دسته‌ی اول، فرآیند هرز روی سیال و مقاوم‌سازی سازند را بهتر به تصویر می‌کشند (Li et al., 2020). نمونه سنگ قرارگرفته در دستگاه سه محوره، دارای هندسه‌ی استوانه‌ای است. در نتیجه امکان اعمال تنش‌های جانبی ناهمسانگرد وجود ندارد. در مقابل، نمونه سنگ مکعبی در دستگاه سه محوره‌ی حقیقی امکان شبیه‌سازی شرایط واقعی مخزن و تنش‌های برجای ناهمسانگرد را فراهم می‌سازد؛ اما بیان این نکته ضروری است که ساخت سلول سه محوره و انجام آزمایش‌های مربوطه بسیار گران‌تر و پیچیده‌تر از آزمایش‌های دیگر است (Zhong et al., 2019).

همان‌طور که پیش‌تر نیز به آن اشاره شد، به‌منظور مقابله با هرز روی سیال حفاری، می‌بایست ابتدا بر رویکرد پیشگیری از هرز روی تمرکز کرد و در صورت عدم موفقیت این رویکرد، روش‌های درمانی را به کار گرفت (Cook et al. 2011). تشکیل کیک گل بر دیواره چاه نقش مهمی را در مقاوم‌سازی

سیال به داخل چاه، فشار ته چاهی افزایش یافته و شکاف‌های ایجاد شده دوباره در «فشار باز شدن مجدد شکاف» (*FRP*) باز خواهند شد که تقریباً برابر با فشار بسته شده شکاف است (Zoback, 2010). پارامترهای *FRP* و *FPP*, *FBP*, *FIP* از جمله پارامترهای کلیدی در مطالعات مربوط به هرز روی سیال در شکاف‌های القایی/طبیعی می‌باشند. از این‌رو، در سال‌های اخیر تعداد زیادی مدل‌سازی تحلیلی (Morita and Fuh, 2012; Feng and Gray, 2016; Mirabbasi Salehi, 2012; Feng et al., 2020)، شبیه‌سازی عددی (Gray, 2018 and Gray, 2018 DEA 13, 1985; Dudley et al., 2000; Razavi, 2016; Zhong et al., 2019) برای مطالعه این پارامترها در موضوع هرز روی سیال و مقاوم‌سازی دیواره چاه انجام شده است. آزمایش‌های انجام شده در حوزه مقاوم‌سازی دیواره چاه را می‌توان به دودسته‌ی کلی تقسیم‌بندی کرد.

۱.۱ رویکرد اول: ارزیابی عملکرد *LCM* در انسداد شکاف‌های مصنوعی

دستگاه *PPA*^{۱۹}، دستگاه فیلتر پرس فشاربالا-دمابالا^{۲۰} و دستگاه *BMT*^{۲۱} از جمله رایج‌ترین روش‌ها، در این رویکرد به حساب می‌آیند. اساس کار این دستگاه‌ها، تزریق سیال حفاری حاوی ذرات *LCM* از درون شکاف شبیه‌سازی شده روی دیسک‌های فلزی و ثبت پارامترهای آزمایشگاهی است تا کارایی انواع *LCM*، در بستن مؤثر شکاف‌های مصنوعی، ارزیابی شود. مطابق شکل-۱، دیسک‌های شکافدار با هندسه‌های مختلف شامل شکاف‌های مستقیم، شکاف‌های مخروطی و شکاف‌های غاری-حفره‌ای به کار می‌روند تا انواع مختلف شکاف را شبیه‌سازی کنند. حجم سیال هرز رفته از شکاف و همچنین بیشترین فشاری که انسداد تشکیل شده توسط ذرات *LCM* بر روی شکاف می‌تواند قبل از شکسته شدن، تحمل کند، رایج‌ترین معیارهای مقایسه‌ی عملکرد ذرات *LCM* در این روش‌ها می‌باشد (Sanders et al., 2011; Van Oort et al., 2011; 2008; Cook Kumar et al., 2011; Mostafavi Toroqi, 2011;

¹⁸ Fracture Reopening Pressure (FRP)

¹⁹ Particle Plugging Apparatus (PPA)

²⁰ High pressure high temperature Filter press

²¹ Bridging Material Test (BMT) apparatus

²² Tri-axial cell

²³ True tri-axial cell

فصل نامه علمی ژئومکانیک نفت؛ دوره ۴؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۰، مقاله پژوهشی

آن بازی می کند و بر فرآیند شروع و رشد شکاف

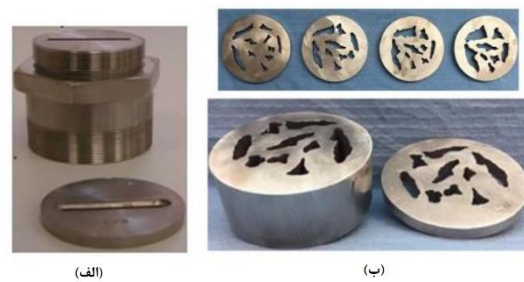
حفره سنگ پمپ می‌شود. سپس گردش سیال حفاری به‌منظور تشکیل کیک گل مناسب بر دیواره چاه برقرار شده و درنهایت، مسیر خروجی سیال در انتهای نمونه مسدود می‌شود. درنتیجه، فشار درون حفره آرام‌آرام بالا می‌رود تا نمونه می‌شکند. اساس تست‌های انجام‌شده در این مطالعه، ایجاد شکاف عمودی در نمونه سنگ (به دلیل ایجاد شرایط رژیم تنش‌ی گسل نرمال) با هدف اندازه‌گیری فشار شکست نمونه (FBP) و انجام چرخه‌ی دوم تست پس از ده دقیقه، برای به دست آوردن فشار بازشدگی مجدد شکاف (FRP) است که با تزریق سیالات حفاری مختلف (با و بدون LCM) انجام می‌شود. انتخاب بازه‌ی زمانی ۱۰ دقیقه‌ای بین تست‌ها، بر اساس مطالعات آزمایشگاهی پیشین می‌باشد (Lieberman, 2012; Contreras Puerto 2014; Nwaoji, 2012; Alsaba, 2015). با توجه به هندسه‌ی استوانه‌ای نمونه‌های آزمایشگاهی، تنش‌های افقی حداقل و حداکثر در این مطالعه با هم برابر بوده ($\sigma_h = \sigma_H$) و تنش محوری بیشتر از تنش‌های افقی در نظر گرفته شده است. در این آزمایش، نمونه‌ها تحت فشار محصورکننده $psi\ 650$ و تنش محوری $psi\ 2000$ قرار گرفته‌اند.

این دستگاه از سه بخش اصلی تشکیل شده است: ۱- سیستم بارگذاری، ۲- سیستم گردش/تزریق سیال و ۳- سیستم جمع‌آوری داده. شکل ۲- اجزای مختلف تشکیل‌دهنده این سیستم را نشان می‌دهد.

۲.۱ سیستم بارگذاری

این بخش شامل یک سلول فشاری سه محوره و دو پمپ هیدرولیکی مجزا برای اعمال تنش‌های محوری و جانبی به نمونه است. سلول فشار از یک بدنه اصلی با دو درگاه برای ورود و خروجی روغن، دو فلنج توخالی فولادی بالا و پایین که به بدنه‌ی اصلی پیچ می‌شوند، یک غلاف از جنس پلی‌اتیلن جهت قرارگیری نمونه در آن و اعمال فشار جانبی روغن به نمونه و دو کپ بارگذاری بالا و پایین که دارای یک سوراخ سرتاسری در مرکز خود، برای انتقال سیال حفاری به حفره مرکزی نمونه (چاه) تشکیل شده است. نمونه سنگ استوانه‌ای درون این سلول قرار می‌گیرد و غلاف پلی‌اتیلنی اطراف آن را احاطه می‌کند. در هنگام تست، یک

اثرگذار است (Ma et al., 2019; Yang et al., 2020). مطالعات محدودی در زمینه‌ی ارزیابی آزمایشگاهی نقش ذرات LCM در تشکیل کیک گل برای پوشاندن مؤثر سطح شکاف در طول فرایند شکست مغزه و افزایش فشار شکست سازند وجود دارد. لذا لازم است این موضوع بیشتر مورد مطالعه قرار گیرد. به این منظور در این مطالعه، پس از طراحی و ساخت «دستگاه ارزیابی مقاومت‌سازی دیواره چاه»^{۲۴}، تأثیر عملکرد چند نمونه رایج LCM بر افزایش فشار شکست سنگ با رویکرد پیشگیرانه، بررسی شده است.



شکل ۱. شکاف‌های مصنوعی بر روی دیسک‌های فلزی الف: شکاف مستقیم (Nasiri et al., 2017)، ب: شکاف حفره‌ای و غاری (Alshubbar et al., 2018)

۲. شرح دستگاه آزمایشگاهی

دستگاه ارزیابی مقاومت‌سازی دیواره چاه، یک دستگاه بارگذاری سه محوره بوده که امکان شبیه‌سازی کامل پدیده‌ی مقاومت‌سازی دیواره چاه را تحت شرایط واقعی تنش‌های برجا فراهم می‌کند. در این آزمایش از نمونه‌های استوانه‌ای استفاده می‌شود که در مرکز آن یک حفره نیم اینچی شبیه‌ساز چاه وجود دارد. قطر نسبتاً بزرگ نمونه‌ها (۴ اینچ) کمک می‌کند تا حد ممکن اثر مرزهای نمونه بر نتایج آزمایشگاهی حذف شده و تست به شرایط واقعی نزدیک‌تر شود. مطابق شکل ۲-، این دستگاه متشکل از دو پمپ هیدرولیکی مجزا برای اعمال فشار محصورکننده و فشار سیال درون‌چاهی می‌باشد. همچنین از یک پیستون هیدرولیکی به‌منظور اعمال تنش محوری به سنگ استفاده می‌شود. پس از قرار دادن نمونه در درون دستگاه و اعمال تنش‌های محوری و محصورکننده (برابر با تنش‌های برجا)، سیال حفاری به درون

^{۲۴} Wellbore Strengthening Evaluation Apparatus

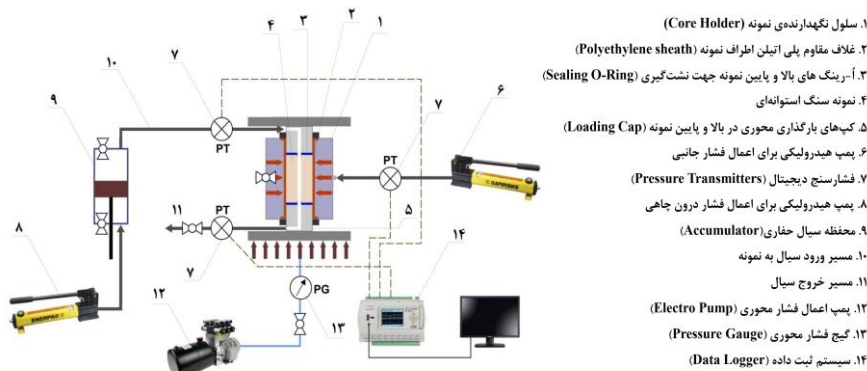
مطالعه آزمایشگاهی اثر ذرات LCM بر گرادیان ...

واشر پلی اتیلنی در بالا و پایین نمونه جهت جلوگیری از نشت

نمونه‌ها، تنش‌های افقی اعمالی به آن‌ها، همسانگرد بوده و با هم برابرند. برای اعمال فشار محوری (معادل با فشار روباره) به نمونه سنگ، یک جک هیدرولیکی با حداکثر ظرفیت ۷۰۰ بار (۱۰۰۰۰ پام) استفاده می‌شود.

سیال قرار می‌گیرد. با توجه با فشار کاری بالای سلول (حدود ۶۰۰ بار معادل ۸۷۰۰ پام)، جنس آن، فولاد زنگ نزن ۳۱۶L انتخاب شده است.

فشار جانبی به نمونه توسط یک پمپ هیدرولیک دستی اعمال می‌شود که می‌تواند تا فشار ۷۰۰ بار (۱۰۰۰۰ پام) روغن را در پشت غلاف پلی‌اتیلنی پمپ کند. به علت شکل استوانه‌ای



شکل ۲. شماتیک دستگاه ارزیابی مقاومت‌سازی دیواره چاه

۲.۳ سیستم جمع‌آوری داده‌ها

در این دستگاه، از دو فشارسنج برای ثبت فشار سیال ورودی و خروجی به حفره‌ی مرکزی نمونه استفاده شده است تا در صورت انسداد مسیر جریان و ایجاد مشکل در روند تزریق سیال، بتوان آن را تشخیص داد (در حالت نرمال، فشار ثبت شده توسط این فشارسنج‌ها باید تقریباً یکسان باشد). برای ثبت فشار محصورکننده، یک فشارسنج در مسیر جریان روغن از پمپ دستی به سلول نگهدارنده‌ی نمونه قرار می‌گیرد. به کمک این فشارسنج می‌توان زمان دقیق و فشار شکست نمونه را ثبت کرد؛ چراکه در صورت ایجاد شکست واقعی در سنگ، بلافاصله شکاف به مرز نمونه رسیده و یک افزایش ناگهانی در مقدار فشار جانبی مشاهده خواهد شد. فشار محوری وارد شده به سنگ نیز به کمک یک فشارسنج آنالوگ اندازه‌گیری می‌شود. داده‌های فشاری این سنسورها از طریق سیستم ثبت داده به صورت عددی و نموداری ذخیره و نمایش داده می‌شوند.

۳. نمونه مغزه‌ها

اگر در انجام پژوهش از کمک‌های معنوی، علمی، ویراستاری و ... شخص، سازمان، پژوهشگاه یا نهادی استفاده شده است، در این بخش باید به آن اشاره شود

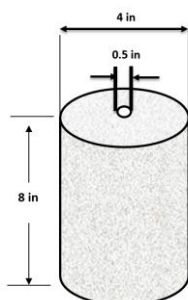
۲.۲ سیستم گردش/تزریق سیال

این مجموعه شامل یک محفظه سیال حفاری به ظرفیت ۷۰۰ سی‌سی و همچنین پمپ تزریق سیال است. مطابق با استاندارد API، حجم لازم برای ساخت گل در آزمایشگاه، ۳۵۰ سی‌سی (معادل با یک بشکه گل در عملیات) در نظر گرفته می‌شود. لذا در این دستگاه با توجه به حجم شلنگ‌ها و فضای حلقوی نمونه، ظرفیتی معادل دو برابر ۳۵۰ سی‌سی (۷۰۰ سی‌سی) برای محفظه‌ی گل حفاری در نظر گرفته شده است تا از داشتن مقدار کافی سیال حفاری در حین آزمایش، اطمینان حاصل شود. درون محفظه سیال، یک پیستون قرار دارد که سیال حفاری را از سیال محرک (روغن) جدا می‌کند. با اعمال فشار روغن در پشت پیستون توسط یک پمپ دستی هیدرولیکی فشار بالا (۷۰۰ بار)، سیال حفاری که در قسمت جلوی پیستون قرار گرفته است به درون حفره مرکزی نمونه (چاه) تزریق می‌شود. در این دستگاه از شلنگ‌ها و اتصالات با سایز بزرگ (با قطر داخلی ۳/۸ اینچ) و توانایی تحمل فشار بالا (۷۰۰ بار) استفاده شده است تا ریسک انسداد مسیر در حین آزمایش با ذرات LCM با سایز بزرگ، به حداقل برسد.

بتن (یک مترمکعب) بیان می‌شوند. جهت ساخت نمونه‌ها از ماسه‌سنگ کوارتزی، سیمان پرت لند، آب و یک فوق روان کننده بر پایه کربوکسیلات اثر برای افزایش روانی و کارایی بتن استفاده شد. استفاده از سنگ‌دانه‌های ریز ماسه در این نمونه‌ها، باعث بهبود تراوایی و تخلخل سنگ می‌شود و نمونه‌های نهایی به سنگ واقعی شبیه‌تر خواهد بود (Donza 2002). مقادیر نهایی طرح اختلاط برای ساخت ۲۰ عدد نمونه بتنی مطابق با جدول ۱- می‌باشد. پس از ساخت نمونه‌ها، جهت تکمیل فرآیند عمل‌آوری و هیدراسیون نمونه‌ها و رسیدن به مقاومت مشخصه بتن، نمونه‌ها به مدت ۲۸ روز درون آب‌آهک قرار گرفتند. در نهایت، مطابق شکل ۳-، پس از صیقل دادن سرتوه نمونه‌ها، یک سوراخ سرتاسری به قطر 0.5 اینچ به‌عنوان حفره شبیه‌ساز چاه در نمونه‌ها حفر شد. خواص فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های بتنی مطابق با روش‌های استاندارد، اندازه‌گیری شده و در جدول ۲- ارائه شده است.

جدول ۱. مقادیر نهایی طرح اختلاط برای ساخت ۲۰ مغزه بتنی

پارامتر	مقادیر
نسبت آب به سیمان	0.51%
آب	5.310 Kg
سیمان	10.411 Kg
سنگ‌دانه	33.281 Kg
فوق روان کننده	0.036 Kg



شکل ۳. نمونه مغزه بتنی با یک حفره‌ی نیم اینچی در مرکز آن

عموماً در انجام تست آزمایشگاهی شکاف هیدرولیکی، هرچه سایز نمونه مغزه‌ها بزرگ‌تر باشد اثر مرزهای خارجی بر نتایج آزمایش کمتر می‌گردد و شرایط واقعی میدان، بهتر شبیه‌سازی می‌شود. از سوی دیگر، بزرگ‌تر شدن سایز نمونه‌ها، منجر به افزایش ابعاد محفظه‌ی نگه‌دارنده‌ی نمونه می‌شود که هزینه‌های ساخت و پیچیدگی‌های عملیاتی را افزایش می‌دهد. مطابق بررسی‌های پیشین، در مطالعات ژئومکانیکی آزمایشگاهی، طول نمونه می‌بایست حداقل برابر و یا بزرگ‌تر از قطر آن باشد تا از تمرکز تنش در نمونه‌های استوانه‌ای جلوگیری شود. انجمن بین‌المللی ژئومکانیک، نسبت طول به قطر مناسب برای نمونه‌های استوانه‌ای را بین ۲ الی ۳ در نظر گرفته است (Fairhurst & Hudson 2017, Turner et al. 1999). به‌علاوه، تعداد زیادی از مطالعات انجام‌شده در حوزه مقاوم‌سازی دیواره چاه، سایز ۴ اینچ را برای قطر نمونه‌های خود در ارزیابی‌های آزمایشگاهی انتخاب کرده‌اند (Mostafavi, 2012; Razavi, 2016). لذا نمونه مغزه‌های به‌کاررفته در این پژوهش، مغزه‌های استوانه‌ای با قطر ۴ اینچ و ارتفاع ۸ اینچ بوده که در مرکز آن‌ها یک حفره سرتاسری به قطر ۰/۵ اینچ به‌عنوان چاه در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه جهت ایجاد شرایط یکسان آزمایشگاهی، از نمونه‌های مصنوعی بتنی برای انجام آزمایش‌ها استفاده شده است؛ چراکه فشار شکست این نمونه‌های همگن، با یکدیگر برابر است و به این طریق می‌توان اثر عملکرد LCM‌های مختلف بر فشار شکست نمونه را بررسی کرد. استفاده از مغزه‌های دست‌ساز بتنی، با هدف تکرارپذیری آزمایش‌ها و همچنین حذف اثر ناهمگنی سنگ امری رایج در این مطالعات است (Mostafavi Toroqi, 2011; Liberman, 2012; Ma et al., 2019).

برای اینکه نمونه‌های بتنی ساخته‌شده، از لحاظ خواص فیزیکی و مکانیکی رفتاری مشابه سنگ واقعی داشته باشند، طرح اختلاط^{۲۵} نهایی پس از چندین مرحله ساخت و اندازه‌گیری خواص نمونه‌های مختلف (با سعی و خطا) به دست آمد. طرح اختلاط به مفهوم «انتخاب مقادیر مناسب سیمان، سنگ‌دانه و آب، برای ساخت بتنی با خواص و مشخصات فنی مطلوب با توجیه اقتصادی» است (Gambhir 2013). این مقادیر معمولاً برحسب وزن اجزا در واحد حجم

²⁵ Mixing Design

جدول ۲. خواص فیزیکی و مکانیکی مغزه های بتنی

پارامتر	مقدار	روش آزمایش (دستگاه)
تخلخل	16.3%	دستگاه تخلخل سنج هلیومی
تراوایی	0.02 mD	Automated gas permeameter
مدول یانگ	2.18 Gpa	The CSIRO autonomous Triaxial cell
نسبت پوآسون	0.07	The CSIRO autonomous Triaxial cell
مقاومت فشاری تک محوره (UCS)	20.2 Mpa	The CSIRO autonomous Triaxial cell
مقاومت کششی (Tensile strength)	4.8 Mpa	آزمون برزیلی
چقرمگی (Toughness)	0.87 Mpa.m1/2	Semi-circular bend آزمون

بر افزایش گرادیان شکست سازند به عنوان یک روش پیشگیرانه بررسی گردد. به این منظور کربنات کلسیم سائز شده^{۲۶} (SCC) و "RIPI-LQ" به عنوان ذرات کنترل کننده ی هرز روی به سیال حفاری افزوده شد. SCC، به دلیل قیمت ارزان تر، مقاومت مکانیکی بالاتر و قابلیت انحلال در اسید، به عنوان یکی از پرکاربردترین انواع LCM جهت درمان هرز روی در چاه های ایران شناخته می شود. از سوی دیگر "RIPI-LQ" یک LCM با پایه ی گیاهی و سازگار با محیط زیست و ابداعی پژوهشگاه صنعت نفت ایران بوده که در مطالعات آزمایشگاهی و تست های میدانی نتایج بسیار مطلوبی را جهت درمان هرز روی نشان داده است (Nariri et al., 2017, 2018). شکل-۴ تصویری از LCM های مورد استفاده در این پژوهش را نشان می دهد

جدول ۳. خواص رئولوژیکی سیال حفاری پایه (گل بنتونایتی)

پارامتر	مقادیر
ویسکوزیته ظاهری (Apparent Viscosity)	9.5 cp
ویسکوزیته پلاستیک (Plastic Viscosity)	5 cp
نقطه ی تسلیم (Yield Point)	9 lb/100ft ²
مقاومت ژله ای (Gel Strength)	4.6 lb/100ft ²
وزن گل (Mud Weight)	64.5 pcf

جهت تعیین توزیع اندازه ذرات LCM، از الک های استاندارد "ASTM E11" استفاده شد. مقدار مشخصی از هر LCM،

۴. آماده سازی سیال حفاری

مطالعه ی داده های مرتبط با هرز روی چاه های مختلف حفاری شده در ایران، نشان می دهد که «گل حفاری پایه-آبی بنتونایتی» یکی از رایج ترین سیالات حفاری است که بیشترین میزان هرز روی را در حفاری چاه های نفتی و گازی در ایران دارد. این سیال عمدتاً جهت حفاری سازندهای آگاجاری، میشان و زون های کم فشار لایه های گچساران در میداین نفتی ایران استفاده می شود (Nasiri et al., 2017). از این رو، گل بنتونایتی به عنوان «سیال پایه» در این پژوهش انتخاب شد. همچنین جهت معلق نگه داشتن ذرات LCM، نیاز به یک ویسکوسیفایر بوده که بنتونایت به عنوان رایج ترین ویسکوسیفایر در فرمولاسیون سیالات حفاری در داخل کشور، مدنظر قرار گرفت. جهت ساخت گل بنتونایتی (سیال پایه)، مطابق استاندارد API-13B مقدار ۲۲.۵ گرم بنتونایت (معادل 22.5 پوند بر بشکه) به ۳۵۰ سی سی آب اضافه شد. خواص رئولوژیکی سیال با کمک ویسکومتر دوار (مدل FANN 3) و ماد بالانس به دست آمد که نتایج آن در جدول-۳ ارائه شده است. جهت حذف هرگونه تأثیر مثبت و یا منفی سایر افزایش دهنده های حفاری بر نتایج ارزیابی مقاومت سازی دیواره چاه، از اضافه کردن سایر افزودنی های رایج به فرمولاسیون سیال حفاری، خودداری شده است.

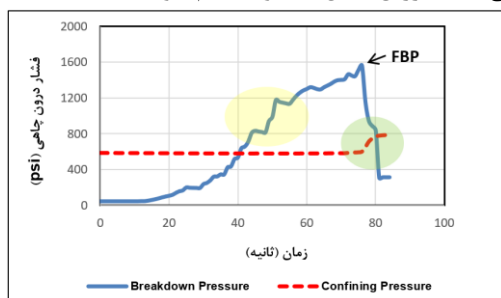
۵. نوع و خواص ذرات LCM

در این پژوهش، دو نمونه LCM دانه ای که جهت درمان هرز روی به کار می رود، مورد مطالعه قرار گرفته است تا تأثیر آن ها

^{۲۶} Sized Calcium Carbonate (SCC)

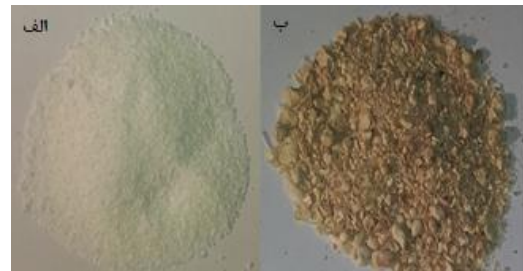
لازم به ذکر است که به خاطر استفاده از پمپ هیدرولیک دستی برای تزریق سیال حفاری به درون نمونه، بر روی دبی خروجی از پمپ دستی، کنترل کمی ای وجود نداشت؛ و در نتیجه قابلیت تزریق با دبی بسیار کم جهت مشاهدهی ایجاد و شروع ترک در سنگ امکان پذیر نبود.

۶.۱ آزمایش شماره ۱: استفاده از آب به عنوان سیال شکست در اولین آزمایش، از آب به عنوان سیال شکست استفاده شد. شکل-۵ نمودار فشار دهانهی چاه بر حسب زمان را نشان می دهد. مطابق این شکل با تزریق سیال به درون حفره، فشار درون چاهی لحظه به لحظه افزایش می یابد تا اینکه نهایتاً نمونه می شکند. همان طور که در این نمودار مشاهده می شود، افت ناگهانی فشار در نمودار آبی رنگ، نشان دهنده شکست نمونه است و فشار در این نقطه، برابر فشار شکست سنگ است (FBP) که معادل 1565 psi می باشد. از سوی دیگر، تغییر نمودار فشار جانبی (نمودار قرمز رنگ)، لحظه شکست نمونه را به خوبی تأیید می کند. مطابق این شکل، در لحظه ایجاد شکست واقعی در سنگ (FBP)، بلافاصله شکاف به مرز نمونه رسیده و با اعمال فشار به غلاف، یک افزایش ناگهانی (پیک فشاری) در مقدار فشار جانبی مشاهده می گردد. نوسانات فشاری مشاهده شده در منحنی فشار شکست (ناحیه زرد رنگ)، به دلیل استفاده از پمپ هیدرولیک دستی برای تزریق سیال حفاری به درون نمونه و وقفه زمانی ایجاد شده مابین هر دو استروک^{۲۸} در هنگام کار با پمپ دستی است. لازم به ذکر است که جهت از بین بردن این نوسانات در نمودار فشار شکست، بهتر است با استفاده از پمپ تزریق سرنگی^{۲۹} با دبی ثابت، تزریق سیال به نمونه انجام شود.



شکل ۵. نمودار فشار دهانهی چاه بر حسب زمان برای آزمایش اول

روی الکها ریخته شده و با استفاده از یک لرزاننده به مدت ۳۰ دقیقه غربال شد؛ در نهایت درصد ذرات عبوری از هر الک محاسبه گشت. سایز ذرات "RIP-LQ" و "SCC" به ترتیب در محدودهی ۱۲۰۰-۷۵ میکرون و ۱۰۰۰-۲۱۰ میکرون به دست آمد.



شکل ۴. ذرات LCM استفاده شده در این مطالعه. الف: کربنات کلسیم سایز شده (SCC)، ب: RIP-LQ

۶. بحث و نتایج

پس از آماده سازی نمونه ها، آزمایش های مورد نظر جهت مطالعهی اثر ذرات LCM بر فشار شکست مغزه ها، طراحی و انجام شد. به این منظور، چهار آزمایش با فرمولاسیون های مختلف سیال حفاری انجام شد که در تمام آن ها شرایط آزمایش از جمله، خواص مغزه ها و رژیم تنش های اعمالی بر سنگ، یکسان و ثابت بوده و فقط خواص سیال حفاری تغییر کرد تا بتوان اثر سیال حفاری حاوی ذرات LCM را بر گرادیان شکست سازند (FBP & FRP) و در نتیجه بر مقاومت سازی دیواره چاه بررسی نمود. لازم به ذکر است جهت کسب اطمینان از نتایج به دست آمده و تکرار پذیری آزمایش ها، هر آزمایش سه مرتبه تکرار گردید.

در اولین آزمایش، نمونه سنگ با آب شیر^{۲۷} شکسته شد تا بتوان نتایج آن را با سایر سیالات حفاری مقایسه کرد. در ادامه، جهت بررسی اثر ذرات جامد سیال حفاری بر گرادیان شکست سنگ، سیال حفاری بنتونایتی به عنوان سیال پایه ساخته شد و آزمون شکست نمونه ها، در شرایط یکسان با آزمون قبلی، انجام شد. سپس با افزودن دو نمونه LCM به سیال پایه، میزان اثر گذاری ذرات LCM بر مقاومت سازی دیواره چاه مورد مطالعه قرار گرفت.

^{۲۹} Syringe Pump

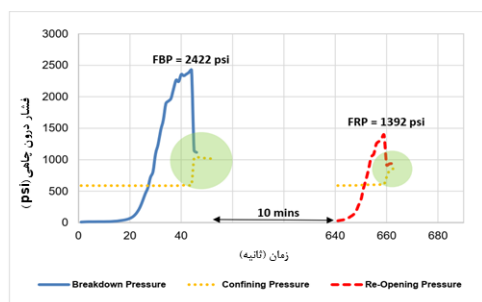
^{۲۷} Tap water

^{۲۸} Stroke

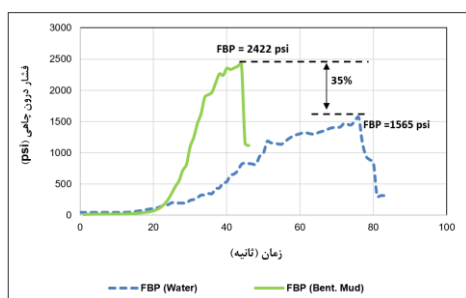
مطالعه آزمایشگاهی اثر ذرات LCM بر گرادیان ...

(آب به عنوان سیال شکست

پوششی آن کمک کند و ضمن دیواره سازی مناسب بر اطراف دهانه‌ی چاه، منجر به افزایش فشار شکست سازند شود. به دلیل اعمال رژیم تنشی گسل نرمال و بیشتر بودن فشار محوری نسبت به فشار جانبی، شکاف ایجاد شده در نمونه، عمودی است که به وضوح در شکل ۸- دیده می‌شود. همچنین کیک گل ایجاد شده بر دیواره چاه توسط سیال بنتونایتی که منجر به افزایش فشار شکست سازند شده است، در شکل ۹- قابل مشاهده است.



شکل ۶. نمودار فشار دهانه‌ی چاه بر حسب زمان برای آزمایش شماره دو (سیال بنتونایتی (سیال پایه) به عنوان سیال شکست)



شکل ۷. مقایسه‌ی مقادیر فشار شکست (FBP) نمونه در آزمایش‌های اول و دوم



شکل ۸. شکاف عمودی ایجاد شده در نمونه در آزمایش

۶.۲ آزمایش شماره دو: استفاده از سیال بنتونایتی به عنوان

سیال شکست

در آزمایش شماره دو، جهت ارزیابی اثر حضور ذرات جامد در تغییر خواص سیال حفاری نسبت به سیال پایه (آب)، از افزودنی بنتونایت در گل حفاری استفاده شده است. مطابق شکل-۶ که نمودار فشار دهانه‌ی چاه بر حسب زمان را برای آزمایش دوم نشان می‌دهد، مقدار فشار شکست سنگ (FBP) برای این نمونه، برابر 2422 psi است که حدود ۳۵٪ بیشتر از فشار شکست سنگ با آب (آزمایش اول) است و تأثیر ذرات جامد موجود در سیال حفاری را در افزایش فشار شکست سنگ به خوبی نشان می‌دهد. جهت اندازه‌گیری مقدار فشار بازشدگی مجدد شکاف (FRP)، به مدت ۱۰ دقیقه فشار از داخل حفره برداشته شد. سپس چرخه دوم آزمایش با تزریق مجدد سیال به درون سنگ انجام شد. در این مرحله، فشار بازشدگی مجدد 1392 psi به دست آمد. با توجه به اینکه مقاومت سنگ سالم^{۲۰} بیشتر از سنگ شکافدار است، این یک امر طبیعی است (Fjaer et al., 2008; Liberman 2012). در شکل-۶، نمودار آبی‌رنگ مرحله‌ی اول تست را جهت اندازه‌گیری فشار شکست سازند نشان می‌دهد. از سوی دیگر، نمودار قرمز رنگ، مرحله دوم تزریق سیال را برای اندازه‌گیری فشار بازشدگی مجدد سنگ ارائه می‌دهد. با توجه به نمودار نارنجی رنگ، افزایش فشار جانبی در لحظه‌ی شکست نمونه در هر دو مرحله‌ی تزریق، فشار شکست سنگ را به درستی تأیید می‌کند (دایره‌ی سبزرنگ). در واقع، اگرچه ایجاد میکروفرکچرها^{۲۱} و یا شکستن کیک گل^{۲۲} تشکیل شده در میکروفرکچرها منجر به ایجاد نوسانات در منحنی فشار چاه می‌شود، اما با در نظر گرفتن تغییرات نمودار فشار جانبی، می‌توان لحظه ایجاد شکست در سنگ را با اطمینان به دست آورد (Liberman 2012).

شکل-۷، مقایسه‌ی منحنی فشار شکست سازند را برای دو حالت سیال بنتونایتی و آب نشان می‌دهد. این شکل، به وضوح بهبود فشار شکست نمونه (FBP) ناشی از ذرات جامد سیال حفاری را بیان می‌کند و نشان می‌دهد که فارغ از نوع LCM، حضور ذرات جامد در سیال حفاری می‌تواند به بهبود خواص

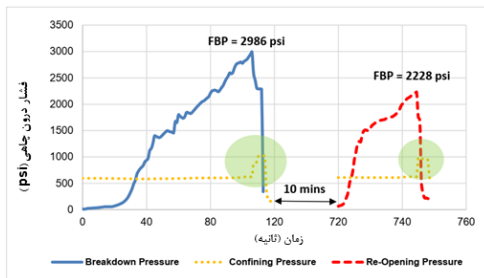
^{۲۲} Rupture

^{۲۰} Intact rock

^{۲۱} Micro-fractures

فصل نامه علمی ژئومکانیک نفت؛ دوره ۴؛ شماره ۲؛ تابستان ۱۴۰۰، مقاله پژوهشی

شماره دو (سیال بنتونایتی)



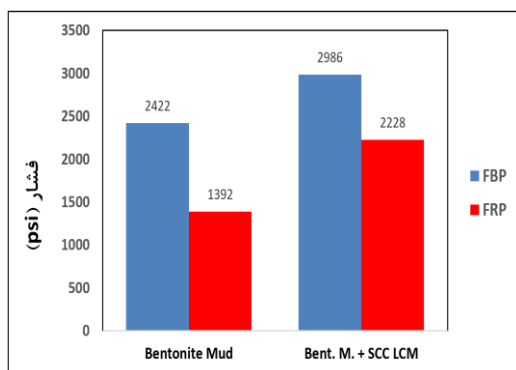
شکل ۱۰. نمودار فشار دهانه‌ی چاه برحسب زمان برای آزمایش شماره سه (سیال بنتونایتی حاوی SCC LCM به عنوان سیال شکست)



شکل ۹. کیک گل تشکیل شده بر دیواره چاه توسط سیال بنتونایتی (آزمایش شماره دو)

۶.۳ آزمایش شماره سه: استفاده از سیال بنتونایتی حاوی ذرات LCM کربنات کلسیم

مقایسه نتایج آزمایش شماره سه با نتایج آزمایش شماره دو (سیال پایه) در شکل-۱۱ نشان می‌دهد که استفاده از این نوع LCM، به ترتیب باعث بهبود ۲۳ و ۶۰ درصدی فشار شکست سازند و فشار بازشدگی مجدد شکاف می‌شود. در واقع استفاده از ذرات LCM منجر به تشکیل کیک گلی با تراوایی کمتر و استحکام بیشتر نسبت به سیال پایه (سیال بنتونایتی بدون LCM) می‌گردد. این امر ارتباط سیال حفاری درون چاه را با دیواره چاه به حداقل می‌رساند و منجر به افزایش فشار قابل تحمل دیواره چاه می‌شود. از سوی دیگر، با پل زدن یا انسداد ذرات LCM درون شکاف یا پوشانده شدن دهانه‌ی شکاف ایجاد شده با ذرات LCM، FRP افزایش قابل ملاحظه‌ای نشان می‌دهد و منجر به مقاوم شدن شکاف خواهد شد (Morita et al., 1990; Fuh et al., 1992; Alsaba, 2015; Cook et al., 2016; Feng and Grey 2017).

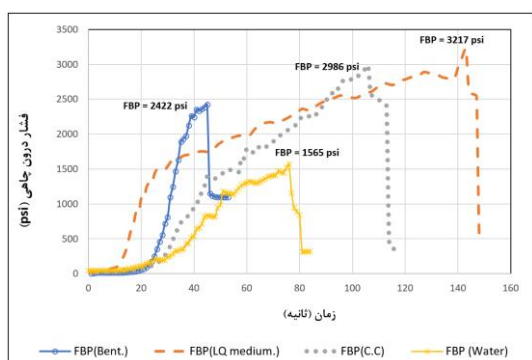


شکل ۱۱. نمودار مقایسه مقادیر FBP و FRP سیال بنتونایتی (آزمایش شماره دو) با سیال بنتونایتی حاوی SCC LCM (آزمایش شماره سه)

نتایج حاصل از آزمایش اول و دوم نشان می‌دهد که حضور یک فاز جامد در سیال حفاری می‌تواند بر تغییر فشار شکست نمونه‌ها مؤثر باشد؛ بنابراین انتظار می‌رود تغییر در نوع و میزان فاز جامد سیال حفاری، بر فشار شکست نمونه تأثیرگذار باشد. بدین منظور جهت مطالعه اثر LCM‌های مختلف بر گرادبان شکست سازند، در آزمایش‌های شماره سه و چهار، ترکیبات مختلفی از ذرات LCM به سیال حفاری افزوده شده است.

در آزمایش شماره سوم، مقدار ۱۵ گرم کربنات کلسیم (معادل ۱۵ پوند بر بشکه) به عنوان LCM، به سیال پایه (سیال بنتونایتی) اضافه شد. مطابق شکل-۱۰ که نمودار فشار دهانه‌ی چاه برحسب زمان را برای آزمایش سوم نشان می‌دهد، مقدار فشار شکست نمونه سنگ (FBP) در این آزمایش برابر ۲۹۸۶ psi و فشار بازشدگی مجدد (FRP) در چرخه‌ی دوم تزریق (پس از ۱۰ دقیقه) به ۲۲۲۸ psi به دست آمد. شکل مضرس مانند و دندانه‌دار منحنی فشار بدین خاطر است که ابتدا میکرو شکاف‌هایی در سنگ شکل می‌گیرد ولی به دلیل حضور ذرات LCM در سیال حفاری، بلافاصله این میکرو شکاف‌ها توسط ذرات LCM بسته می‌شوند. با افزایش مجدد فشار، ضعیف‌ترین نقطه‌ی پلاگ شکسته و مجدداً میکرو شکاف باز می‌شود. فرآیند تشکیل پیوسته پلاگ در میکرو شکاف‌ها و شکسته شدن آن‌ها تحت فشار سیال داخل چاه تا رسیدن به فشار شکست نمونه (FBP) و ایجاد شکاف کامل در سنگ و رسیدن آن به مرز نمونه ادامه می‌یابد.

می‌دهد. همچنین مقایسه‌ی عملکرد LCM‌های مختلف به‌کاررفته در این پژوهش، در شکل-۱۳ ارائه شده است. با توجه به اینکه در این پژوهش از پمپ هیدرولیکی دستی جهت اعمال فشار سیال به داخل مغزه استفاده شد، کنترل کمی دقیقی بر روی نرخ خروج سیال وجود نداشت و تنها فشار اعمالی، قابل‌اندازه‌گیری بود. لذا سیال خارج شده در برخی از تست‌ها بیشتر از سایر آزمایش‌ها بوده و نمونه در زمان کوتاه‌تری به «ماکزیمم فشار قابل تحمل» رسیده است. از این‌رو در این پژوهش، مبنای نویسندگان برای ارزیابی مقاوم‌سازی دیواره چاه، فشار شکست نمونه بوده و زمان تست‌ها با یکدیگر مقایسه نشدند. مطابق شکل ۱۳، سیال حفاری حاوی ذرات *RIPI-LQ* بهترین عملکرد را در افزایش فشار شکست نمونه داشته است.



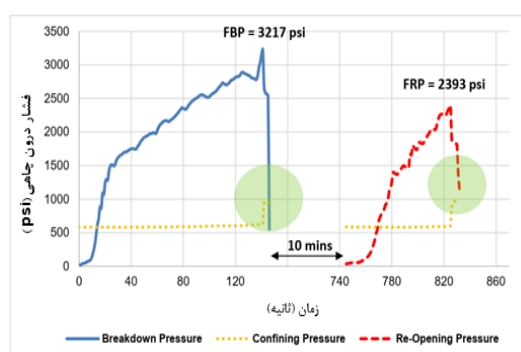
شکل ۱۳. مقایسه عملکرد انواع ذرات LCM در بهبود فشار شکست سنگ برای ۴ آزمایش

۶.۴ آزمایش شماره چهار: سیال بنتونایتی حاوی ذرات

RIPI-LQ LCM به‌عنوان سیال شکست

نتایج حاصل از تست میدانی کاربرد RIPI-LQ جهت درمان هرز روی کامل در یکی از چاه‌های میدان گازی عسلویه، نشان داده است که استفاده از این نوع LCM، عملکرد مطلوبی را در کنترل هرز روی داشته است (Nasiri et al., 2017). از این‌رو در این آزمایش، مقدار ۱۵ گرم (معادل ۱۵ پوند بر بشکه) از RIPI LQ به سیال پایه (سیال بنتونایتی) اضافه شد. شرایط آزمایش نیز دقیقاً همانند آزمایش‌های قبلی بود. مطابق شکل-۱۲، مقدار فشار شکست نمونه سنگ (FBP) در این آزمایش برابر ۳۲۱۷ psi و فشار بازشدگی مجدد (FRP) نیز ۲۳۹۳ psi به دست آمد که به ترتیب باعث بهبود ۳۳٪ و ۷۲٪ فشار شکست سازند و فشار بازشدگی مجدد شکاف نسبت به سیال پایه شده است.

جدول ۴- خلاصه‌ی نتایج تمامی تست‌های انجام شده را نشان



شکل ۱۲. نمودار فشار دهانه‌ی چاه برحسب زمان برای آزمایش شماره چهار (سیال بنتونایتی حاوی RIPI-LQ به‌عنوان سیال شکست)

جدول ۴. خلاصه‌ی نتایج آزمایش‌ها

شماره آزمایش	نوع سیال و LCM	غلظت LCM (lb/bbl)	مقدار FBP	درصد افزایش FBP	مقدار FRP	درصد افزایش FRP
عرض ستون‌ها	آب	-	۱۵۶۵	-۳۵,۳۸	-	-
فاصله‌ی بین ستون‌ها	سیال بنتونایتی بدون LCM	-	۲۴۲۲	-	۱۳۹۲	-
فاصله از راست	سیال حفاری بنتونایتی + Calcium Carbonate	۱۵	۲۹۸۶	۲۳,۳	۲۲۲۸	۶۰,۱
فاصله از چپ	سیال حفاری بنتونایتی +					

۷. نتیجه‌گیری

برای ساخت مغزه‌های مصنوعی بتنی با خواصی تقریباً مشابه خواص سنگ ارائه و از آن در آزمایش‌ها استفاده شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها نشان می‌دهد که فشار شکست نمونه‌ها با سیال حفاری (سیال بنتونایتی)، بسیار بالاتر از فشار شکست نمونه‌ها با آب است. چراکه در این حالت، با تشکیل یک لایه کیک گل کم‌تراوا بر دیواره چاه، سازند مقاوم‌تر می‌شود. همچنین افزودن انواع LCM به سیال حفاری، می‌تواند عملکرد سیال حفاری را بهبود بخشد. در این پژوهش، دو نوع LCM مختلف به سیال حفاری پایه (سیال بنتونایتی) افزوده و عملکرد آن‌ها بررسی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد افزودن انواع LCM به سیال حفاری، می‌تواند منجر به افزایش فشار شکست سنگ و فشار بازشدگی مجدد شکاف‌ها نسبت به سیال پایه شود، به‌گونه‌ای که FBP تا حدود ۳۳ درصد و FRP تا حدود ۷۲ درصد افزایش داشتند. در نتیجه می‌توان قبل از ورود به سازندهایی که امکان هرز روی در آن‌ها بالاست، به‌طور پیوسته از ذرات LCM در سیال حفاری جهت بالا بردن فشار شکست سازند، استفاده کرد.

هرز روی سیال حفاری مدت‌هاست که به‌عنوان یک نگرانی جدی در عملیات حفاری شناخته‌شده و زمان و هزینه‌های عملیات را تحت تأثیر خود قرار داده است. کلیدی‌ترین راهکار برای مقابله با این چالش، بهبود ظرفیت فشاری قابل تحمل سازند است که به‌عنوان مقاوم‌سازی دیواره چاه (WBS) شناخته‌شده و با دو رویکرد پیشگیرانه و درمانی به‌کار گرفته می‌شود. تشکیل کیک گل بر دیواره چاه بر فشار شروع و رشد شکاف اثرگذار است و نقش مهمی را در پیشگیری از هرز روی بازی می‌کند. از این‌رو، در این مقاله به ارزیابی نقش ذرات LCM در تشکیل کیک گل برای پوشاندن مؤثر سطح دیواره چاه و افزایش فشار شکست سازند به‌عنوان یک روش پیشگیرانه در جلوگیری از هرز روی پرداخته‌شده است. بدین منظور، یک دستگاه آزمایشگاهی مبتنی بر مفاهیم شکست مغزه توسط سیال، طراحی و ساخته شد تا به کمک آن اثر افزودن LCM به سیال حفاری بر افزایش فشار شکست نمونه و فشار بازشدگی مجدد شکاف‌ها بررسی شود. جهت حذف اثر ناهمگنی در نمونه‌ها، یک طرح اختلاط

۸. مراجع

- Aadnoy, B. S., Belayneh, M., Arriado, M., & Flateboe, R. (2007). Design of well barriers to combat circulation losses. SPE/IADC Drilling Conference, Proceedings, 1, 422–428.
- AlAwad, M. N. J. (2020). A new approach for understanding the mechanism of wellbore strengthening theory. Journal of King Saud University - Engineering Sciences. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.07.015>.
- Alberty, Mark W., Mclean. R. M. (2004). A physical model for stress cages. SPE Annual Technical Conference and Exhibition.
- Alsaba, M. T. (2015). Investigation of lost circulation materials impact on fracture gradient. MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, USA.
- Alshubbar, G. D., Aramco, S., & Nygaard, R. (2018). Curing Losses in Vuggy Carbonate Formations Depositional Environment, Textures and Petrophysics Diagenetic Processes. SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers, 29–31.
- Brandl, A., Bray, W., & Molaei, F. (2011). Curing Lost Circulation Issues and Strengthening Weak Formations with a Sealing Fluid for Improved Zonal Isolation of Wellbores Lab test results. Australian Geothermal Energy Conference 2011, 25–28. <https://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/AGEC/2011/GA20032.pdf>.

Contreras Puerto, O. (2014). Wellbore Strengthening by Means of Nanoparticle-Based Drilling Fluids., University of Calgary, Canada.

Cook, J., Growcock, F., Guo, Q., Hodder, M., & van Oort, E. (2011). Stabilizing the wellbore to prevent lost circulation. 23(4), 26–35. <https://www.researchgate.net/publication/290592459>.

Cook, J., Guo, Q., Way, P., Bailey, L., & Friedheim, J. (2016). The role of filtercake in wellbore strengthening. IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers.

DEA 13. (1985). (Phase I) Final Report. Investigation of Lost Circulation Problems and Apparent Fracture Gradient Reduction Encountered in the Field with Oil-Based Drilling Fluids during Large-Scale Laboratory Fracturing Experiments.

DEA 13. (1988). (Phase II) Final Report. Investigation of Lost Circulation Problems with Oil-Base Drilling Fluids.

Devereux, S. (1999). Drilling for Oil & Gas: A Nontechnical Guide. PennWell Corporation.

Donza H, C. O. (2002). Irassar EF. High-strength concrete with different fine aggregate. Cement and Concrete Research, 32(11), 1755–1761.

Dudley, J., Fehler, D. F., & Zeilinger, S. J. G. P. (2000). Minimizing Lost Circulation Problems with Synthetic Muds. GPRI Project 2000 DC3.

Dupriest, F. E. (2005). Fracture closure stress (FCS) and lost returns practices. SPE/IADC Drilling Conference. Society of Petroleum Engineers.

Fairhurst, C. E., & Hudson, J. A. (1999). Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression. International journal of rock mechanics and mining sciences (1997), 36(3), 279-289.

Feng, Yongcun, and K. E. Gray. (2018). Modeling lost circulation through drilling-induced fractures. Spe Journal, 23(01), 205–223.

Feng, Yongcun, and Kenneth E. Gray. (2016). A fracture-mechanics-based model for wellbore strengthening applications. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 29, 392–400.

Feng, Yongcun. (2016). Fracture Analysis for Lost Circulation and Wellbore Strengthening. The University of Texas at Austin, USA.

Feng, Yongcun, & Gray, K. E. (2017). Review of fundamental studies on lost circulation and wellbore strengthening. Journal of Petroleum Science and Engineering, 152(February), 511–522 .

Feng, Yongcun, Jones, J. F., & Gray, K. E. (2016). A Review on fracture-initiation and -propagation

pressures for lost circulation and wellbore strengthening. *SPE Drilling and Completion*, 31(2), 134–144. <https://doi.org/10.2118/181747-PA>.

Fjaer, E., Holt, R. M., Horsrud, A. M., Raaen, A. M., and Risnes, R. (2008). *Petroleum Related Rock Mechanics (Second)*. Elsevier publishing.

Fuh, G.F, Morita, N., Boyd, P.A., McGoffin, S. J. (1992). A New Approach to Preventing Lost Circulation While Drilling. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, Washington D.C., USA. October 4 – 7.

Ghalambor, A., Salehi, S., Shahri, M. P., & Karimi, M. (2014). Integrated workflow for lost circulation prediction. *SPE International Symposium and Exhibition on Formation Damage Control*, Lafayette, Louisiana, USA., <https://doi.org/doi:https://doi.org/10.2118/168123-MS>.

Guo, Q., Cook, J., Way, P., Ji, L., & Friedheim, J. E. (2014). A comprehensive experimental study on wellbore strengthening. *IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.

He, W., Hayatdavoudi, A., Chen, K., Sawant, K., Zhang, Q., & Zhang, C. (2019). Enhancement of Plastering Effect on Strengthening Wellbore by Optimizing Particle Size Distribution of Wellbore Strengthening Materials. *Journal of Energy Resources Technology*, 141..(۱۲)

Howard, G. C., & Scott Jr, P. P. (1951). An Analysis and the Control of Lost Circulation. *Journal of Petroleum Technology*, 3(6), 171–182. <https://doi.org/doi:https://doi.org/10.2118/951171-G>.

Jeennakorn, M. (2017). The effect of testing conditions on lost circulation materials ' performance in simulated fractures. *MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, USA*.

Kumar, A., Savari, S., Whitfill, D., Jamison, D. (2011). Application of fiber laden pill for controlling lost circulation in natural fractures. *AADE National Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas, USA. April 12-14.

Gambhir, L.M., (2013). *concrete thecnology: theory and practices (fifth edit)*. McGraw Hill Education(India) private limited.

Li, J., Qiu, Z., Zhao, X., Zhong, H., Yang, Y., & Huang, W. (2020). Effect of different parameters on sealing performance of lost circulation process with dynamic fracture aperture testing apparatus. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 193, 107357. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107357>.

Lieberman, M. (2012). *Hydraulic Fracturing Experiments to Investigate Circulation Losses*. *MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, USA*.

Liu, C., & Abousleiman, Y. N. (2018). Multiporosity/multipermeability inclined-wellbore solutions with mudcake effects. *SPE Journal*, 23(5), 1723–1747. <https://doi.org/10.2118/191135-pa>.

Liu, Y., Ma, T., Chen, P., Wu, B., Zhang, X., & Wu, B. (2020). Effects of permeable plugs on wellbore strengthening. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 132, 104416.

<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104416>.

Ma, B., Pu, X., Zhao, Z., Wang, H., & Dong, W. (2019). Laboratory Study on Core Fracturing Simulations for Wellbore Strengthening. *Geofluids*. <https://doi.org/10.1155/2019/7942064>.

Mansour, A. K. A. (2017). Experimental Study and Modeling of Smart Loss Circulation Materials; Advantages and Promises [Louisiana State University]. https://digitalcommons.lsu.edu/gradschool_theses/4316

Messenger, J. U. (1981). *Lost Circulation*. Pennwell publishing Company, Tulsa, Oklahoma.

Mirabbasi, S. M., Ameri, M. J., Biglari, F. R., & Shirzadi, A. (2020). Thermo-poroelastic wellbore strengthening modeling: An analytical approach based on fracture mechanics. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195, 107492. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107492>

Morita, N., Black, A. D., & Guh, G. F. (1990). Theory of Lost Circulation Pressure. Paper SPE 20409, Proceedings of the 65th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers Held in New Orleans, LA, 23-26 September, September, 20409.

Morita, Nobuo, and G.-F. F. (2012). Parametric analysis of wellbore-strengthening methods from basic rock mechanics. *SPE Drilling & Completion*, 27(02), 315–327.

Mostafavi Toroqi, S. V. (2011). Experimental Analysis and Mechanistic Modeling of Wellbore Strengthening. Department of Chemical and Petroleum Engineering, University of Calgary, Canada.

Nasiri, A., Ghaffarkhah, A., Keshavarz Moraveji, M., Gharbanian, A., & Valizadeh, M. (2017). Experimental and field test analysis of different loss control materials for combating lost circulation in bentonite mud. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 44, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2017.04.004>.

Nasirov, S. (2005). *Drilling fluid optimization to mitigate lost circulation*. University of Stavanger, Norway.

Nayberg, T. M. (1987). Laboratory study of lost circulation materials for use in both oil-based and water-based drilling muds. *SPE Drilling Engineering*, 2(03), 229–236.

Paes de Godoi, F. A., Scheid, C. M., Bernardo, L. S., Rosas de Oliveira, B., Borges Filho, M. N., & Calçada, L. A. (2018). Study of the pressure drop and the flow of loss circulation material suspensions in a physical simulator of fractures. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 168, 48–58 .

Rahimi, R., Alsaba, M., & Nygaard, R. (2016). Analysis of analytical fracture models for wellbore strengthening applications: An experimental approach. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 36, 865–874. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.11.022>.

Razavi, S. O. (2016). *Experimental Investigation of the Wellbore Strengthening Phenomenon*. The University of Texas at Austin, USA.

Salehi, S., and R. K. (2016). Integrated experimental and analytical wellbore strengthening solutions by

mud plastering effects. *Journal of Energy Resources Technology*, 138..(۳)

Salehi, S. (2012). Numerical simulations of fracture propagation and sealing: implications for wellbore strengthening [MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, USA]. <http://laurel.iso.missouri.edu/record=b10719057~S5>.

Sanders, Mark W., Steven Young, and J. F. (2008). Development and testing of novel additives for improved wellbore stability and reduced losses. AAE Fluids Conference and Exhibition, Houston, USA.

Savari, Sharath, Kumar, Arunesh, Whitfill, Donald L, Miller, Matthew, Murphy, Robert J, & Jamison, Dale E. (2013). Engineered LCM design yields novel activating material for potential application in severe lost circulation scenarios. Paper Presented at the North Africa Technical Conference and Exhibition.

Shahri, M. P. (2015). Quantification of wellbore strengthening mechanisms: comprehensive parametric analysis. SPE Annual Technical Conference and Exhibition.

Turner, J. P., Healy, D., Hillis, R. R., & Welch, M. J. (2017). Geomechanics and geology: introduction. Geological Society, London, Special Publications, 458(1), 1-5.

Van Oort, E., and Vargo, R. F. (2008). Improving formation-strength tests and their interpretation. *SPE Drill. Complet.*, 23(03), 284–294.

Van Oort, E., Friedheim, J., Pierce, T., and Lee, J. (2011). Avoiding Losses in Depleted and Weak Zones by Constantly Strengthening Wellbores. *SPE Drilling & Completion*, 26 (4), 519–530.

Wang, H. (2007). Near Wellbore Stress Analysis for Wellbore Strengthening (Issue May). Department of Chemical and Petroleum Engineering, University of Wyoming, USA.

Yang, M., Li, M. C., Wu, Q., Growcock, F. B., & Chen, Y. (2020). Experimental study of the impact of filter cakes on the evaluation of LCMs for improved lost circulation preventive treatments. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 191, 107152. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107152>.

Yang, Y., Yuan, B., & Wang, Y. (2018). Updated methodology for evaluating lost circulation control of cement slurry for double lost channels. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171, 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.07.033>.

Zhong, R., Miska, S., Yu, M., Meng, M., Ozbayoglu, E., & Takach, N. (2019). Experimental investigation of fracture-based wellbore strengthening using a large-scale true triaxial cell. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 178, 691–699. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.03.081>.

Zoback, M. D. (2010). *Reservoir Geomechanics*. Cambridge University Press.