



ارائه‌ی یک مدل تحلیلی پوروالاستیک جهت ارزیابی عملکرد ذرات LCM در مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه

سید مرتضی میرعباسی^۱، محمدجواد عامری^{۲*}، فریدرضا بیگلری^۳، اشکان شیرزادی^۴

۱. دانشجوی دکتری مهندسی نفت، دانشکده نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲. دانشیار دانشکده مهندسی نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳. دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۴. کارشناس ارشد مهندسی نفت، دانشکده نفت دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۶/۰۲ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۱۵
شناسه دیجیتال (DOI): 10.22107/JPG.2020.195093.1102

چکیده

یکی از مهم‌ترین مشکلات در حین عملیات، هرزروی سیال حفاری است که منجر به اتلاف هزینه و زمان مفید عملیات می‌گردد. تجربیات میدانی و مطالعات پژوهشی نشان می‌دهد که «مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه (WBS)» رویکردی مؤثر برای کنترل و یا درمان این چالش است. در واقع انسداد ترک‌های موجود در دیواره‌ی چاه با استفاده از ذرات کنترل‌کننده‌ی هرزروی (LCM)، توزیع تنش و فشار سیال را بر دیواره‌ی چاه و سطوح ترک، تغییر داده و احتمال هرزروی را کاهش می‌دهد. در این مقاله تلاش شده است تا با به‌کارگیری مفاهیم مکانیک شکست، یک مدل تحلیلی پوروالاستیک ارائه شود و عوامل مؤثر بر تنش‌های حول دیواره‌ی چاه و نوک ترک، ارزیابی گردد. نتایج به دست آمده از آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مختلف نشان می‌دهد که پارامترهای ژئومکانیکی (ناهمسانگرادی تنش‌های برجها)، پارامترهای هندسی (محل تشکیل پلاگ LCM، طول شکاف) و پارامترهای پوروالاستیک سازند (فشار مخزن و ضریب بیوت)، اثر قابل ملاحظه‌ای بر میزان موفقیت WBS دارند. بر طبق این نتایج، مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه، در شرایط تنش همسانگرد، سازند کم‌فشارتر و طول شکاف کمتر، مؤثرتر است؛ چراکه تمرکز تنش در نوک ترک، کمتر بوده و احتمال رشد آن کاهش می‌یابد. همچنین هرچه محل تشکیل پلاگ LCM به دهانه‌ی شکاف نزدیک‌تر باشد، مقاوم‌سازی بهتر انجام می‌شود.

واژگان کلیدی

مطالعه‌ی تحلیلی، هرزروی
سیال حفاری، فاکتور شدت
تنش، آنالیز حساسیت،
انسداد شکاف

۱. پیشگفتار

توسط گرادپان شکست سازند کنترل می‌شود و همواره باید کمتر از آن باشد. اگر وزن سیال حفاری، بیشتر از فشار شکست سازند شود، باعث ایجاد ترک در دیواره‌ی چاه و شروع هرزروی سیال می‌گردد. در واقع باز شدن مجدد شکاف‌های طبیعی و یا ایجاد شکاف‌های القایی جدید، دلیل اصلی هرزروی سیال حفاری به شمار می‌رود که یکی از مهم‌ترین مشکلات حین عملیات حفاری به شمار می‌رود و طبق ارزیابی‌های API، در برخی مناطق ۴۰ تا ۸۰ درصد چاه‌ها، با این چالش روبه‌رو هستند (Sweatman, Kessler & Hillier, 1997). از این رو جهت مقابله با این مشکل،

در حین عملیات حفاری، همواره تلاش می‌شود که فشارناشی از سیال درون چاه در یک محدوده‌ی مشخص قرار بگیرد. به این محدوده «پنجره‌ی ایمن وزن گل» می‌گویند که حدود بالا و پایین وزن سیال را مشخص می‌کند. حد پایین وزن سیال همواره باید از دو مقدار بالاتر باشد: فشار منفذی سازند و فشار ریزش دیواره (Collapse Pressure). چنانچه فشار هیدرواستاتیک ناشی از ستون سیال کمتر از این دو مقدار باشد به ترتیب، احتمال فوران چاه و یا ناپایداری دیواره‌ی چاه افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، حد بالای وزن سیال حفاری

و تکنولوژی‌های جدید، از وقوع هرزروی پیشگیری شود. کاهش وزن سیال حفاری برای کم کردن فشار ستون هیدرواستاتیکی، به کارگیری تکنولوژی‌های نوین حفاری و نهایتاً استفاده از مواد کنترل‌کننده‌ی هرزروی^۵ (LCM) برای تشکیل کیک گل بر روی دیواره‌ی چاه، مثال‌هایی از این دست می‌باشند.

• **مقاوم‌سازی با رویکرد درمانی:** در این روش که بر پایه‌ی حضور شکاف است، سعی می‌شود تا با استفاده از ذرات LCM، شکاف‌های موجود در دیواره‌ی چاه پوشانده شده و یا دهانه‌ی آن‌ها مسدود شود. در نتیجه از رشد شکاف جلوگیری شده و فشار قابل تحمل برای سازند، افزایش می‌یابد. برای توصیف این فرآیند، مدل‌های فیزیکی مختلفی ارائه شده است که در میان آن‌ها، مدل *Stress Cage* و *Fracture Propagation Resistance (FPR)* بیش از سایر مدل‌ها مورد بحث و مطالعه قرار گرفته‌اند. در مدل *Stress Cage*، انسداد دهانه‌ی شکاف و افزایش تنش مماسی تراکمی در اطراف دیواره‌ی چاه، منجر به بهبود مقاومت شکاف در برابر باز شدن می‌گردد (Alberty & McLean, 2004). اما بر خلاف این مدل، در مدل *FPR*، ایجاد کیک گل درون شکاف، علی‌الخصوص در نزدیکی نوک شکاف برای ایزوله کردن شکاف و قطع ارتباط فشاری آن با سیال درون چاه، دلیل عدم رشد ترک است (Van Oort, 2011). شکل ۱ تصویری از این دو مدل را به نمایش گذاشته است.

مطالعات و تحقیقات گسترده‌ای انجام شده است تا بتوان با شناخت پارامترهای مؤثر، نرخ هرزروی را در سازندهای شکاف‌دار و نفوذپذیر کاهش داد و یا از ایجاد شکاف القایی در دیواره‌ی چاه جلوگیری کرد (Al-Hameedi, Alkinani, 2018; Ghalambor, Salehi, Norman Shahri & Karimi, 2014; Growcock, Kaageson-Loe, Friedheim, Sanders & Bruton, 2009).

«مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه» یا به اصطلاح «*Wellbore Strengthening (WBS)*» به روش‌هایی اطلاق می‌شود که بتوان به کمک آن، بیشترین فشار قابل تحمل برای دیواره‌ی چاه را به طور مصنوعی افزایش داد و هرزروی سیال را کنترل نمود. در طی این فرآیند، از طریق انسداد شکاف^۱ و یا پوشاندن سطوح شکاف‌ها^۲ در دیواره‌ی چاه، تلاش می‌شود تا با تغییر توزیع تنش در حول دیواره‌ی چاه و همچنین تغییر توزیع فشار سیال درون شکاف، بتوان فشار شکست سازند و قابلیت تحمل آن را افزایش داد. اگرچه روش‌های مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه، مکانیزم‌های متفاوتی دارند اما هدف نهایی آن‌ها یکسان بوده و توقف رشد ترک و هرزروی سیال می‌باشد (Benyeogor et al., 2016; Cook, Growcock, Guo, Hodder, & van Oort, 2011; Feng & Gray, 2017b; G. Shen & Shen, 2016; X. Shen, 2016). در صنعت حفاری، با دو رویکرد متفاوت می‌توان به پدیده‌ی مقاوم‌سازی دیواره چاه نگریست: مقاوم‌سازی با رویکرد پیشگیرانه^۳ و مقاوم‌سازی با رویکرد درمانی^۴ (Feng & Gray, 2017b; Shahri, 2015).

• **مقاوم‌سازی با رویکرد پیشگیرانه:** در این روش غالباً فرض می‌شود که شکاف وجود ندارد و در آن تلاش می‌شود تا با تنظیم خواص سیال حفاری و استفاده از مواد

¹ Fracture Plugging (Bridging)

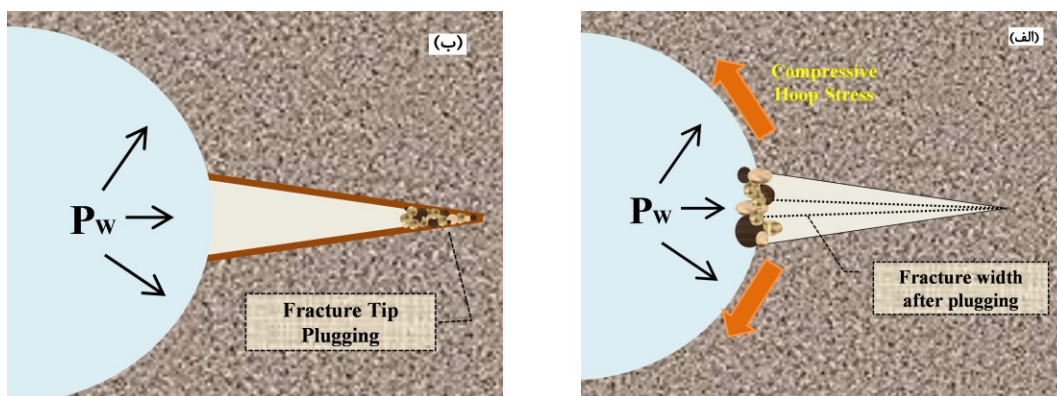
² Fracture Sealing

³ Preventive WBS

⁴ Remedial WBS

⁵ Lost Circulation Material (LCM)

ارائه‌ی یک مدل تحلیلی پوروالاستیک جهت ارزیابی عملکرد ذرات LCM در مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه



شکل ۱. الف) مدل Stress Cage: انسداد دهانه‌ی شکاف و افزایش تنش مماسی در دیواره‌ی چاه،
ب) مدل FPR: انسداد نوک ترک و قطع ارتباط فشاری

2015)، تلاش کردند تا جنبه‌های مغفول کار قبلی را تکمیل کنند و توزیع تنش و تغییرات عرض شکاف را برای دو شکاف متقارن از پیش تعریف شده با طول ثابت به دست آورند. با استفاده از مدل ناحیه‌ی چسبنده (CZM)، صالحی (۲۰۱۲) (Salehi, 2012) و فنگ (۲۰۱۶) (Feng, 2016; Feng & Gray, 2017a) تلاش کردند تا با در نظر گرفتن رشد ترک، پدیده‌ی مقاوم‌سازی دیواره چاه را در شرایط واقعی‌تر مدل‌سازی کنند.

در مقایسه با مقالات عددی، تعداد مطالعات تحلیلی در حوزه‌ی هرزروی سیال و مقاوم‌سازی دیواره، بسیار اندک است. ایتو و همکاران (۲۰۰۱)، بر اساس مفاهیم مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM)، یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی میزان افزایش فشار شکست پس از انسداد ترک ارائه کردند. این مدل تنها برای ترک‌های با طول زیاد کاربرد داشت؛ چراکه وجود دیواره‌ی چاه و تمرکز تنش در اطراف دیواره را نادیده گرفته بود (Ito, Zoback, & Peska, 2001).

گوآ (۲۰۱۱)، برای مسئله‌ای با دو شکاف متقارن در دیواره‌ی چاه، رابطه‌ای ارائه داد تا بتواند تأثیر طول شکاف و ناهمسانگردی تنش‌های درجا را بر میزان باز شدگی شکاف، ارزیابی کند. البته این مدل در مورد فشار شکست سازند و یا میزان باز شدگی شکاف پس از مقاوم‌سازی اطلاعاتی ارائه نداد (Guo et al., 2011). با در نظر گرفتن شرایط الاستیک خطی برای شکاف و با استفاده از چند جمله‌ای‌های گاوس-چبیشف

۲. مروری بر مطالعات پیشین

با توجه به اهمیت موضوع هرزروی در صنعت حفاری، محققین همواره در تلاش‌اند تا بتوانند با کمک روش‌های مختلف، همچون تست‌های میدانی (Ivan, Bruton & Bloys, 2003)، فعالیت‌های آزمایشگاهی (Alsaba, Nygaard, Saasen, & Nes, 2016; Mostafavi Toroqi, 2012; Y. Feng & K. E. Gray, 2016) مدل‌سازی‌های تحلیلی (Mehrabian, Jamison, & Teodorescu, 2015; Y. Feng & K. Gray, 2016) و شبیه‌سازی‌های عددی (Salehi & Nygaard, 2012)، پارامترهای مؤثر در وقوع هرزروی و روش‌های جلوگیری و کنترل آن را شناسایی کنند. آلبرتی و مک‌لین در سال ۲۰۰۴ فرآیند مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه را به کمک روش المان محدود دو بعدی (2D FEM) برای یک محیط الاستیک در شرایط تنش‌های برجای همسانگرد شبیه‌سازی کردند و توانستند عرض شکاف و توزیع میدان تنش مماسی اطراف دیواره‌ی چاه را بررسی کنند. اگرچه این مدل، فرضیات ساده‌شونده‌ی بسیار زیادی داشت، اما سرآغازی برای ورود دیگران به این موضوع بود (Alberty & McLean, 2004). ونگ و همکاران (۲۰۰۷) با ارائه‌ی یک مدل الاستیک دو بعدی المان مرزی (2D BEM) (Hong, Wang, Towler, & Soliman, 2007)، گوآ و همکاران (۲۰۱۱) با ارائه‌ی یک مدل الاستیک دو بعدی المان محدود (2D FEM) (Guo, Feng, & Jin, 2011) و فنگ و گری (۲۰۱۵) با ارائه‌ی یک مدل پورو-الاستیک المان محدود دو بعدی (Feng, Arlanoglu, Podnos, Becker, & Gray, 2015)

که تمامی مدل‌های تحلیلی در این حوزه، سنگ را به عنوان یک ماده‌ی الاستیک در نظر می‌گیرند و از تغییرات فشار منفذی در مدل صرف‌نظر می‌کنند (Feng & Gray, 2017b). از این رو، هدف از این مقاله، ارائه‌ی یک مدل تحلیلی پوروالاستیک برای به دست آوردن فاکتور شدت تنش در نوک ترک است، تا بتوان تأثیر انسداد ترک در مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه را تحت شرایط پوروالاستیک بررسی کرد. بدین منظور با در نظر گرفتن مدل تحلیلی فنگ به عنوان مدل پایه در این مطالعه و افزودن تنش‌های حاصل از تغییرات فشار منفذی به آن، رابطه‌ی نهایی ارائه می‌گردد. سپس، تأثیر پارامترهای اساسی سنگ و سیال، بر روی پارامتر هدف (فاکتور شدت تنش)، بررسی می‌شود. در ادامه شرح دقیق‌تری از مدل ارائه شده و همچنین نتایج آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مختلف، ارائه خواهد شد.

۳. مدل‌سازی تحلیلی

همان‌طور که در قسمت قبل به آن اشاره شد، انسداد شکاف به کمک ذرات LCM ، به عنوان یکی از روش‌های مؤثر در کنترل و درمان هرزروی، می‌تواند بر عرض ترک و تنش‌های اطراف چاه اثر بگذارد. در این مقاله، جهت ارزیابی عملکرد فرآیند مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه، فاکتور شدت تنش (SIF)، به عنوان پارامتر هدف در نظر گرفته شده و تأثیر سایر پارامترها بر مقدار نهایی SIF ، مورد مطالعه قرار گرفته است. فاکتور شدت تنش، معرف مقدار تنش در نوک ترک بوده و در محیط‌های الاستیک، خطی و همگن به عنوان معیار شکست مواد تُرد بکار می‌رود. این پارامتر را با K نیز نمایش می‌دهند و بزرگی آن به هندسه، اندازه و محل ترک و همچنین نحوه‌ی توزیع بار بستگی دارد. با در نظر گرفتن مود I حالت شکست^۶، می‌توان بیان کرد که شروع ترک زمانی اتفاق می‌افتد که فاکتور شدت تنش در نوک ترک، به مقدار بحرانی خود، یعنی K_{IC} برسد. پارامتر K_{IC} ضریب چقرمگی^۷ ماده نام دارد که از خواص ذاتی آن است و بیانگر مقاومت سنگ در برابر رشد ترک می‌باشد. در ادامه ضمن تشریح ابعاد و فرضیات مسئله، نحوه‌ی رسیدن به مدل تحلیلی نهایی ارائه شده است.

و توابع ایری^۸، شهری و همکاران (۲۰۱۴) یک مدل نیمه تحلیلی، جهت محاسبه‌ی عرض ترک و شاخص شدت تنش^۹ (SIF) ارائه دادند. اگرچه این مدل ناهمسانگردی تنش‌های درجا و اثر شیب و جهت چاه را لحاظ می‌کرد اما همچون مدل‌های گذشته، افت فشار در طول شکاف رانادیده می‌گرفت (Shahri, Oar, Safari, Karimi, & Mutlu, 2014;). با روشی مشابه، محرابیان (۲۰۱۵) یک راه‌حل نیمه تحلیلی برای بررسی رفتار سازند در اثر برهمکنش مکانیکی چند شکاف ارائه داد. وی معتقد بود که در نظر گرفتن دو شکاف متقارن در دیواره‌ی چاه، یک فرض ساده شونده و غیرواقعی است. نتایج این مدل الاستیک نشان داد که پروفایل عرض شکافها، در این حالت به شدت تحت تأثیر تعداد و مکان سایر شکافهاست (Mehrabian et al., 2015).

فنگ و گری (۲۰۱۶) با ارائه‌ی یک مدل تحلیلی الاستیک، فشار شکست سازند را قبل و بعد از انسداد شکاف محاسبه کردند. در این مدل، با استفاده از اصل برهم‌نهی و ترکیب معادلات کرچ و مکانیک شکست الاستیک خطی ($LEFM$)، یک رابطه‌ی فرم بسته ارائه شد تا بتوانند رفتار دو ترک متقارن با طول کوتاه را در شرایط مختلف ژئومکانیکی، بررسی کنند. نتایج نشان می‌داد که محل قرارگیری ذرات LCM ناهمسانگردی تنش‌های برجا و همچنین فشار منفذی سازند، بر میزان تأثیر WBS مؤثر است و هرچه ذرات LCM به دهانه‌ی ترک، نزدیک‌تر باشد، اثر آن بیشتر می‌شود (Feng & K. E. Gray, 2016).

اگرچه مدل‌سازی عددی به دلیل تعداد کمتر فرضیات ساده شونده، می‌تواند تحلیل دقیق‌تری از شرایط عملیاتی ارائه کند، اما اجرای آن نسبت به روش‌های تحلیلی، دشوارتر و پرهزینه‌تر است. از این رو، ارائه‌ی یک مدل تحلیلی برای توصیف پدیده‌های مختلف، به عنوان یک روش ساده‌تر و سریع‌تر همواره به عنوان یک گزینه‌ی مهم و مؤثر، پیش روی محققین می‌باشد. مقاله مروری فنگ که به ارزیابی دقیق تمامی مطالعات انجام شده در حوزه‌ی هرزروی سیال و مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه پرداخته است، به این نکته اشاره دارد

⁶ Airy Function

⁷ Stress Intensity Factor

⁸ Opening Mode

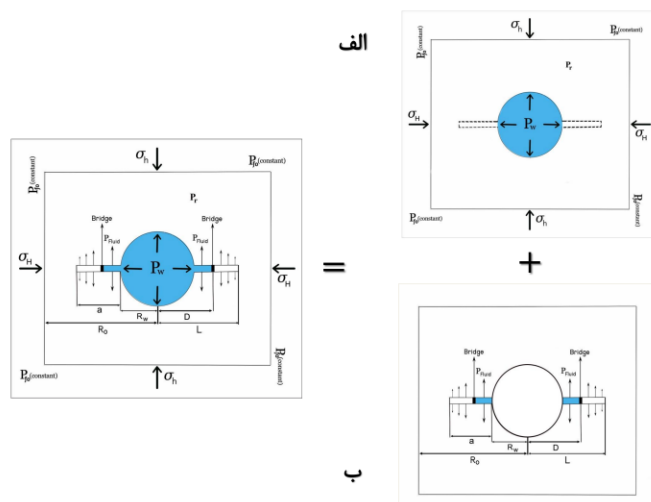
⁹ Fracture Toughness

ارائه‌ی یک مدل تحلیلی پوروالاستیک جهت ارزیابی عملکرد ذرات LCM در مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه

۱.۳ توصیف مدل

برابر با فشار چاه است و در قسمت پشت پلاگ تانوک ترک، برابر فشار سیال منفذی است؛ چراکه فشار سیال درون شکاف، به داخل سازند تخلیه شده و ارتباط فشاری با سیال درون چاه قطع می‌شود. با توجه به طول کوتاه شکاف، از تغییرات فشار در طول ترک صرف نظر شده است. مطابق شکل ۲، به منظور ساده‌سازی مسئله و دستیابی به راه‌حل تحلیلی نهایی، با استفاده از اصل برهم‌نهی، این مسئله به دو حالت ساده‌تر تبدیل شده است: الف) اعمال تنش‌های برجا، فشار چاه و فشار منفذی بر یک چاه بدون ترک؛ ب) در نظر گرفتن چاه با دو ترک متقارن و اعمال فشار سیال بر سطوح ترک.

شکل ۲، توصیفی از مسئله و شرایط مرزی حاکم بر مدل را نشان می‌دهد. این شکل مقطعی از یک چاه عمودی، در شرایط کرنش-صفحه‌ای است که دارای دو شکاف متقارن، با طول کوتاه و عمود بر جهت تنش افقی مینیمم می‌باشد. در این مدل، فشار منفذی سازند P_r در نظر گرفته شده و فرض می‌شود فشار ناشی از سیال حفاری، P_w ، به دیواره‌ی چاه اعمال می‌گردد. قبل از انسداد شکاف، فشار در داخل شکاف، برابر با فشار چاه می‌باشد. با فرض قرار گرفتن پلاگ ایده‌آل درون شکاف، فشار در قسمت جلوی پلاگ تا دهانه‌ی شکاف،



شکل ۲. ساده‌سازی مدل کامل بر اساس اصل برهم‌نهی؛

الف: اعمال تنش‌های برجا، فشار چاه و فشار منفذی در یک چاه بدون ترک،

ب: در نظر گرفتن چاه با دو ترک متقارن و اعمال فشار سیال بر سطوح ترک

۱.۲.۳ تنش‌های اطراف دیواره‌ی چاه

تنش‌های اطراف دیواره‌ی چاه سالم بدون ترک، برای یک محیط الاستیک و همگن، تابعی از فاصله‌ی شعاعی از مرکز چاه می‌باشد و از روابط کرچ به دست می‌آید (Fjar, Holt, & Raaen, Risnes, & Horsrud, 2008):

۲.۳ معادلات حاکم بر مسئله

جهت ارائه‌ی مدل تحلیلی پوروالاستیک، از مدل ارائه شده توسط فنگ (Y. Feng & K. E. Gray, 2016) به عنوان مدل پایه استفاده می‌شود. همان‌طور که در قسمت قبل نیز به آن اشاره شد، این مدل برای محیط الاستیک ارائه شده است. از این رو، پس از به دست آوردن تنش‌های القایی ناشی از تغییرات فشار منفذی و همچنین استفاده از مفاهیم مکانیک شکست الاستیک خطی، می‌توان رابطه‌ی نهایی را برای اندازه‌گیری فاکتور شدت تنش در محیط پوروالاستیک ارائه داد.

$$\sigma_{rr} = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R_w^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3\frac{R_w^4}{r^4} - 4\frac{R_w^2}{r^2}\right) \cos 2\theta + P_w \frac{R_w^2}{r^2} \quad (1-f)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R_w^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3\frac{R_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - P_w \frac{R_w^2}{r^2} \quad (1-b)$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_v - 2\nu(\sigma_H - \sigma_h) \frac{R_w^2}{r^2} \cos 2\theta \quad (1-c)$$

Gray, 2017b; Y. Feng & K. E. Gray, 2016; Salehi, 2012)، از این پس، تمرکز معادلات بر $\sigma_{\theta\theta}$ خواهد بود.

۲.۲.۳ تنش‌های القایی اطراف دیواره‌ی چاه

فیلتر نشان داد که تنش‌های القایی مماسی ناشی از تغییرات فشار منفذی را می‌توان از رابطه‌ی (۲) به دست آورد (Fjar et al., 2008; Rezagholilou, Vialle, & Madadi, 2017).

که در آن σ_{rr} تنش شعاعی، $\sigma_{\theta\theta}$ تنش مماسی، σ_{zz} تنش محوری، σ_h و σ_H به ترتیب تنش‌های افقی مینیمم و ماکزیمم، r فاصله‌ی شعاعی از مرکز چاه، R_w شعاع چاه، P_w فشار چاه و θ زاویه از محور تنش افقی ماکزیمم است. با توجه به اینکه تنش مماسی اعمال شده بر دیواره‌ی چاه و سطوح ترک، معیاری برای ارزیابی عملکرد WBS است (Feng &

$$\sigma_{\theta\theta} = -\frac{2\eta}{r^2} \left(\int_{R_w}^r r' \Delta P_f(r') dr' - r^2 \Delta P_f(r) + \frac{r^2 + R_w^2}{R_o^2 - R_w^2} \int_{R_w}^{R_o} r' \Delta P_f(r') dr' \right), \quad (2)$$

$$\Delta P_f(r) = P_f(r) - P_{fo},$$

$$\eta = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \alpha$$

در نظر گرفتن جریان پایا و شعاعی، می‌توان فشار سیال در فاصله r از مرکز چاه را از رابطه‌ی (۳) به دست آورد.

که در آن R_o شعاع مخزن و P_{fo} فشار سیال در مرکز مخزن است. به علاوه η ضریب پوروالاستیک تنش، α ضریب بیوت و ν ضریب پواسون می‌باشد. با استفاده از رابطه‌ی دارسی و

$$P_f = P_{fo} + \frac{P_{fo} - P_w}{\ln \frac{R_o}{R_w}} \ln \frac{r}{R_o} \quad (3)$$

با قرار دادن این رابطه در معادله‌ی (۲)، رابطه‌ی تنش کلی حول چاه ناشی از تنش‌های برجا و فشار منفذی به دست می‌آید:

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R_w^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3\frac{R_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - P_w \frac{R_w^2}{r^2} - \frac{2\eta}{r^2} \left(\int_{R_w}^r r' \Delta P_f(r') dr' - r^2 \Delta P_f(r) + \frac{r^2 + R_w^2}{R_o^2 - R_w^2} \int_{R_w}^{R_o} r' \Delta P_f(r') dr' \right) \quad (4)$$

ارائه‌ی یک مدل تحلیلی پوروالاستیک جهت ارزیابی عملکرد ذرات LCM در مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه

۳.۲.۳ تنش اعمالی بر سطوح ترک

تنش مؤثر اعمال شده بر سطوح ترک (P_{Net})، طبق رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود (Y. Feng & K. E. Gray, 2016):

$$P_{Net} = P_{fluid} - \sigma_{\theta\theta} \quad (۵)$$

این معادله بیان می‌کند که تنش مؤثر بر سطوح ترک برابر با اختلاف فشار سیال در داخل ترک (P_{fluid}) و تنش مماسی عمود بر سطوح ترک ($\sigma_{\theta\theta}$) است. با توجه به طول کوتاه شکاف، می‌توان فرض کرد که تنش مماسی $\sigma_{\theta\theta}$ در راستای جهت ترک، از معادله‌ی ۴ به دست می‌آید. از سوی دیگر، با صرف نظر از تغییرات فشار داخل ترک، P_{fluid} از دهانه‌ی شکاف تا محل پلاگ برابر با فشار چاه (P_w) و از محل پلاگ تا نوک ترک برابر با فشار منفذی سازند (P_p) است. لازم به ذکر است که با توجه به تغییرات فشار منفذی سازند نسبت به شعاع چاه و فشار چاه، این پارامتر با میانگین‌گیری از فشار منفذی در ناحیه‌ی پشت پلاگ با استفاده از رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید. در نتیجه، معادله‌ی (۵) را می‌توان به دو قسمت تقسیم کرد:

• تنش مؤثر در ناحیه‌ی جلوی پلاگ (P_{wet})

$$P(r)_{wet} = P_w - \sigma_{\theta\theta} \quad (۶)$$

• تنش مؤثر در ناحیه‌ی پشت پلاگ (P_{Dry})

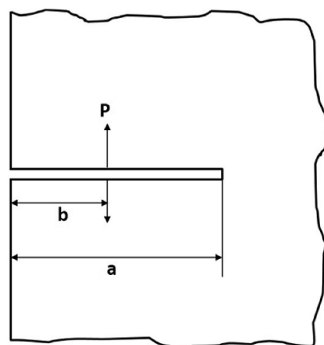
$$P(r)_{Dry} = P_p - \sigma_{\theta\theta} \quad (۷)$$

۴.۲.۳ مدل پوروالاستیک برای محاسبه‌ی فاکتور شدت تنش متناسب با هندسه‌ی مسئله، نحوه‌ی بارگذاری، ابعاد و ویژگی‌های ترک، روابط تحلیلی مختلفی برای محاسبه‌ی فاکتور شدت تنش (SIF)، ارائه شده است (Tada, Paris, & Irwin, 1973). شکل ۳ اعمال بار نقطه‌ای، عمود بر سطوح ترک در یک محیط الاستیک را نشان می‌دهد. رابطه‌ی ارائه شده برای محاسبه‌ی تقریبی SIF در این مسئله، بر اساس مفاهیم مکانیک شکست الاستیک خطی ($LEFM$)، به فرم زیر است (Tada et al., 1973):

$$K_I = \frac{2P}{\sqrt{\pi a}} \cdot F\left(\frac{b}{a}\right), \quad (۸)$$

$$F\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{1.3 - 0.3\left(\frac{b}{a}\right)^{\frac{5}{4}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}}$$

که در آن K_I فاکتور شدت تنش ترک، P بزرگی بار نقطه‌ای، a طول ترک، b فاصله‌ی دهانه‌ی ترک تا محل اعمال نیرو و $F(b/a)$ تابعی از هندسه‌ی مسئله است.



شکل ۳. اعمال بار نقطه‌ای بر سطوح ترک در یک محیط الاستیک (Tada et al., 1973)

(۷) به جای بار نقطه‌ای P در رابطه‌ی (۸)، یک رابطه‌ی انتگرالی برای K_I به دست می‌آید:

به منظور شبیه‌سازی فرآیند مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه و محاسبه SIF در حضور ذرات LCM، با در نظر گرفتن بار گسترده بر روی سطوح ترک و قرار دادن عبارت‌های (۶) و

$$K_I = \int_{R_w}^D \frac{2P_{wet}}{\sqrt{\pi a}} F\left(\frac{b}{a}\right) dr + \int_D^L \frac{2P_{dry}}{\sqrt{\pi a}} F\left(\frac{b}{a}\right) dr, \quad (9)$$

ساده‌سازی‌های ریاضی، تابع انتگرالی فاکتور شدت تنش در شرایط پوروالاستیک برای مسئله‌ی مقاومت‌سازی دیواره‌ی چاه، به دست می‌آید:

که در آن L فاصله‌ی شعاعی از نوک ترک تا مرکز چاه، D فاصله محل پلاگ تا مرکز چاه و r فاصله‌ی یک نقطه‌ی مشخص از ترک تا مرکز چاه است. با وارد کردن ترم‌های P_{wet} و P_{dry} به معادله‌ی بالا و انجام حجم‌زادی محاسبات و

$$K_I = A \cdot \left(\int_{R_w}^D B \cdot C \cdot (X_1 + X_2 + X_3) dr - \int_D^L B \cdot C \cdot (Y_1 - X_2 - X_3) dr \right) \quad (10)$$

X_1 ، Y_1 و X_2 ترم‌های پوروالاستیک می‌باشند که اثرات ناشی از تغییرات فشار منفذی را در معادله اعمال می‌کنند.

که در آن A ، B و C ترم‌های هندسی می‌باشند و به شعاع چاه، شعاع مخزن و طول شکاف وابسته هستند. از سوی دیگر،

$$A = \frac{1}{\ln\left(\frac{R_o}{R_w}\right) \cdot (-a^{\frac{3}{2}})}$$

$$B = \frac{1.467}{\sqrt{\frac{(-R_w + a + r) \cdot (R_w + a - r)}{a^2}} r^4}$$

$$C = (0.23(R_w - r) \cdot \left(\frac{r - R_w}{a}\right)^{\frac{1}{4}} + a)$$

$$X_1 = -r^4 \left[\ln\left(\frac{r}{R_o}\right) + 0.5 \right] \cdot (P_w - P_{fo}) \eta + (P_w - \sigma_h) \ln\left(\frac{R_o}{R_w}\right)$$

$$Y_1 = r^4 \left[\ln\left(\frac{r}{R_o}\right) + 0.5 \right] \cdot (P_p - P_{fo}) \eta + (P_p - \sigma_h) \ln\left(\frac{R_o}{R_w}\right)$$

$$X_2 = r^2 R_w^2 \left[\left(0.5 - \ln\left(\frac{R_w}{R_o}\right)\right) \eta (P_w - P_{fo}) + (0.5(\sigma_H + \sigma_h) - P_w) \ln\left(\frac{R_o}{R_w}\right) \right]$$

$$X_3 = -1.5(\sigma_H - \sigma_h) R_w^4 \ln\left(\frac{R_o}{R_w}\right)$$

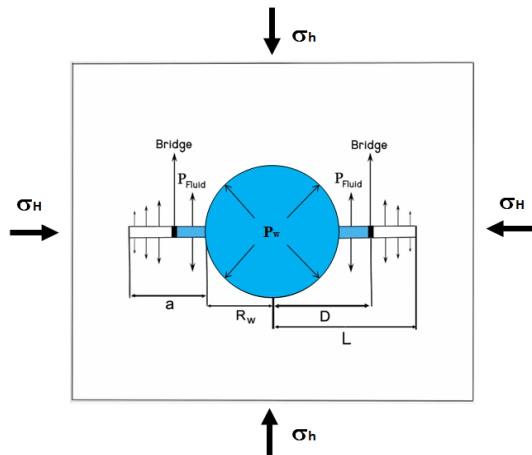
(11)

ضریب پوروالاستیک (η) صفر در نظر گرفته شده و نتایج K_I مدل‌های مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شوند. این روش، توسط سایر محققین نیز به کار گرفته شده است (Y. Feng & K. Gray, 2016; Z. Wang, Yang, & Chen, 2019).

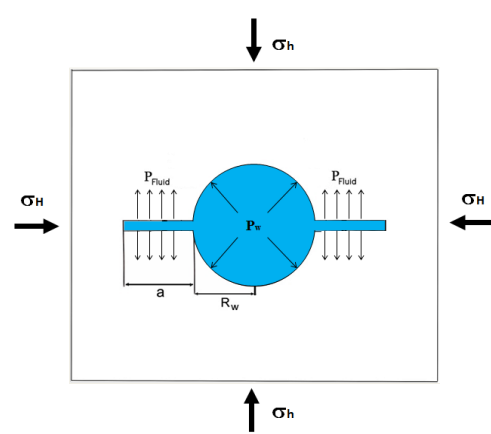
۳.۳ اعتبارسنجی مدل

به منظور ارزیابی صحت مدل ارائه شده، از مدل‌های تحلیلی پیشین استفاده شده است. با توجه به اینکه مدل‌های پیشین برای محیط الاستیک معتبر می‌باشند، در مدل ارائه شده،

ارائه‌ی یک مدل تحلیلی پوروالاستیک جهت ارزیابی عملکرد ذرات LCM در مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه



شکل ۵. مدل الاستیک فنگ برای توصیف مسئله WBS (Y. Feng & K. E. Gray, 2016)



شکل ۴. مدل الاستیک تادا (Tada et al., 1973)

متقارن در دیواره‌ی چاه در راستای تنش افقی ماکزیمم وجود دارد. با فرض فشار یکنواخت درون ترک، SIF از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

• اعتبارسنجی بر اساس مدل تحلیلی $Tada$ جهت محاسبه‌ی فاکتور شدت تنش در یک مدل الاستیک با دو شکاف متقارن در اطراف چاه، تادا در سال ۱۹۸۵ رابطه‌ی (۱۲) را ارائه داد. مطابق شکل ۴ در این مسئله، دو شکاف

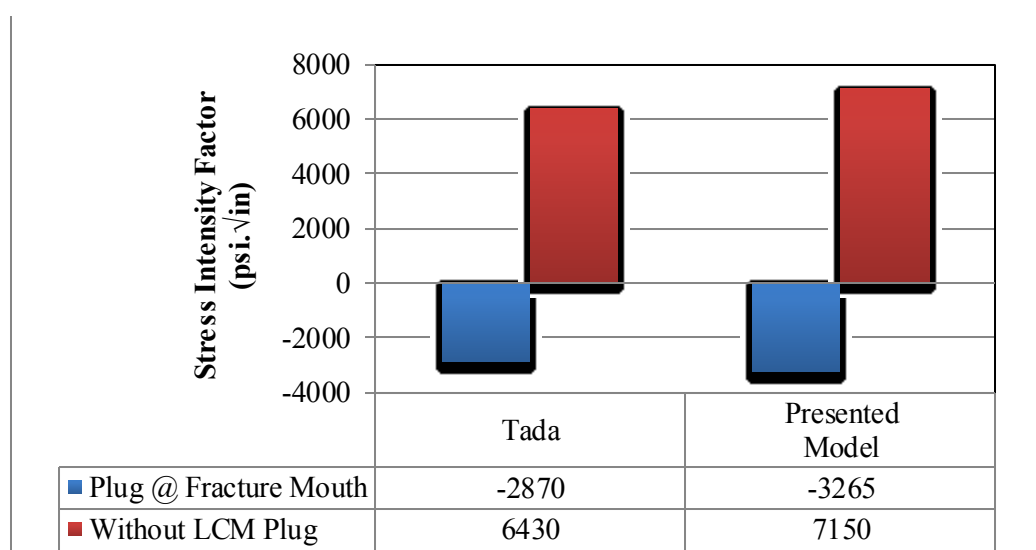
$$\begin{aligned}
 K_1 &= \sigma_h \sqrt{\pi a} F_{\lambda_1}(S_0) + P_w \sqrt{\pi a} F_{\lambda_2}(S_0) \\
 F_{\lambda_1}(S_0) &= (1 - \lambda_1) M(S_0) + \lambda_1 N(S_0) \\
 F_{\lambda_2}(S_0) &= (1 - \lambda_2) P(S_0) + \lambda_2 N(S_0) \\
 M(S_0) &= 0.5(3 - S_0)[1 + 1.243(1 - S_0)^3] \\
 N(S_0) &= 1 + (1 - S_0)[0.5 + 0.743(1 - S_0)^2] \\
 P(S_0) &= (1 - S_0)[0.637 + 0.485(1 - S_0)^2 + 0.4S_0^2(1 - S_0)] \\
 S_0 &= \frac{a}{R_w + a} \\
 \lambda_1 &= \frac{\sigma_H}{\sigma_h} \\
 \lambda_2 &= \frac{P_{frac}}{P_w}
 \end{aligned} \tag{12}$$

شده در این مقاله، به دست آمده و با هم مقایسه شده است. شکل ۶ تطابق قابل قبولی را بین نتایج این دو مدل نشان می‌دهد. طبق این نتایج، درصد خطا برای دو حالت مختلف (با و بدون انسداد ترک)، کمتر از ۱۵٪ می‌باشد.

که در آن F_{λ_1} و F_{λ_2} تابعی از هندسه‌ی مدل و بارهای عملی بر چاه و ترک می‌باشند. همچنین λ_1 و λ_2 به ترتیب نسبت تنش‌های برج و نسبت فشار داخل ترک (P_{frac}) به فشار چاه (P_w) می‌باشند. با در نظر گرفتن پارامترهای جدول ۱ به عنوان مقادیر ورودی، مقدار SIF برای مدل تادا و مدل ارائه

جدول ۱. پارامترهای ورودی جهت شبیه‌سازی مدل در شرایط مختلف

پارامتر	نماد	مقدار	سیستم آحاد میدانی
شعاع چاه	R_w	۶	In
طول شکاف	a	۶	In
شعاع مخزن	R_o	۸۰	In
تنش افقی مینیمم	σ_h	۳۰۰۰	Psi
تنش افقی ماکزیمم	σ_H	۳۶۰۰	Psi
فشار اولیه مخزن	P_o	۱۸۰۰	Psi
فشار سیال درون چاه	P_w	۴۰۰۰	Psi
ضریب پوروالاستیک بیوت	α	۰,۷۵	-



شکل ۶. مقایسه نتایج مدل الاستیک تادا و مدل ارائه شده در مقاله

موضوع انسداد شکاف و WBS بررسی شده است. فشار سیال درون شکاف از دهانه‌ی شکاف تا محل LCM برابر با فشار چاه می‌باشد؛ درحالی‌که فشار از پشت پلاگ تا نوک ترک برابر با فشار منفذی است. رابطه‌ی ارائه شده توسط فنگ، به شرح زیر است:

• اعتبارسنجی بر اساس مدل تحلیلی فنگ

فنگ با فرض مدل الاستیک، فاکتور شدت تنش را برای مسئله‌ی WBS به دست آورد. مطابق شکل ۵ ابعاد و هندسه‌ی مدل بسیار شبیه به مدل تادا است با این تفاوت که در آن،

ارائه ی یک مدل تحلیلی پوروالاستیک جهت ارزیابی عملکرد ذرات LCM در مقاوم سازی دیواره ی چاه

$$K_1 = (F_1 + F_2) \cdot [2P_w - (\sigma_H + \sigma_h)] + (F_1 + 3F_3) \cdot (\sigma_H - \sigma_h) - 2F_4(P_w - P_p)$$

$$F_1 = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{R_w}^L G(r) dr$$

$$F_2 = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{R_w}^L \frac{R^2}{r^2} G(r) dr$$

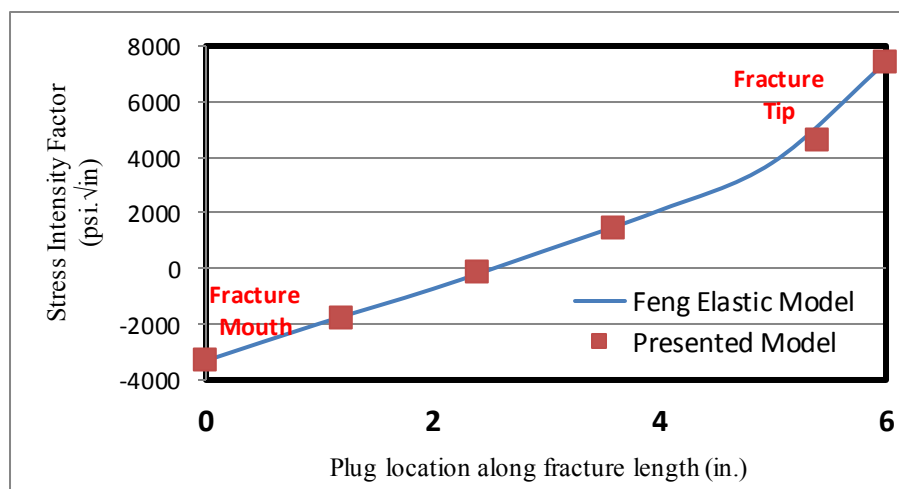
$$F_3 = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{R_w}^L \frac{R^4}{r^4} G(r) dr$$

$$F_4 = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_D^L G(r) dr$$

$$G(r) = \frac{1.3 - 0.3 \left(\frac{r - R_w}{a}\right)^{\frac{5}{4}}}{\sqrt{1 - \left(\frac{r - R_w}{a}\right)^2}} \quad (13)$$

مدل فنگ و مدل ارائه شده در این مقاله (در حالت الاستیک)، به دست آمده و با هم مقایسه شده است. شکل ۷ تطابق قابل قبولی را بین نتایج این دو مدل نشان می دهد.

که در آن $F1$ تا $F4$ ، توابع انتگرالی هستند که تنها به هندسه ی مدل و شکاف، وابسته می باشند. با در نظر گرفتن پارامترهای جدول ۱ به عنوان مقادیر ورودی، مقدار SIF برای



شکل ۷. مقایسه نتایج مدل الاستیک فنگ و مدل ارائه شده در مقاله بر حسب مکان پلاگ LCM

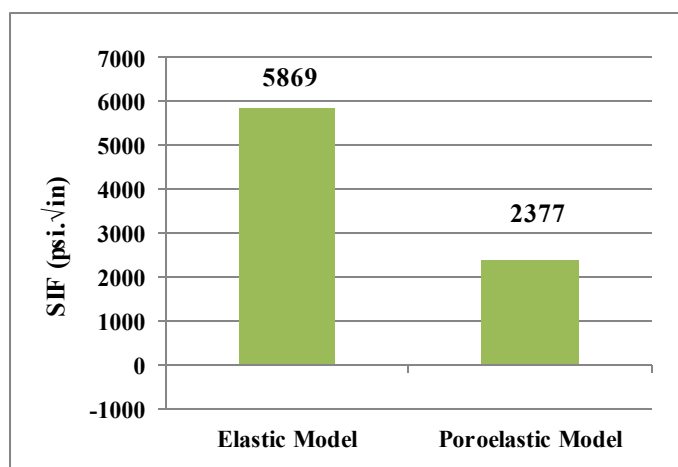
شده است. همچنین با توجه به مطالعات قبلی، طول شکاف استاتیک برابر با ۶ اینچ می باشد (Y. Feng & K. E. Gray, 2016; H Wang, Soliman, Towler, & Shan, 2009; Hong Wang, Soliman, & Towler, 2008; Z. Wang & Chen, 2018). فشار چاه ۴۰۰۰ psi و تنش های ماکزیمم و مینیمم افقی به ترتیب ۳۶۰۰ psi و ۳۰۰۰ psi می باشند.

۴. نتایج مدل سازی

در ابتدا، مدل پایه برای دو حالت مختلف (الاستیک و پوروالاستیک) ارزیابی شده است تا تأثیر فشار منفذی، در مقایسه با شرایط الاستیک، بررسی شود. جدول ۱ داده های ورودی برای شبیه سازی مدل پایه را ارائه می دهد. در مدل پایه، شعاع چاه ۶ اینچ و شعاع مخزن ۸۰ اینچ در نظر گرفته

گرفتن شرایط پوروالاستیک، به شدت بر مقادیر SIF تأثیر گذار است و نادیده گرفتن آن، می‌تواند سبب تخمین غیر واقعی فشار شکست سازند و ابعاد LCM گردد. نتایج نشان می‌دهد که اعمال اثر فشار سیال منفذی، باعث مقاوم‌تر شدن سازند و کاهش قابل ملاحظه در مقدار فاکتور شدت تنش نسبت به حالت الاستیک می‌گردد که در مدل‌سازی سازندهای تراوا و کم‌تراوا، حائز اهمیت می‌باشد.

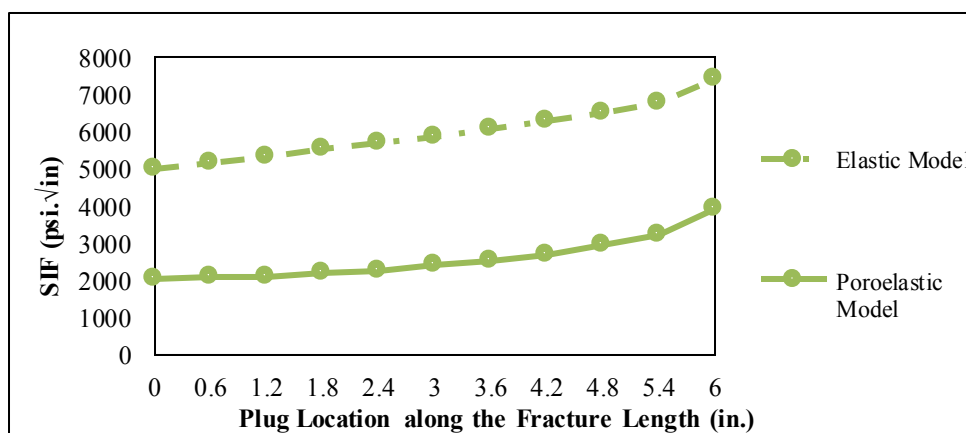
فشار مخزن در مرزهای خارجی ثابت و برابر با 1800 psi و ضریب بیوت برابر با 0.75 است. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه فشار منفذی، تحت تأثیر فشار چاه و شعاع چاه تغییر می‌کند، این پارامتر از طریق میانگین‌گیری از رابطه‌ی (۳) به دست آمده و به عنوان فشار سیال شکاف در پشت پلاگ، لحاظ می‌گردد. شکل ۸ مقادیر فاکتور شدت تنش در نوک ترک موجود در دیواره‌ی چاه را در شرایط مختلف مدل‌سازی به تصویر کشیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در نظر



شکل ۸. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی SIF در شرایط مختلف الاستیک و پوروالاستیک

می‌یابد. در واقع چنانچه دهانه‌ی ترک مسدود شود، تأثیر آن در کاهش تنش‌های نوک ترک، بیشتر از حالت‌های دیگر است. این شرایط، برای تمامی هر دو حالت الاستیک و پوروالاستیک مشاهده شد.

شکل ۹ نتایج حاصل از مدل‌سازی تحلیلی را در شرایط مختلف، بر حسب مکان انسداد، نشان می‌دهد. طبق این نمودار، هرچه ذرات LCM از دهانه‌ی ترک، بیشتر فاصله گرفته و به نوک ترک نزدیک‌تر شوند، تأثیر WBS کاهش



شکل ۹. مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی SIF در شرایط مختلف الاستیک و پوروالاستیک، بر حسب محل انسداد LCM

ارائه‌ی یک مدل تحلیلی پوروالاستیک جهت ارزیابی عملکرد ذرات LCM در مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه

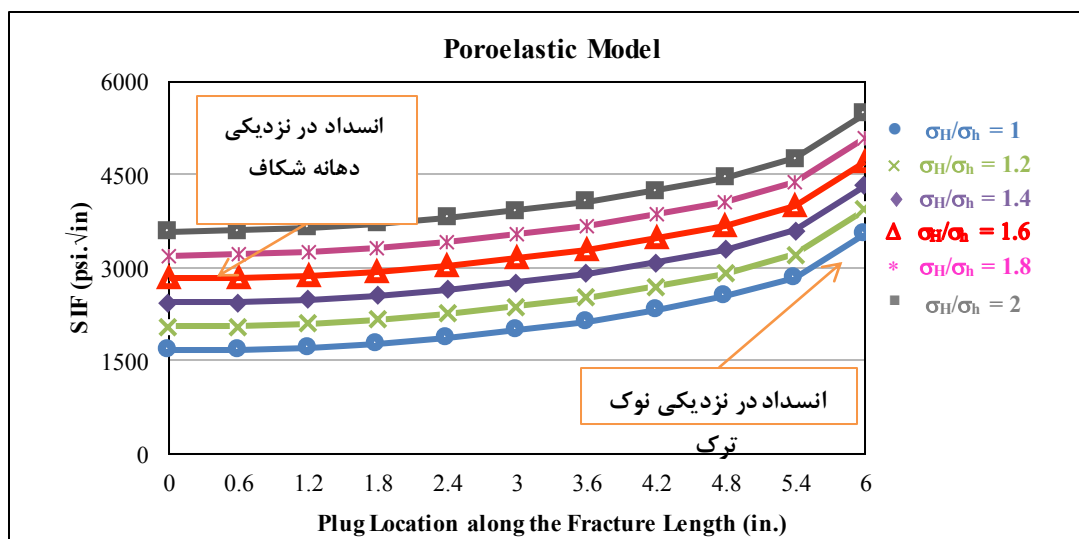
در ادامه، با انجام آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مؤثر بر تنش‌های اطراف دیواره‌ی چاه، میزان تغییرات فاکتور شدت تنش، در حالت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. این پارامترها عبارت‌اند از: ناهمسانگردی تنش‌های برجا، محل تشکیل پلاگ LCM، ضریب پوروالاستیک، فشار منفذی سازند و طول شکاف.

۱.۴ مطالعه‌ی پارامتری بر روی تنش‌های برجا
در این قسمت، با فرض مقدار ثابت برای تنش افقی مینیمم ($\sigma_h = 3000 \text{ psi}$) و در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای σ_H (از شرایط همسانگرد $\sigma_H/\sigma_h=1$ تا شرایط ناهمسانگرد $\sigma_H/\sigma_h=2$)، اثر تنش‌های برجا بر مقدار فاکتور شدت تنش، مورد ارزیابی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، هرچه ناهمسانگردی تنش‌های برجا بیشتر می‌شود، مقدار SIF در نوک ترک بیشتر شده و احتمال رشد ترک افزایش می‌یابد. این بدین معناست که مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه در شرایط تنش ایزوتروپ، مؤثرتر خواهد بود. از سوی دیگر، هرچه پلاگ به نوک ترک نزدیک‌تر می‌شود، اثر مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه کمتر و مقدار K_I بیشتر می‌شود. برعکس، هرچه انسداد به دهانه‌ی ترک نزدیک‌تر باشد، احتمال رشد ترک و وقوع هرزروی کاهش می‌یابد.

در ادامه، با انجام آنالیز حساسیت بر روی پارامترهای مؤثر بر تنش‌های اطراف دیواره‌ی چاه، میزان تغییرات فاکتور شدت تنش، در حالت‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده است. این پارامترها عبارت‌اند از: ناهمسانگردی تنش‌های برجا، محل تشکیل پلاگ LCM، ضریب پوروالاستیک، فشار منفذی سازند و طول شکاف.

۱.۴ مطالعه‌ی پارامتری بر روی تنش‌های برجا

در این قسمت، با فرض مقدار ثابت برای تنش افقی مینیمم ($\sigma_h = 3000 \text{ psi}$) و در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای σ_H (از شرایط همسانگرد $\sigma_H/\sigma_h=1$ تا شرایط ناهمسانگرد $\sigma_H/\sigma_h=2$)، اثر تنش‌های برجا بر مقدار فاکتور شدت تنش، مورد ارزیابی قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، هرچه ناهمسانگردی تنش‌های برجا بیشتر می‌شود، مقدار SIF در نوک ترک بیشتر شده و احتمال رشد ترک و وقوع هرزروی کاهش می‌یابد.



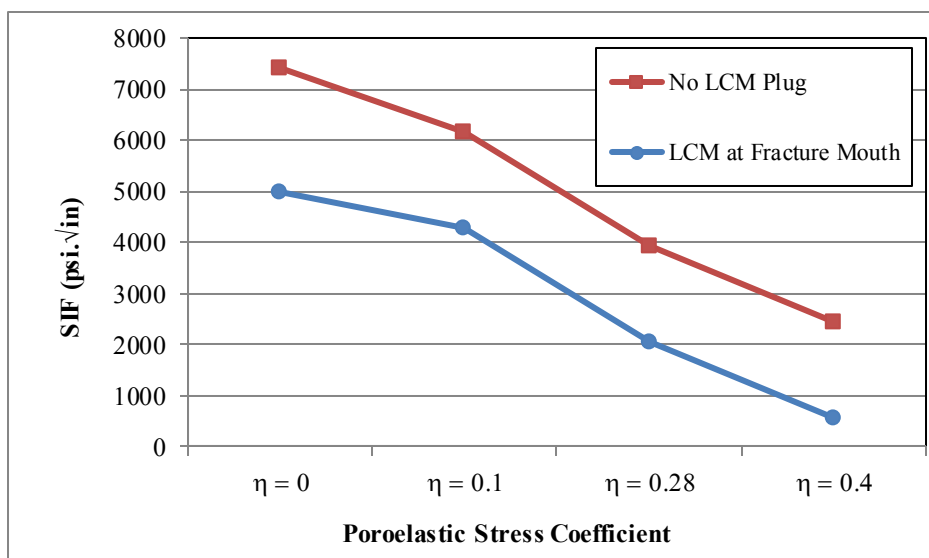
شکل ۱۰. تأثیر تنش‌های برجا بر فاکتور شدت تنش در مدل پوروالاستیک بر حسب محل انسداد LCM

۱۱، هرچه مقدار η کمتر شود، شرایط به حالت الاستیک نزدیک‌تر می‌شود و SIF افزایش می‌یابد. از سوی دیگر در شرایط پوروالاستیک، به دلیل وارد شدن بخشی از تنش کل به سیال منفذی، مقدار SIF کاهش می‌یابد. به علاوه، این شکل نشان می‌دهد که انسداد ترک، منجر به کاهش قبل توجه تنش‌ها در نوک ترک شده و مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه را به همراه خواهد داشت. ضمن اینکه هرچه انسداد به نوک ترک نزدیک‌تر شود، اثرگذاری آن بیشتر خواهد شد (شکل ۱۲).

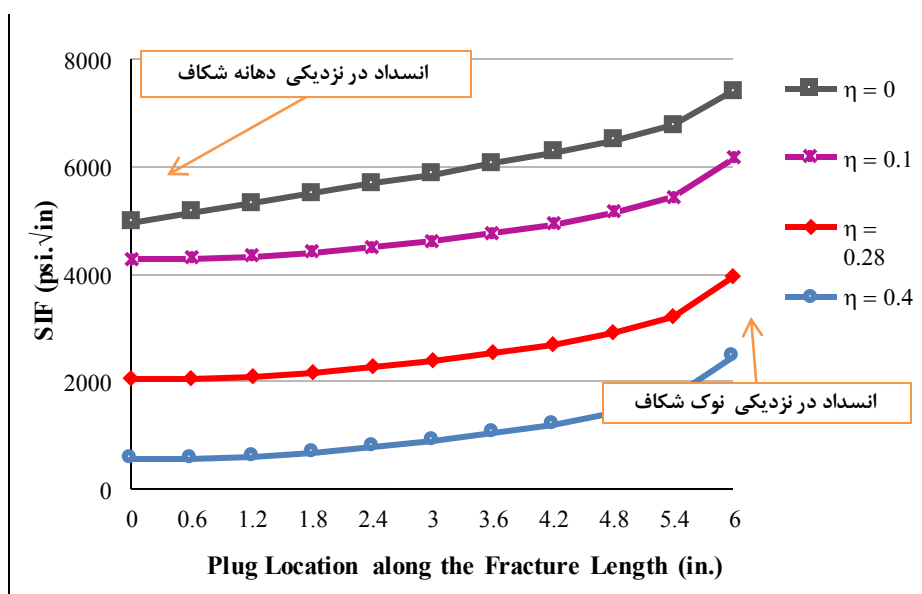
۲.۴ مطالعه پارامتری بر روی ضریب تنش پوروالاستیک

سنگ

طبق معادله‌ی (۳) ضریب تنش پوروالاستیک (η) تابعی از نسبت پوآسون (ν) و ضریب بیوت (α) می‌باشد و مقدار آن در محدوده‌ی $0 < \eta < 0.5$ تغییر می‌کند. این پارامتر میزان تأثیر تنش‌های ناشی از فشار منفذی بر تنش‌های اطراف دیواره‌ی چاه را کنترل می‌کند. با ثابت در نظر گرفتن نسبت پوآسون و تغییر مقدار α ، آنالیز حساسیت بر روی مقادیر مختلف ضریب پوروالاستیک انجام شده است. مطابق شکل



شکل ۱۱. تأثیر ضریب تنش پوروالاستیک بر فاکتور شدت تنش



شکل ۱۲. تأثیر ضریب تنش پوروالاستیک بر فاکتور شدت تنش بر حسب محل تشکیل پلاگ

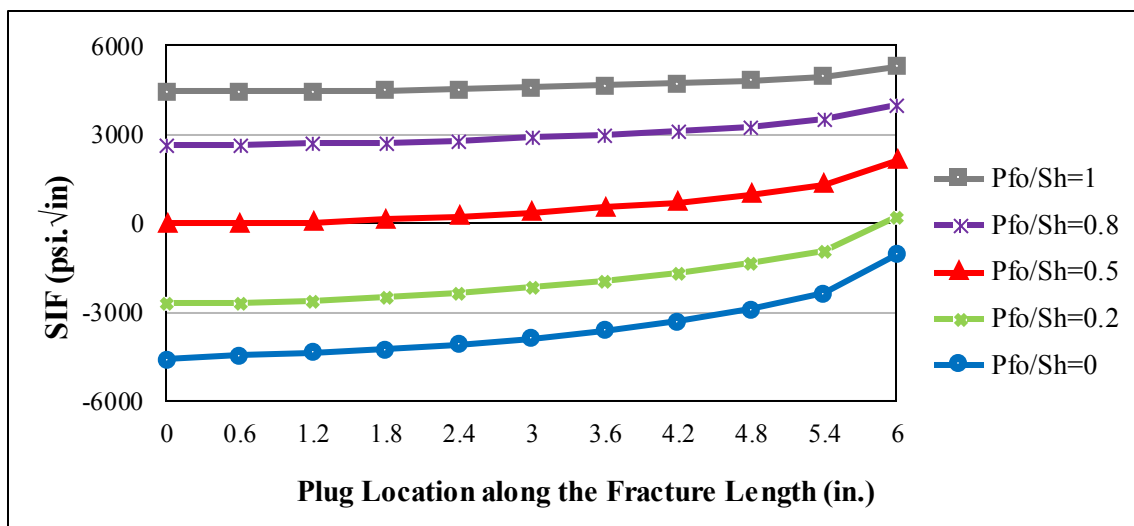
شده که پنجره‌ی ایمن گل باریک‌تری دارند، بیشتر از مخازن پرفشار کارآیی دارد. این نتیجه با نتایج حاصل از مطالعات قبلی نیز همخوانی دارد (Y. Feng & K. E. Gray, 2016). لازم به ذکر است که مدل الاستیک فنگ بیان می‌کند که در حالتی که شکاف مسدود نشده است، فشار منفذی بر مقادیر فاکتور شدت تنش، اثرگذار نیست. این نتیجه به دلیل عدم

۳.۴ مطالعه پارامتری بر روی فشار منفذی سازند

شکل ۱۳ مقدار SIF را به ازای مقادیر مختلف فشار منفذی و محل تشکیل پلاگ، نشان می‌دهد. مطابق این شکل، در یک محل انسداد مشخص، هرچه فشار منفذی سازند کمتر باشد (نسبت P_{fo}/σ_h کمتر)، مقدار کاهش در فاکتور شدت تنش بیشتر می‌شود. در واقع، مقاوم‌سازی سازند در مخازن تخلیه

ارائه ی یک مدل تحلیلی پوروالاستیک جهت ارزیابی عملکرد ذرات LCM در مقاوم سازی دیواره ی چاه

لحاظ کردن شرایط پوروالاستیک در مدل تحلیلی فنگ می باشد. همان طور که در شکل ۱۳ مشاهده می شود، در انتهای نمودار نیز فشار منفذی بر مقدار SIF تأثیر گذار است و برای فشار منفذی کمتر، SIF پایین تر قرار دارد.

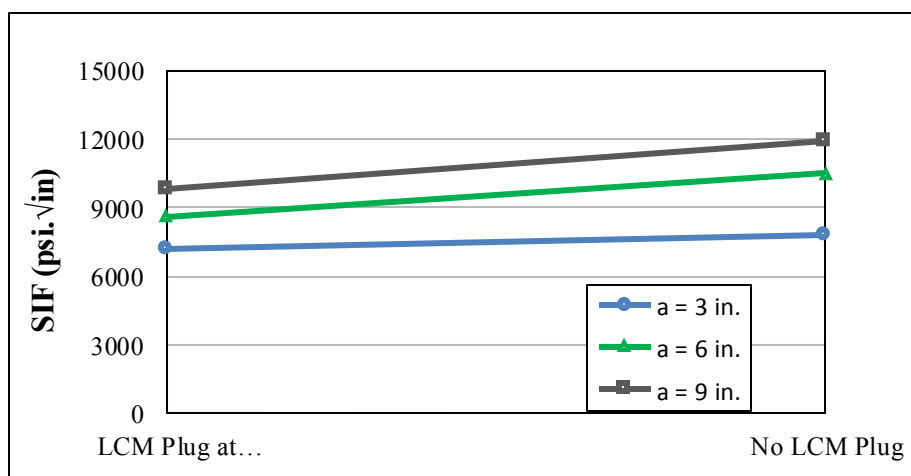


شکل ۱۳. تأثیر فشار منفذی بر فاکتور شدت تنش بر حسب محل تشکیل پلاگ

نشان می دهد که با ثابت در نظر گرفتن تمامی پارامترها، هرچه طول ترک بیشتر باشد، مقدار SIF بیشتر شده و احتمال رشد ترک و هرزروی بیشتر خواهد شد (شکل ۱۴). از سوی دیگر، تأثیر انسداد ترک، بر شکاف های بلندتر، بیشتر است. چراکه میزان کاهش SIF برای شکاف با طول ۹ اینچ، بیشتر از شکاف با طول ۳ اینچ است.

۴.۴ مطالعه ی پارامتری بر روی طول شکاف

مطالعات پیشین نشان می دهد که طول شکاف، یکی از پارامترهای مؤثر بر پروفایل عرض شکاف می باشد که تأثیر به سزایی بر تنش های اطراف دیواره ی چاه و نوک ترک دارد (Shahri, 2015; Shahri et al., 2014). نتایج مدل سازی



شکل ۱۴. تأثیر طول ترک بر فاکتور شدت تنش

۵. نتیجه‌گیری

مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه از طریق انسداد شکاف با ذرات *LCM*، به عنوان یکی از روش‌های متداول جهت مقابله با مشکل هرزروی سیال حفاری شناخته می‌شود. انسداد شکاف باعث تغییر در توزیع تنش در اطراف شکاف شده و می‌تواند از ایجاد ترک‌های القایی و یا رشد ترک‌های قبلی جلوگیری کند. در این مقاله تلاش شده است تا با ارائه‌ی یک مدل تحلیلی پوروالاستیک، تأثیر پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی مختلف از جمله تنش‌های برجا، هندسه‌ی شکاف، ضریب پوروالاستیک، محل پلاگ *LCM* و فشار منفذی سازند بر عملکرد *WBS* بررسی شود. لازم به ذکر است که در این مقاله، فاکتور شدت تنش (*SIF*) به عنوان شاخص ارزیابی معرفی شده است که میزان تمرکز تنش در نوک ترک را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این مطالعه، به شرح زیر می‌باشد: هرچه محل تشکیل پلاگ *LCM*، به دهانه‌ی ترک نزدیک‌تر باشد، مقدار فاکتور شدت تنش در نوک ترک کمتر بوده و مقاوم‌سازی بهتر انجام می‌شود. در نتیجه، به منظور انتخاب بهترین توزیع سایز ذرات *LCM* برای انسداد دهانه‌ی ترک، لازم است عرض شکاف، با دقت تخمین زده شود. از این‌رو، استفاده از تکنیک‌های عددی برای مدل‌سازی صحیح هندسه‌ی ترک، ضروری به نظر می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که هرچه ناهمسانگردی تنش‌های برجا بیشتر باشد، مقدار *SIF* در نوک ترک، بیشتر می‌شود. در واقع حفاری تحت

شرایط تنش ناهمسانگرد، احتمال وقوع هرزروی را افزایش می‌دهد و مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه را با مشکل همراه می‌سازد. نتایج مدل‌سازی تحلیلی نشان می‌دهد که مقاوم‌سازی دیواره‌ی چاه در سازندهای کم‌فشار و یا تخلیه شده، اثرگذاری بیشتری نسبت به سازندهای پر فشار دارد.

با توجه به تأثیر قابل توجه شرایط پوروالاستیک بر نتایج مدل‌سازی، نادیده گرفتن اثر فشار منفذی سنگ، می‌تواند منجر به تخمین دور از واقعیت شود و ریسک‌های عملیاتی را بالا ببرد.

نتایج نشان می‌دهد که طول شکاف، یکی از پارامترهای مؤثر بر تنش‌های اطراف دیواره‌ی چاه و نوک ترک است و هرچه طول ترک بیشتر باشد، مقدار *SIF* بیشتر شده و احتمال رشد ترک بیشتر خواهد شد.

اگرچه مدل‌سازی تحلیلی، به دلیل فرضیات ساده شونده، نسبت به روش‌های عددی از دقت کمتری برخوردار است، اما در زمان و هزینه‌ی کمتر، یک جمع‌بندی کمی و کیفی قابل قبول ارائه می‌دهد. به منظور توسعه‌ی مطالعات حال حاضر، تلاش‌هایی در دست انجام است که در مطالعات آینده، ارائه خواهد شد. در نظر گرفتن شرایط گذرا برای تغییرات فشار منفذی و دمای سیال، مدل‌سازی چند شکاف در دیواره‌ی چاه، در نظر گرفتن اثر زاویه‌ی ترک‌ها و همچنین ارزیابی خواص کیک گل بر مقاوم‌سازی سازند از جمله این موارد می‌باشد.

مراجع

- Al-Hameedi, AT, Alkinani, HH, Norman, SD, & Flori, RE. (2018). Practical Strategies and Engineered Solutions to Minimize the Impact of Lost Circulation Problem. *J Pet Environ Biotechnol*, 9(356), 2.
- Alberty, Mark W, & McLean, Michael R. (2004). *A physical model for stress cages*. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE 90493.
- Alsaba, Mortadha, Nygaard, Runar, Saasen, Arild, & Nes, Olav-Magnar. (2016). Experimental investigation of fracture width limitations of granular lost circulation treatments. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 6(4), 593-603. doi: 10.1007/s13202-015-0225-3.
- Benyeogor, Ogochukwu, Awe, Sunday, Amah, Obinna, Ugochukwu, Oseme, Erinle, Adeyemi, Akinfolarin, Ayodele, & Oseme, Ugochukwu. (2016). *Wellbore Strengthening in Narrow Margin Drilling*, SPE-AFRC-2554559-MS.
- Cook, John, Growcock, Fred, Guo, Quan, Hodder, Mike, & van Oort, Eric. (2011). Stabilizing the wellbore to prevent lost circulation. *Oilfield Review*, 2012(23), 4.

- Feng, Y. (2016). *Fracture Analysis for Lost Circulation and Wellbore Strengthening*. PhD Dissertation, The University of Texas at Austin .
- Feng, Y, Arlanoglu, C, Podnos, E, Becker, E, & Gray, KE. (2015). Finite-element studies of hoop-stress enhancement for wellbore strengthening. *SPE Drilling & Completion*, 30(01), 38-51 .
- Feng, Yongcun, & Gray, KE. (2016). A parametric study for wellbore strengthening. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 30, 350-363 .
- Feng, Yongcun, & Gray, KE. (2017a). Modeling lost circulation through drilling-induced fractures. *SPE Journal* .
- Feng, Yongcun, & Gray, KE. (2017b). Review of fundamental studies on lost circulation and wellbore strengthening. *Journal of Petroleum Science and Engineering* .
- Feng, Yongcun, & Gray, Kenneth E. (2016). A fracture-mechanics-based model for wellbore strengthening applications. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 29, 392-400 .
- Fjar, Erling, Holt, Rune M, Raaen, AM, Risnes, Rasmus, & Horsrud, P. (2008). *Petroleum related rock mechanics* (Vol. 53): Elsevier.
- Ghalambor, Ali, Salehi, Saeed, Shahri, Mojtaba P, & Karimi, Moji. (2014). *Integrated workflow for lost circulation prediction*. Paper presented at the SPE international symposium and exhibition on formation damage control.
- Growcock, FB, Kaageson-Loe, N, Friedheim J, Sanders, MW, & Bruton, J. (2009). *Wellbore stability, stabilization and strengthening*. Paper presented at the Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, OMC-2009-107.
- Guo, Q, Feng, YZ, & Jin, ZH. (2011). *Fracture aperture for wellbore strengthening applications*. Paper presented at the 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium., ARMA 11-378.
- Ito, Takatoshi, Zoback, Mark D, & Peska, Pavel. (2001). Utilization of mud weights in excess of the least principal stress to stabilize wellbores: Theory and practical examples. *SPE Drilling & Completion*, 16(04), 221-229 .
- Ivan, C, Bruton, J, & Bloys, B. (2003). *How can we best manage lost circulation?* Paper presented at the American Association of Drilling Engineers (AADE) National Technology Conference, Houston, TX, Apr., AADE-03-NTCE-38.
- Mehrabian, Amin, Jamison, Dale E, & Teodorescu, Sorin Gabriel. (2015). Geomechanics of lost-circulation events and wellbore-strengthening operations. *SPE Journal*, 20(06), 1,305-301,316 .
- Mostafavi Toroqi, S. V. (2012). *Experimental Analysis and Mechanistic Modeling of Wellbore Strengthening*. University of Calgary .
- Rezagholilou, Ali, Vialle, Stephanie, & Madadi, Mahyar. (2017). Determination of safe mud window considering time-dependent variations of temperature and pore pressure: Analytical and numerical approaches. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2, 1-12.
- Salehi, Saeed. (2012). *Numerical simulations of fracture propagation and sealing: Implications for wellbore strengthening*: Missouri University of Science and Technology .
- Salehi, Saeed, & Nygaard, Runar. (2012). *Numerical modeling of induced fracture propagation: A novel approach for lost circulation materials (LCM) design in borehole strengthening applications of deep offshore drilling*. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE-135155-MS.

- Shahri, Mojtaba P. (2015). *Quantification of wellbore strengthening mechanisms: comprehensive parametric analysis*. Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE-174770-MS.
- Shahri, Mojtaba P, Oar, Trevor, Safari, Reza, Karimi, Moji, & Mutlu, Uno. (2014). *Advanced geomechanical analysis of wellbore strengthening for depleted reservoir drilling applications*. Paper presented at the IADC/SPE Drilling Conference and Exhibition. SPE-167976-MS.
- Shahri, Mojtaba P, Oar, Trevor T, Safari, Reza, Karimi, Moji, & Mutlu, Uno. (2015). Advanced semianalytical geomechanical model for wellbore-strengthening applications. *SPE Journal*, 20(06), 1,276-271,286 .
- Shen, Guoyang, & Shen, Xinpu. (2016). *Widened Safe Mud Window for Subsalt Well Sections: A Workflow and Case Study*. Paper presented at the Offshore Technology Conference. OTC-26917-MS
- Shen, Xinpu. (2016). *Widened safe mud window for naturally fractured shale formations: a workflow and case study*. Paper presented at the IADC/SPE Asia Pacific drilling technology conference. SPE-180519-MS.
- Sweatman, RE, Kessler, CW, & Hillier, JM. (1997). *New solutions to remedy lost circulation, crossflows, and underground blowouts*. Paper presented at the SPE/IADC drilling conference. SPE-37671-MS.
- Tada, Hiroshi, Paris, Paul C, & Irwin, George R. (1973). The stress analysis of cracks. *Handbook, Del Research Corporation* .
- Van Oort, Eric, Friedheim, James E, Pierce, Toby, & Lee, John. (2011). Avoiding losses in depleted and weak zones by constantly strengthening wellbores. *SPE Drilling & Completion*, 26(04), 5. 530-19.
- Wang, H, Soliman, MY, Towler, BF, & Shan, Z. (2009). *Strengthening a wellbore with multiple fractures: further investigation of factors for strengthening a wellbore*. Paper presented at the 43rd US Rock Mechanics Symposium & 4th US-Canada Rock Mechanics Symposium. ARMA-09-067.
- Wang, Hong, Soliman, Mohamed Y, & Towler, Brian Francis. (2008). *Investigation of factors for strengthening a wellbore by propping fractures*. Paper presented at the IADC/SPE drilling conference. SPE-112629-MS.
- Wang, Hong, Towler, Brian Francis, & Soliman, Mohamed Y. (2007). *Fractured wellbore stress analysis: sealing cracks to strengthen a wellbore*. Paper presented at the SPE/IADC Drilling Conference.
- Wang, Ze, & Chen, Yuanhang. (2018). Finite Element Analysis of Thermally Induced Stresses in the Near-Wellbore Region During Invasion of Mud Into Fractures. *Journal of Energy Resources Technology*, 140(5), 052909 .
- Wang, Ze, Yang, Mingzheng, & Chen, Yuanhang. (2019). Numerical modeling and analysis of induced thermal stress for a non-isothermal wellbore strengthening process. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 175, 173-183 .