



مقاله پژوهشی

تحلیل حساسیت و تعیین مهم ترین پارامترهای مؤثر بر پایداری چاه نفت بر اساس مدل سازی عددی در نرم افزار Phase2

ماهان امیرخانی^۱، ابوالفضل عبدالهی پور^{۱*}

۱- دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(دریافت: خرداد ۱۴۰۱، پذیرش: آبان ۱۴۰۱)

چکیده

ناپایداری چاه در صنعت نفت مسئله مهمی بوده و عموماً به دلیل عوامل مکانیکی، شیمیایی و گرمایی هر ساله باعث ایجاد هزینه های قابل توجهی می گردد. این موضوع دلیل اصلی گسیختگی چاه ها بوده و نشان دهنده مشکلی جدی در صنعت حفاری است. با افزایش عمق حفاری، پایداری چاه در سازندهای عمیق دارای شکستگی طبیعی بیشتر و بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. هدف از انجام این تحقیق بررسی میزان تأثیر هر پارامتر بر پایداری چاه نفت و مشخص کردن مهم ترین آن ها و مرتب نمودن آن ها بر اساس اهمیت در پایداری چاه نفت است. در این مطالعه با استفاده از تحلیل حساسیت به بررسی میزان تأثیر هفت پارامتر بر پایداری چاه پرداخته شده است. حداکثر جابه جایی ایجاد شده در دیواره چاه به عنوان معیار پایداری در نظر گرفته شده است. در نهایت این پارامترها به ترتیب از بیشترین تأثیرگذاری تا کمترین تأثیرگذاری مرتب شده اند. تحلیل حساسیت به وسیله مدل سازی عددی انجام خواهد شد. در مدل مربوطه برای مجموعه ای از پارامترهای مهم که انتخاب شده اند مقادیری پایه ای مشخص شده، با تغییر دادن مقدار یک پارامتر در محدوده تغییرات خود و ثابت نگه داشتن سایر پارامترها و تحلیل آن در نرم افزار Phase2 میزان تأثیرگذاری پارامتر مزبور بر پایداری چاه نفت بررسی شده یا به عبارتی، حساسیت آن پارامتر بررسی خواهد شد. سپس این فرآیند برای سایر پارامترها نیز انجام شده و در واقع حساسیت سایر پارامترها بررسی شد. در نهایت مشخص شد پارامترهای مورد بررسی به ترتیب از حساسیت زیاد به کم عبارتند از: فشار منفذی، فشار گل حفاری، نسبت تنش های افقی جانبی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب چسبندگی، مدول یانگ و نسبت پواسون.

کلمات کلیدی

تحلیل حساسیت، پایداری چاه نفت، مدل سازی عددی، Phase2.

*عهده دار مکاتبات: abdollahipour@ut.ac.ir

DOI: 10.22034/ANM.2022.2859

۱- مقدمه

پایداری چاه نفت، تابع پارامترهای بسیاری نظیر قطر چاه، عمق چاه، مدول یانگ، نسبت پواسون، رژیم تنشی درون سازندها، زاویه اصطکاک داخلی و غیره است. هر یک از این پارامترها به‌گونه‌ای در پایداری چاه تأثیر گذارند.

هولت و همکاران بر روی دو نوع شیل شکننده و انعطاف‌پذیر آزمایش‌هایی را انجام داده و تأثیر آن بر میزان آب‌بندی دیواره چاه را بررسی نمودند [۱]. مدتبکوا و همکاران آزمایش‌های مکانیک سنگی را بر روی نمونه‌هایی انجام داده و یک برنامه اجزای محدود را برای گچ توسعه داده‌اند [۲]. اصلان‌نژاد و همکاران به بررسی پارامترهای مکانیکی، شیمیایی و حرارتی و ... بر پایداری دیواره چاه و منطقه اطراف آن در سازندهای شیل دار پرداخته‌اند [۳]. دینگ^۱ و همکاران با هدف بررسی اثرات ناهمسانگرد (حرارتی و هیدرولیکی) یک مدل جدید از پایداری چاه ارائه دادند [۴]. خاکسارمنشاد و همکاران از فرم‌های غیرخطی معیار شکست موگی و داده‌های تست چند محوری برای برآورد فشارهای ریزش و شکست موردنیاز برای پایداری چاه در مسیرهای مختلف چاه در رژیم‌های تنش برجا استفاده نمودند [۵]. هاو^۲ پنجره وزن مخصوص گل حفاری را در چاه‌های افقی در سازندهای پیچیده بر اساس داده‌های به‌دست‌آمده از چاه‌ها بررسی نمود [۶]. جین و همکاران بر اساس برخی آزمایش‌های انجام‌شده بر روی سنگ، پایداری چاه در شبکه همسانگرد عرضی، به‌وسیله حل نمودن توزیع تنش بر روی دیواره چاه، یک مدل جدید برای چاه قائم ساختند [۷]. دینگ و همکاران سه مدل مطرح و آن‌ها را با یکدیگر مقایسه کرده و ساده‌سازی، بزرگنمایی و محاسبه و ریزش‌های برآورد شده توسط سه مدل مزبور را بررسی نمودند [۸]. عبدالهی پور و همکاران شکستگی هیدرولیکی را که برای تحریک چاه اعمال‌شده، بررسی نموده، انتشار یک یا چند شکستگی هیدرولیکی از یک چاه که با حداکثر یا حد متوسط تنش اصلی برجا جهت گرفته‌اند را مورد مطالعه قرار دادند. برای دستیابی به دقت بالاتر در شبیه‌سازی فرآیند، یک روش ناپویستگی جابه‌جایی مرتبه بالاتر (HODDM) با المان‌های مخصوص نوک ترک را به کار بردند [۹]. عبدالهی پور و همکاران در مقاله‌ای جابه‌جایی بازشدگی ترک (COD) را توسط یک مدل اجزای مجزا که با یک راه‌حل دقیق تأییدشده، اندازه‌گیری نموده‌اند. یک مطالعه جامع در مورد

اثر فشار محدود بر COD انجام دادند. نتایج عددی نشان داد که فشار محدود به‌طور قابل توجهی بر COD تأثیر می‌گذارد [۱۰]. لک و همکاران شروع و انتشار ترک‌ها را در اثر انفجار در سنگ اطراف چاه با استفاده از روش المان تفاضل محدود جفت شده، به‌صورت عددی شبیه‌سازی کردند [۱۱]. یوسفیان و همکاران از کد عددی اجزای مرزی (TDDQCR) برای شبیه‌سازی فرآیند شکل‌گیری گسیختگی چاه پس از بیست مرحله انتشار ترک در یک چاه قائم در جنوب غرب ایران استفاده کردند و سپس، این نتایج شبیه‌سازی عددی توسط داده‌های FMI که از چاه هدف به‌دست می‌آیند را اعتبارسنجی نمودند [۱۲]. ما و همکاران برای جلوگیری از ریزش چاه در سازندهای سنگ آذرین پرمین، یک روش تحلیل ریسک برای ناپایداری چاه بر اساس تئوری قابلیت اطمینان پیشنهاد نموده و اثرات همبستگی پارامترها بر قابلیت اطمینان پایداری چاه در نظر گرفتند [۱۳]. ژنگ و همکاران پارامترهای ژئومکانیکی مخزن در سازند لانگ مکیسی جیائوشیبا را با شکستگی هیدرولیکی میدانی و آزمایش‌های آزمایشگاهی تعیین نمودند. سپس مدل توزیع تنش دیواره تحت شرایط جریان نشت نامتعادل بر اساس نتایج تجربی به‌دست‌آمده از آزمایش‌های مکانیکی بر روی هسته‌های زیرزمینی ایجاد کردند [۱۴].

مطالعات بسیاری در رابطه با تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی انجام‌شده اما تعداد بسیار معدودی از آن‌ها روش تحلیل حساسیت را به‌کار برده‌اند. در این دسته از مطالعات نیز عموماً به تحلیل حساسیت پارامترهای مؤثر بر پایداری تونل و مغار [۱۵ و ۱۶] و دیواره پیت معدن [۱۷] پرداخته‌شده و کمتر به چاه نفت پرداخته شده است. عبدالهی پور و رحمان‌نژاد به تحلیل حساسیت پارامترها بر پایداری مغار پرداخته و در آن نتیجه‌گیری نمودند که حساس‌ترین عوامل نسبت تنش و مدول تغییر شکل هستند [۱۵]. استارزک و اندرسون^۳ حساسیت پارامترهای ژئومکانیکی بلوک‌های محتمل را در دهانه‌ها بررسی نموده‌اند [۱۸]. پتل^۴ و صالحی پژوهشی در جهت ارزیابی تناسب برای خدمات‌رسانی به غلاف سیمانی در چاه‌های دریایی و انجام ارزیابی ریسک و شناسایی حالت‌های احتمالی شکست انجام داده و یک تحلیل حساسیت برای رتبه‌بندی پارامترهای مختلف عملیاتی و طراحی بر تنش‌های مکانیکی در یک غلاف سیمانی انجام دادند [۱۹]. عبدالهی پور و همکاران برای مدل‌سازی عددی از روش تفاضل محدود سه‌بعدی با

از پارامترها انجام داد. برای بررسی اثر α_k بر روی ویژگی سیستم (P)، سایر پارامترها را ثابت نگه داشته و α_k به عنوان متغیری در محدوده تغییرات خود تغییر داده می‌شود. در این حالت، ویژگی سیستم در رابطه (۱) صدق می‌کند [۲۱].

$$P = f(\alpha_1^*, \dots, \alpha_{k-1}^*, \alpha_k^*, \alpha_{k+1}^*, \dots, \alpha_n^*) = \varphi(\alpha_k^*) \quad (1)$$

منحنی ویژگی $\alpha_k - P$ از رابطه (۱) به دست می‌آید که به طور تقریبی حساسیت P را نسبت به α_k نشان می‌دهد. بررسی‌های فوق تنها حساسیت ویژگی P نسبت به یک پارامتر را نشان می‌دهد. معمولاً در واقعیت، ویژگی یک سیستم توسط عوامل متعددی با کمیت‌ها و واحدهای فیزیکی مختلفی کنترل می‌شود. بنابراین مقایسه حساسیت عوامل مختلف با روش فوق، دشوار است. برای حل این مشکل می‌توان از تحلیل بدون بعد استفاده کرد. در تحلیل بدون بعد، تابع حساسیت و عامل حساسیت به صورت عبارات بی‌بعد تعریف می‌شوند. تابع حساسیت مطابق رابطه (۲) بوده و با جایگذاری مقدار پایه‌ای پارامتر در تابع حساسیت، ضریب حساسیت پارامتر مربوطه مطابق رابطه (۳) به دست می‌آید. از آنجا که رابطه (۳) بی‌بعد است، می‌توان از آن برای مقایسه میزان حساسیت پارامترهای مختلف با واحدهای متفاوت استفاده نمود. مقدار S بیشتر، به معنای حساسیت بیشتر P نسبت به α_k است [۲۱].

$$S_k(\alpha_k) = \left| \frac{d\varphi_k(\alpha_k)}{d\alpha_k} \right| \frac{\alpha_k}{P} \quad \text{و} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$S_k^* = S_k(\alpha_k^*) = \left(\frac{d\varphi_k(\alpha_k)}{d\alpha_k} \right) \alpha_k = \alpha_k^* \frac{\alpha_k^*}{P^*} \quad (3)$$

$$\text{و} \quad k = 1, 2, \dots, n$$

اگر $\varphi_k(\alpha_k)$ تابعی قطعه‌ای باشد، ممکن است مشتق آن در نقطه مرزی α_{k0} ناپیوسته باشد که در این صورت برای به دست آوردن تابع حساسیت می‌توان در $\alpha_k = \alpha_{k0}$ از میان حد چپ و راست $S_k(\alpha_k)$ مطابق رابطه (۴) مقدار بالاتر را به عنوان حساسیت S_k^0 انتخاب نمود.

$$S_k^0 = \max\{S_k(\alpha_k-), S_k(\alpha_k+)\} \quad (4)$$

۲-۲- فرض‌های مدل‌سازی

در تحلیل حساسیت نیاز به مدل‌سازی‌های فراوان است، نرم‌افزار Phase2 امکان ایجاد و اجرای تعداد بسیار زیاد مدل

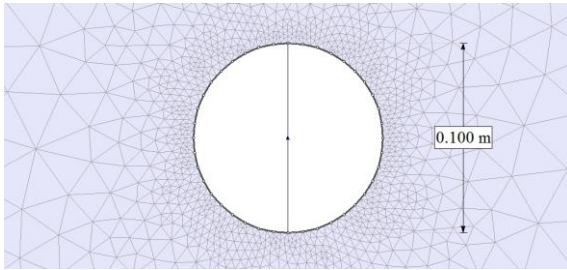
مدل مور استفاده کرده و با آن یک تحلیل حساسیت بی‌بعد بر روی پارامترهای موثر بر پایداری چاه انجام دادند [۲۰]. از آنجا که میزان نقش پارامترها در پایداری چاه یکسان نیست، میزان توجه به این پارامترها و دقت در اندازه‌گیری و تنظیم آن‌ها نباید به یک اندازه باشد. ضمناً تعدادی از پارامترها نظیر فشار گل حفاری، پارامتر قابل کنترل نامیده شده و می‌توانند توسط حفار کم‌وزیاد شوند اما پارامترهایی همچون فشار منفذی، زاویه اصطکاک و ضریب چسبندگی، غیرقابل کنترل بوده و مقدار آن قابل تغییر یا تنظیم نیست، بلکه دقت در اندازه‌گیری آن‌ها مهم بوده تا بتوان پارامترهای قابل کنترل را بر اساس آن‌ها تنظیم نمود. حال از آنجا که دقت در اندازه‌گیری و تنظیم آن‌ها ارتباط مستقیم در پایداری چاه و دستیابی به نتیجه مطلوب دارد، باید میزان دقت در آن‌ها به تناسب اهمیت آن‌ها باشد. به عبارتی، هزینه بیشتر برای پارامترهای مهم‌تر، از نظر اقتصادی به صرفه‌تر بوده و نتیجه بهتری در پی دارد. آنچه در این پژوهش بدان پرداخته خواهد شد تحلیل حساسیت تأثیر این پارامترها بر پایداری چاه است؛ یعنی پی بردن به میزان نقش هر یک از این پارامترها در مقایسه با یکدیگر.

۲- روش‌شناسی تحقیق

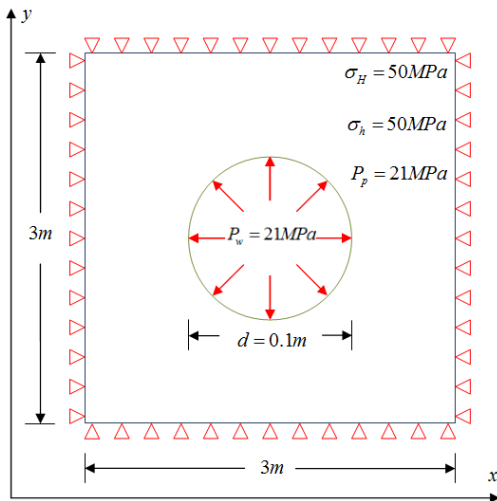
۲-۱- تحلیل حساسیت

روش تحلیل حساسیت روشی برای تحلیل پایداری یک سیستم است. در یک سیستم ویژگی P توسط n عامل $\alpha = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ و $P = f\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ کنترل می‌شود. در یک حالت خاص که $\alpha^* = \{\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_n^*\}$ باشد ویژگی با نماد P^* نشان داده می‌شود. تحلیل حساسیت بدین معناست که عوامل فوق را در محدوده ممکن خود تغییر داده و سپس بررسی شود که میزان تمایل و حدود ویژگی سیستم (P) بر اثر تغییر عوامل چگونه از حالت اولیه خود خارج می‌شوند [۲۱].

اولین گام برای تحلیل حساسیت، ایجاد مدل سیستم، یعنی ایجاد رابطه‌ای (تابع) بین ویژگی سیستم و عوامل آن به شکل $P = f\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n\}$ است. این تابع باید در صورت امکان به وسیله عبارات تحلیلی بیان شود. در مورد یک سیستم پیچیده، می‌توان آن را با روش عددی یا از طریق ارائه نمودار گرافیکی بیان کرد. پس از تعیین مجموعه پارامترهای اساسی، می‌توان تحلیل حساسیت را روی هر یک



شکل ۲: نمای سطح مقطع چاه نفت با مش‌بندی مثلثی که جهت دقیق‌تر شدن مدل در اطراف چاه چگالی بیشتری دارد.



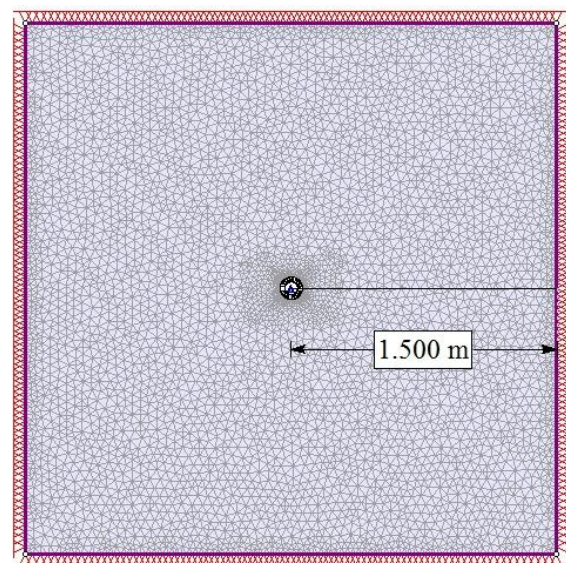
شکل ۳: شرایط بارگذاری مدل عددی

جدول ۱: پارامترهای به‌کاررفته و نمادها و واحدهای آن‌ها

پارامتر	نماد	واحد	پارامتر	نماد	واحد
قطر چاه	d_w	m	ضرب چسبندگی	C	MPa
چگالی آب منفذی	γ_{PF}	$\frac{kN}{m^3}$	مقاومت کششی نهایی باقی‌مانده	σ_{T_r}	MPa
فشار گل حفاری	P_w	MPa	زاویه اصطکاک داخلی باقی‌مانده	φ_r	deg
فشار منفذی	P_p	MPa	چسبندگی باقی‌مانده	C_r	MPa
نسبت پواسون	ν	-	نسبت تنش‌های جانبی	K	-
مدول یانگ	E	GPa	تنش افقی حداقل	σ_h	MPa
مقاومت کششی نهایی	σ_T	MPa	تنش افقی حداکثر	σ_H	MPa
زاویه اصطکاک داخلی	φ	deg	حداکثر جابه‌جایی کلی	u	mm

را به صورت متوالی و با سرعت بالا داراست. لذا این برنامه برای مدل‌سازی استفاده شد. فشار منفذی تنها با اثر بر تنش مؤثر خود را نشان می‌دهد و از آنجاکه مدل تحلیلی یک مدل هیدرومکانیک نیست، لذا نیازی هم به تعریف مرزهای هیدرولیکی برای فشار منفذی در مرز بیرونی و داخلی نخواهد بود.

در مدل‌های ساخته‌شده، مقطعی افقی از چاه بررسی می‌گردد (شکل ۱ و شکل ۲)، محیط کاملاً همسانگرد در نظر گرفته‌شده، چاه قائم بوده و مقطعی دایروی به قطر ۱۰ سانتی‌متر دارد، در مدل‌سازی عددی از روش اجزای محدود استفاده و در المان‌بندی آن مش‌بندی سه‌گره‌ای مثلثی به‌کار رفته، برای افزایش دقت در اندازه‌گیری چگالی مش‌بندی در نزدیکی چاه افزایش داده شد، برای از بین بردن اثر مرزی، مساحت محدوده بررسی نسبت به سطح مقطع چاه بزرگ در نظر گرفته‌شده، در حل مدل از معیار گسیختگی مور-کولمب استفاده شد. تعداد گره‌های روی مرز چاه ۷۵ عدد بوده و ابعاد محدوده مورد بررسی مربعی به ضلع ۳ متر است که محور چاه در مرکز آن قرار دارد. همچنین از ابتدا یک فشار منفذی اولیه به میزان ۲۱ مگا پاسکال به مدل پایه داده‌شده و شرایط بارگذاری آن مطابق شکل ۳ است. واحدها و نمادهای پارامترهای به‌کاررفته مطابق جدول ۱ هستند. سایر فرض‌های مدل‌سازی عددی نیز مطابق جدول ۲ هستند. در مدل‌سازی عددی هفت پارامتر مورد بررسی به همراه مقادیر پایه‌ای آن‌ها در جدول ۳ فهرست شده‌اند.



شکل ۱: چاه نفت حفر شده و محیط خارجی مدل به همراه مش‌بندی فضای برجای اطراف چاه

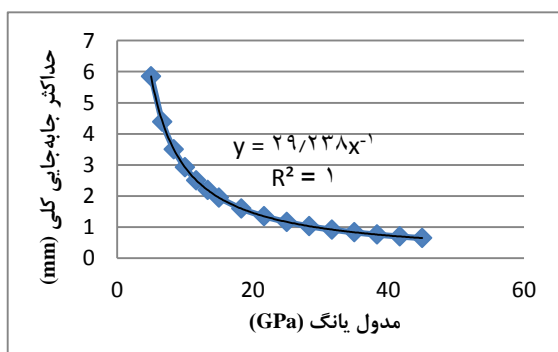
جدول ۳: پارامترهای مورد بررسی در تحلیل حساسیت و مقادیر اولیه آن‌ها

مقدار	پارامتر
۱۵	$E(MPa)$
۰/۲۵	ν
۲	$C(MPa)$
۱۴	$\varphi(deg)$
۲۱	$P_w(MPa)$
۲۱	$P_p(MPa)$
۱	K
۵۰	$\sigma_H(MPa)$
۵۰	$\sigma_h(MPa)$

نسبت تنش‌های جانبی

پس از حل مدل‌های مربوط به هر پارامتر، یک نمودار رسم می‌شود که محور افقی آن نشان‌دهنده پارامتر مورد نظر و محور عمودی آن نشان‌دهنده حداکثر جابه‌جایی کلی است. سپس معادله مناسب بر روی نمودار حداکثر جابه‌جایی کلی و پارامتر مورد نظر برازش داده می‌شود و با استفاده از رابطه (۲) تابع حساسیت پارامتر مربوطه محاسبه می‌گردد. مدل‌های ساخته‌شده در نرم‌افزار حل‌شده و بر اساس نتایج حاصل از آن‌ها نمودارهای حداکثر جابه‌جایی کلی دیواره چاه بر حسب مقادیر مختلف هر یک از پارامترهای تغییر یافته در محدوده تغییرات خود رسم شده‌اند (شکل ۶ تا شکل ۱۱).

با استفاده از رابطه (۲) تابع حساسیت هر پارامتر به دست آمده است. روابط مربوط به هر پارامتر و توابع حساسیت مربوط به آن‌ها مطابق روابط (۵) تا (۱۸) هستند. لازم به ذکر است در مورد نسبت تنش‌های افقی جانبی از آنجاکه نمودار مربوطه (شکل ۹) روند یکسان نداشته و قابل تقسیم به دو بازه صعودی و نزولی است، هر یک از دو بازه به صورت جداگانه بررسی می‌شوند. بیشترین ناپایداری در $K = 1.67$ رخ داده و در نتیجه مقادیر K به دو بازه صعودی و نزولی تقسیم‌شده و به ترتیب در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ قابل مشاهده‌اند.



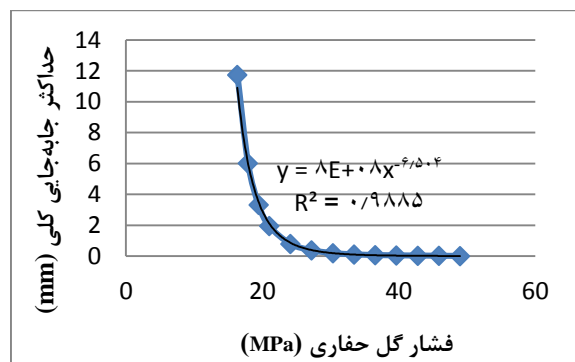
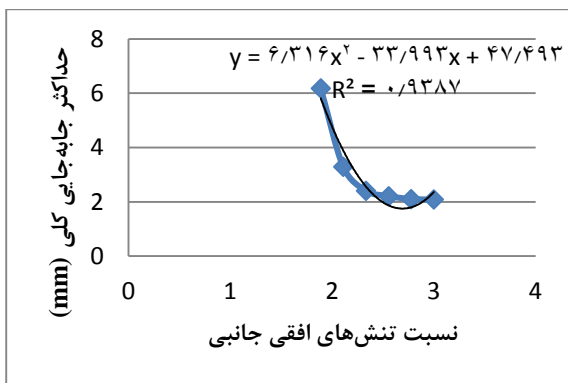
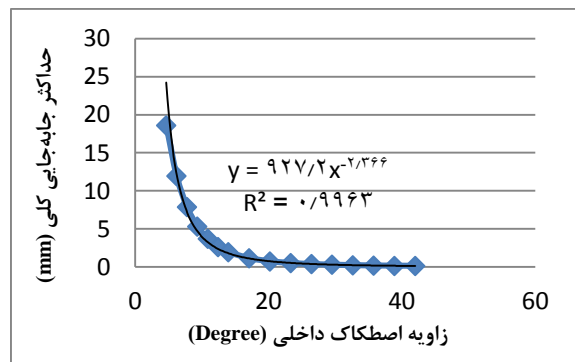
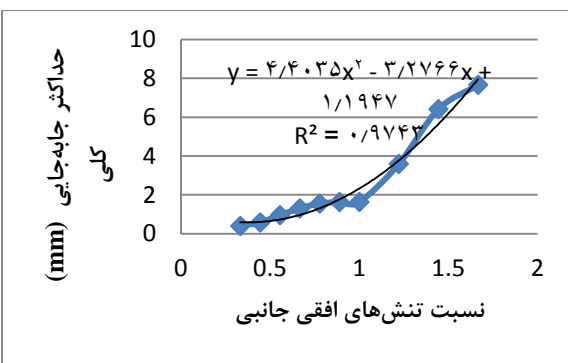
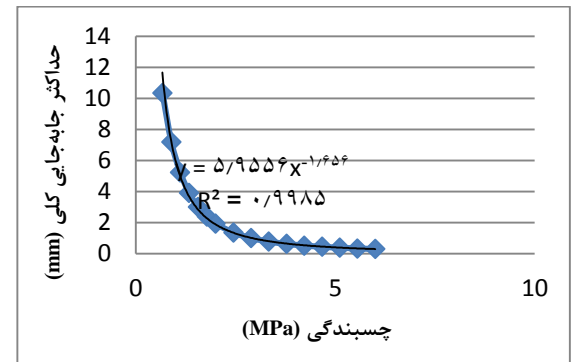
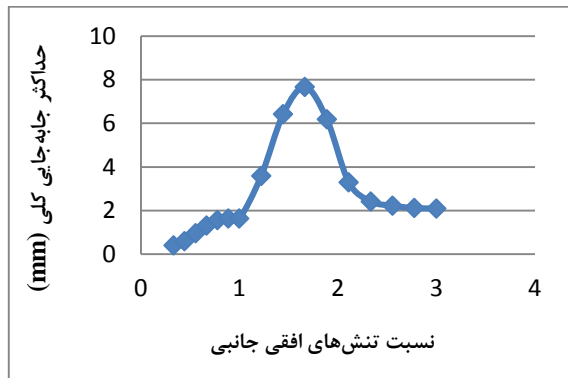
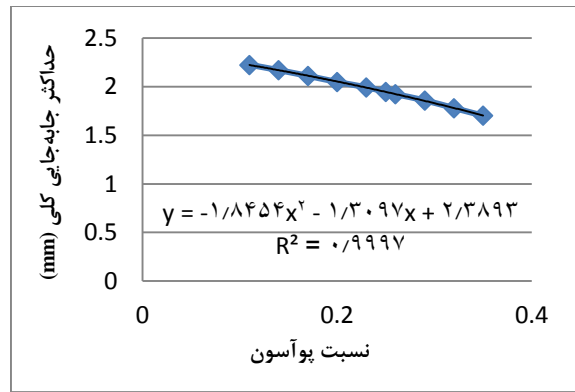
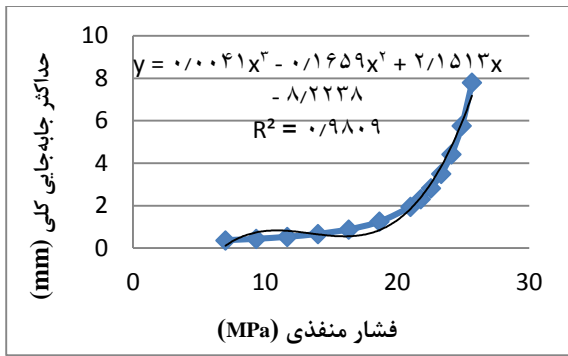
شکل ۴: نمودار $u - E$

جدول ۲: فرض‌های کمی مدل‌سازی عددی

مقدار	پارامتر
۰/۱	$d_w(m)$
۱۰/۷۹۱	$\gamma_{PF} \left(\frac{kN}{m^3}\right)$
۵	$\sigma_T(MPa)$
۵	$\sigma_{T_r}(MPa)$
۱۴	$\varphi_r(deg)$
۲	$C_r(MPa)$

۳- مدل‌سازی عددی و بحث

روش‌های عددی گوناگونی برای تحلیل پایداری توده سنگ‌ها موجود است. پرکاربردترین آن‌ها روش اجزا محدود (FEM)^۵، روش اجزای مرزی (BEM)^۶، روش اجزای مجزا (DEM)^۷ و روش‌های ترکیبی هستند [۲۱]. حیدری و همکاران با استفاده از FEM به بررسی راستای بهینه حفاری پرداختند [۲۲]. عبدالهی پور و همکاران اثر رژیم‌های تنشی را بر میزان تولید ماسه بررسی نمودند [۲۳]. میبیدی و همکاران نیز روش مناسب حفر تونل را شبیه‌سازی نمودند [۲۴]. در این مقاله، حساسیت هفت پارامتر در پایداری چاه بررسی می‌گردد. از حداکثر جابه‌جایی کلی^۸ دیواره چاه به‌عنوان معیار پایداری چاه استفاده خواهد شد. با توجه به آنیزوتروپی تنش امکان جابه‌جایی این نقطه روی دیواره وجود دارد. لازم به ذکر است که در این پژوهش، گره‌ای خاص برای بررسی جابه‌جایی انتخاب نشده و پارامتر معرف پایداری چاه، حداکثر جابه‌جایی کلی دیواره است. همچنین پیش‌ازین نیز در مطالعات دیگری این پارامتر به‌عنوان معیار پایداری چاه در نظر گرفته شده است [۲۵ و ۲۶]. «مدل پایه» با قرار دادن «مقادیر پایه» نشان داده‌شده در جدول ۳ در مدل عددی ایجاد می‌شود. سپس با ثابت نگاه‌داشتن تمامی پارامترها و تغییر یک پارامتر در محدوده تغییرات خود میزان تغییرات پایداری چاه با اندازه‌گیری جابه‌جایی دیواره بررسی می‌شود. این بازه برای ν و P_w به ترتیب از ۰/۱۱ تا ۰/۳۵ و از ۱۱/۶۷ تا ۴۹ مگا پاسکال بر اساس محدوده رایج این پارامترها و فرض کمتر بودن همیشگی فشار منفذی از تنش افقی حداقل در نظر گرفته شده است. برای سایر پارامترها نیز از یک‌سوم تا سه برابر مقدار پایه آن پارامتر در نظر گرفته شده است.



$$S_{P_p} = \frac{0.01P_p^3 - 0.3P_p^2 + 2.2P_p}{0.004P_p^3 - 0.2P_p^2 + 2.2P_p - 8.2} \quad (10)$$

رابطه حداکثر جابه‌جایی کلی با نسبت تنش‌های جانبی و تابع حساسیت آن:

$$u = 4.4K^2 - 3.3K + 1.2 \quad K \leq 1.667 \quad (17)$$

$$u = 6.3K^2 - 34.0K + 47.5 \quad K > 1.667$$

$$S_K = \frac{8.8K^2 - 3.3K}{4.4K^2 - 3.3K + 1.2} \quad K < 1.667 \quad (18)$$

$$S_K = \frac{12.6K^2 - 34.0K}{6.3K^2 - 34.0K + 47.5} \quad K \geq 1.667$$

پس از به‌دست آوردن تابع حساسیت برای هر پارامتر و جایگذاری مقدار پایه‌ای آن در تابع حساسیت پارامتر، مقدار ضریب حساسیت آن پارامتر به‌دست می‌آید. ضرایب حساسیت پارامترها، اعدادی هستند که نشان‌دهنده میزان تأثیرگذاری هر پارامتر در پایداری چاه بوده و در جدول ۴ فهرست شده‌اند.

جدول ۴: ضرایب حساسیت پارامترهای موردبررسی

ضریب حساسیت	پارامتر
۱/۰۰۰۰	E
۰/۲۸۶۷	ν
۱/۶۵۶۰	C
۲/۳۶۶۰	φ
۶/۵۰۴۰	P_w
۷/۲۴۵۲	P_p
۲/۳۸۲۲	$K < 1.67$
۱/۰۷۸۰	$K > 1.67$

۴- نتایج و بحث

با توجه به اینکه ضرایب حساسیت بی‌بعد هستند، می‌توان به‌راحتی برای مقایسه میزان تأثیر پارامترهای مختلف با واحدهای مختلف از این ضرایب استفاده نمود. با توجه به شکل ۳ و روابط (۵) و (۶) مشخص است که ضریب حساسیت مدول یانگ همواره برابر یک بوده و به مقدار آن بستگی ندارد.

از آنجاکه ضریب حساسیت E برابر با یک است هر مقدار خطای نسبی در مدول یانگ منجر به همان مقدار خطای نسبی در تخمین پایداری (حداکثر جابه‌جایی کلی (u))

رابطه حداکثر جابه‌جایی کلی با مدول الاستیسیته و تابع حساسیت آن:

$$u = \frac{29.238}{E} \quad (5)$$

$$S_E = \frac{29.238 E}{E^2} \frac{1}{u} = \frac{29.238}{Eu} = 1 \quad (6)$$

رابطه حداکثر جابه‌جایی کلی با نسبت پوآسون و تابع حساسیت آن:

$$u = -1.8454\nu^2 - 1.3097\nu + 2.3893 \quad (1)$$

$$S_\nu = (3.7\nu + 1.3) \frac{\nu}{u} = \frac{3.7\nu^2 + 1.3\nu}{-1.8\nu^2 - 1.3\nu + 2.4} \quad (2)$$

رابطه حداکثر جابه‌جایی کلی با ضریب چسبندگی و تابع حساسیت آن:

$$u = 5.9556C^{-1.656} \quad (3)$$

$$S_C = 9.8625C^{-2.656} \frac{C}{u} = \frac{9.8625C^{-1.656}}{5.9556C^{-1.656}} = 1.656 \quad (4)$$

رابطه حداکثر جابه‌جایی کلی با زاویه اصطکاک داخلی و تابع حساسیت آن:

$$u = 927.2\varphi^{-2.366} \quad (5)$$

$$S_\varphi = 2193.8\varphi^{-3.366} \frac{\varphi}{u} = \frac{2193.8\varphi^{-2.366}}{927.2\varphi^{-2.366}} = 2.366 \quad (6)$$

رابطه حداکثر جابه‌جایی کلی با فشار گل حفاری و تابع حساسیت آن:

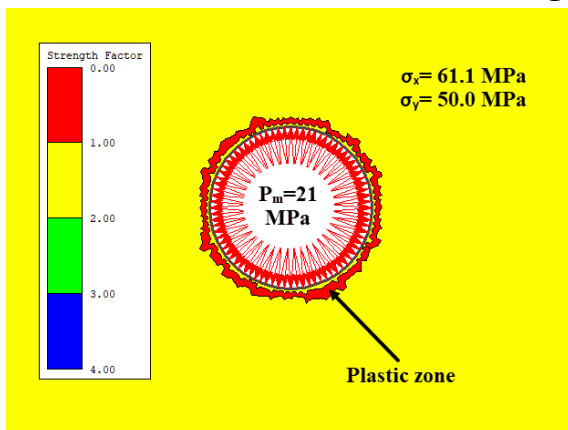
$$u = 8 \times 10^8 P_w^{-6.504} \quad (7)$$

$$S_{P_w} = 5.2 \times 10^9 P_w^{-7.504} \frac{P_w}{u} = \frac{5.2 \times 10^9 P_w^{-6.504}}{8 \times 10^8 P_w^{-6.504}} = 6.504 \quad (8)$$

رابطه حداکثر جابه‌جایی کلی با فشار منفذی و تابع حساسیت آن:

$$u = 0.004P_p^3 - 0.2P_p^2 + 2.2P_p - 8.2 \quad (9)$$

و پلاستیک تقسیم نمود. محدوده الاستیک شامل $K = 0.33$ تا $K = 1.67$ و محدوده پلاستیک شامل $K = 1.67$ تا $K = 3$ می‌شود. در محدوده الاستیک، ضریب حساسیت K برابر با $2/3822$ بوده و بعد از فشار منفذی و فشار گل مورد استفاده از بالاترین اهمیت برخوردار است. اما در محدوده پلاستیک، ضریب حساسیت K برابر با $1/078$ بوده با توجه به شکل ۱۰ و شکل ۱۱ در مقادیر پایین‌تر K ، با افزایش آن، جابجایی‌ها نیز زیاد می‌شود، اما از محدوده $K = 1.67$ با افزایش K شیب نمودار کاهش یافته و به حالت افقی میل می‌کند. این موضوع می‌تواند بدلیل اثر تنش محصور کننده قویتر در نسبت تنش‌های بالاتر و ایجاد مقاومت ظاهری بالاتر در سنگ باشد. لذا تأثیر این پارامتر در پایداری چاه در محدوده پلاستیک کمتر از حالت الاستیک است. شکل ۱۳ ناحیه پلاستیک بوجود آمده اطراف چاه را برای $K=1.22$ با ثابت بودن دیگر پارامترها در مقادیر پایه نشان می‌دهد.



شکل ۱۳: ناحیه پلاستیک ایجاد شده اطراف چاه در $K=1.22$

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی حساسیت هفت پارامتر در پایداری چاه پرداخته شد. حداکثر جابه‌جایی کلی دیواره چاه به‌عنوان معیاری از پایداری آن در نظر گرفته شده و اثر هر یک از این هفت پارامتر بر حداکثر جابه‌جایی کلی بررسی شد. این بررسی به‌وسیله مدل‌سازی عددی و در نرم‌افزار Phase2 انجام شد. برای تحلیل حساسیت هر پارامتر مقدار سایر پارامترها را ثابت نگه داشته و مقدار پارامتر مزبور در محدوده‌ای خاص تغییر داده شد. بین مقادیر حداکثر جابه‌جایی کلی به‌دست آمده از حل مدل توسط نرم‌افزار رابطه‌ای یافت شد، تابع حساسیت پارامتر مربوطه محاسبه

خواهد شد. مثلاً ۱۰ درصد خطا در مدول یانگ باعث ۱۰ درصد خطا در حداکثر جابه‌جایی کلی می‌شود. ضریب حساسیت چسبندگی نیز مشابه مدول یانگ مقداری ثابت (برابر $1/656$) بوده و به مقدار C بستگی ندارد. با توجه به مقدار ضریب حساسیت، این پارامتر همواره اهمیت بیشتری نسبت به مدول یانگ دارد.

بر اساس جدول ۴ ضریب پواسون کمترین حساسیت را نسبت به دیگر پارامترها در تعیین پایداری چاه دارد.

ضریب حساسیت زاویه اصطکاک داخلی همواره برابر $2/366$ بوده و به مقدار ϕ بستگی ندارد. در نتیجه مثلاً ۱۵ درصد خطا در ϕ منجر به $35\% = 15\% \times 2.366$ خطا در حداکثر جابه‌جایی کلی (u) می‌شود.

بر اساس نتایج جدول ۴ فشار منفذی و فشار گل مورد استفاده بیشترین تأثیر را بر پایداری چاه از خود نشان می‌دهند. فشار منفذی با ضریب حساسیت $7/24$ و فشار گل با $6/5$ حساس‌ترین پارامترها در طراحی یک چاه می‌باشند. به این ترتیب تنها ۱۰ درصد خطا در تعیین هر یک از این پارامترها می‌تواند موجب به‌ترتیب $72/4$ درصد و 65 درصد خطا در اندازه‌گیری جابه‌جایی حداکثر دیواره گردد. این موضوع اهمیت اندازه‌گیری صحیح فشار منفذی و تعیین پنجره گل مناسب را گوشزد می‌نماید.

مقدار تابع حساسیت فشار منفذی (P_f) در شرایط حدی در بینهایت به مقدار ۳ میل می‌کند.

با توجه به نمودار $u - K$ در شکل ۹، حداکثر جابه‌جایی کلی از ابتدای بازه مورد بررسی یعنی $K = 0.33$ تا $K = 1.67$ روند صعودی و از $K = 1.67$ تا انتهای بازه مورد بررسی یعنی $K = 3$ روند نزولی دارد. دلیل این که دو بازه صعودی و نزولی وجود دارد این است که در صورتی که مقادیر تنش‌های افقی جانبی پایین باشد توده‌سنگ اطراف چاه در حالت الاستیک قرار داشته و حداکثر جابه‌جایی کلی با تنش‌ها رابطه مستقیم دارد، اما با بالا رفتن مقادیر تنش‌ها توده‌سنگ اطراف چاه به حالت پلاستیک درآمده و با بالا رفتن مقادیر تنش‌ها جابه‌جایی در دیواره چاه کاهش می‌یابد. در نتیجه دو بخش صعودی (الاستیک) و نزولی (پلاستیک) به‌صورت جداگانه و به‌ترتیب در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ و برای آن‌ها روابط (۱۷) و (۱۸) به‌دست آمدند.

از شکل ۹ تا شکل ۱۱ و روابط (۱۷) و (۱۸) می‌توان به این نتیجه رسید که محدوده مورد بررسی برای نسبت تنش‌های افقی جانبی (K) را می‌توان به‌دو محدوده الاستیک

- [2] M. K. Medetbekova, M. R. Hajiabadi, A. Brovelli, H. F. Christensen, and H. M. Nick, "An integrated rock-mechanics tests and numerical modelling of chalk rocks: An improved integrated workflow for borehole safety," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 208, no. PA, p. 109365, 2022, doi: 10.1016/j.petrol.2021.109365.
- [3] M. Aslannezhad, A. Kalantariasl, and A. Keshavarz, "Borehole stability in shale formations: Effects of Thermal-Mechanical-Chemical parameters on well design," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 88, no. February, p. 103852, 2021, doi: 10.1016/j.jngse.2021.103852.
- [4] L. Ding, Z. Wang, Y. Wang, and B. Liu, "Thermo-poro-elastic analysis: The effects of anisotropic thermal and hydraulic conductivity on borehole stability in bedding formations," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 190, no. February, p. 107051, 2020, doi: 10.1016/j.petrol.2020.107051.
- [5] A. Khaksar, M. Aghayari, and B. Sabir, "Stability analysis and trajectory optimization of vertical and deviated boreholes using the extended-Mogi-Coulomb criterion and poly-axial test data," *Upstream Oil Gas Technol.*, vol. 7, no. April, p. 100052, 2021, doi: 10.1016/j.upstre.2021.100052.
- [6] Y. Hao, "Borehole Stability in Mudstone Shale and Coal Seams in the Daniudi Gas Field," *Chem. Technol. Fuels Oils*, vol. 52, no. 2, pp. 185–193, 2016, doi: 10.1007/s10553-016-0689-y.
- [7] Y. Jin *et al.*, "Analysis of the vertical borehole stability in anisotropic rock formations," *J. Pet. Explor. Prod. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 197–207, 2012, doi: 10.1007/s13202-012-0033-y.
- [8] L. Ding, Z. Wang, B. Liu, and J. Lv, "Assessing borehole stability in bedding-parallel strata: Validity of three models," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 173, no. October 2018, pp. 690–704, 2019, doi: 10.1016/j.petrol.2018.10.065.
- [9] A. Abdollahipour, M. Fatehi Marji, A. Yarahmadi Bafghi, and J. Gholamnejad, "Simulating the propagation of hydraulic fractures from a circular wellbore using the Displacement Discontinuity Method," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 80, pp. 281–291, 2015, doi: 10.1016/j.ijrmms.2015.10.004.
- [10] A. Abdollahipour, M. Fatehi Marji, A. Yarahmadi Bafghi, and J. Gholamnejad, "DEM simulation of confining pressure effects on crack opening displacement in hydraulic fracturing," *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 26, no. 4, pp. 557–561, 2016, doi: 10.1016/j.ijmst.2016.05.004.
- [11] M. Lak, M. Fatehi Marji, A. Yarahmadi Bafghi, and A. Abdollahipour, "A coupled finite difference-boundary element method for modeling the propagation of explosion-induced radial cracks around a wellbore," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 64, no. January, pp. 41–51, 2019, doi:

شد. مقدار پایه‌ای پارامتر در تابع حساسیت آن جایگذاری شده و ضریب حساسیت آن محاسبه و در جدول ۴ فهرست شد. با مقایسه ضرایب حساسیت پارامترها با یکدیگر به‌طور خلاصه، نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- پارامترهای مورد بررسی به‌ترتیب از حساسیت زیاد به‌کم عبارت‌اند از: فشار منفذی، فشار گل حفاری، نسبت تنش‌های افقی جانبی، زاویه اصطکاک داخلی، ضریب چسبندگی، مدول یانگ و نسبت پوآسون، که این نشان دهنده ترتیب و میزان اهمیت آن‌ها در مقایسه با یکدیگر است.
- ۲- حساسیت دو پارامتر فشار منفذی و فشار گل حفاری در مقایسه با سایر پارامترها به‌طور قابل توجهی بالاتر بوده و به‌طور میانگین حدوداً ۴/۵ برابر مهم‌تر از سایر پارامترهاست که این نشان می‌دهد که در طراحی چاه‌های نفت باید به‌این دو پارامتر در مقایسه با سایر پارامترها توجه بسیار بالاتری داشت.
- ۳- پارامترها را می‌توان به‌دو دسته پارامترهای با حساسیت بالا شامل: P_p و P_w و پارامترهای با حساسیت پایین شامل: K ، φ ، C ، E و ν تقسیم نمود. دسته اول به‌طور میانگین ضریب حساسیتی برابر با ۶/۸۷۴۶ و دسته دوم به‌طور میانگین ضریب حساسیتی برابر ۱/۵۳۸۲ دارند.
- ۴- مهم‌ترین پارامتر فشار منفذی بوده که ضریب حساسیت آن برابر ۷/۲۴۵۲ بوده و در مقایسه با کم‌اهمیت‌ترین پارامتر مورد مطالعه یعنی نسبت پوآسون (با ضریب حساسیت ۰/۲۸۶۷) حدوداً ۲۵ برابر مهم‌تر بوده که این بازتاب‌دهنده میزان توجه مورد نیاز به‌این پارامتر در طراحی چاه در مقایسه با دیگر پارامترهاست.
- ۵- ضریب حساسیت نسبت تنش‌های افقی جانبی ۱/۰۰۷ برابر زاویه اصطکاک داخلی بوده که این نشان از برابری تقریبی اهمیت این دو پارامتر دارد.

مراجع

- [1] R. M. Holt, I. Larsen, E. Fjær, and J. F. Stenebråten, "Comparing mechanical and ultrasonic behaviour of a brittle and a ductile shale: Relevance to prediction of borehole stability and verification of shale barriers," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 187, no. November 2019, p. 106746, 2020, doi: 10.1016/j.petrol.2019.106746.

10.1016/J.ENGFAILANAL.2020.105203.

- [20] A. Abdollahipour, H. Soltanian, Y. Pourmazaheri, E. Kazemzadeh, and M. Fatehi-Marji, "Sensitivity analysis of geomechanical parameters affecting a wellbore stability," *J. Cent. South Univ.*, vol. 26, no. 3, pp. 768–778, 2019, doi: 10.1007/s11771-019-4046-2.
- [21] J. Zhao and W. Zhu, *Stability Analysis and Modelling of Underground Excavations in Fractured Rocks*. 2003.
- [22] M. Heydari, M.R. Aghakhani Emamqeyasi, M. Sanei, Finite element analysis of wellbore stability and optimum drilling direction and applying NYZA method for a safe mud weight window, *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 11 (2022) 67–76.
- [23] A. Abdollahipour, A. Kargar, M. Fatehi-Marji, Numerical modeling of the effect of Anderson's stress regimes on the volume of sand production in oil wellbores, *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 13 (2023) 31–38.
- [24] E. Emami Meybodi, J. Hajibagheri Foroshani, F. Kargar Bafghi, Numerical modeling for Selection of appropriate tunneling method in S station of Isfahan subway, *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering* 11 (2022) 27–40.
- [25] W. S. Zhu *et al.*, "A study on sidewall displacement prediction and stability evaluations for large underground power station caverns," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 47, no. 7, pp. 1055–1062, 2010, doi: 10.1016/j.ijrmms.2010.07.008.
- [26] A. Abdollahipour and R. Rahmancejad, "Investigating the effects of lateral stress to vertical stress ratios and caverns shape on the cavern stability and sidewall displacements," *Arab. J. Geosci.*, vol. 6, no. 12, pp. 4811–4819, 2013, doi: 10.1007/s12517-012-0698-z.
- 10.1016/j.jngse.2019.01.019.
- [12] H. Yousefian, H. Soltanian, M. F. Marji, A. Abdollahipour, and Y. Pourmazaheri, "Numerical simulation of a wellbore stability in an Iranian oilfield utilizing core data," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 168, no. February, pp. 577–592, 2018, doi: 10.1016/j.petrol.2018.04.051.
- [13] T. Ma, Y. Zhang, Y. Qiu, Y. Liu, and Z. Li, "Effect of parameter correlation on risk analysis of wellbore instability in deep igneous formations," *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 208, no. PC, p. 109521, 2022, doi: 10.1016/j.petrol.2021.109521.
- [14] F. Zhang, H. Liu, Y. Meng, S. Cui, and H. Ye, "Study on Wellbore Stability and Failure Regions of Shale considering the Anisotropy of Wellbore Seepage," vol. 2021, 2021.
- [15] A. Abdollahipour and R. Rahmancejad, "Sensitivity analysis of influencing parameters in cavern stability," *Int. J. Min. Sci. Technol.*, vol. 22, no. 5, pp. 707–710, 2012, doi: 10.1016/j.ijmst.2012.08.020.
- [16] R. Bhasin and K. Høeg, "Parametric study for a large cavern in jointed rock using a distinct element model (UDECB-BB)," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 35, no. 1, pp. 17–29, 1998, doi: 10.1016/S0148-9062(97)00312-4.
- [17] X. HAN, M. chao HE, and B. ZHANG, "Sensitivity analysis for parameters of a monitoring system for steep slopes of open-pit mines," *Min. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 4, pp. 441–445, 2009, doi: 10.1016/S1674-5264(09)60082-X.
- [18] P. Starzec and J. Andersson, "Application of two-level factorial design to sensitivity analysis of keyblock statistics from fracture geometry," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 39, no. 2, pp. 243–255, 2002, doi: 10.1016/S1365-1609(02)00026-6.
- [19] H. Patel and S. Salehi, "Structural integrity of liner cement in oil & gas wells: Parametric study, sensitivity analysis, and risk assessment," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 122, Apr. 2021, doi:

⁵ Finite element method

⁶ Boundary element method

⁷ Discrete element method

⁸ Maximum total displacement

¹ Ding

² Hao

³ Starzec & Andersson

⁴ Patel