نشریه‌ی علمی-پژوهشی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره پنجم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۰، صفحه ۵۳ تا ۶۲

# بررسی پایداری دیواره چاه انحرافی به کمک روش ارزیابی کمی ریسک در یکی از میادین جنوب غرب ایران

**رسول حیدری[۱]؛ حسین جلالی فر[۲*]؛ جواد کسروی[۱]**
۱- کارشناسی ارشد مهندسی نفت، شرکت حفاری، شرکت ملی حفاری ایران
۲- استاد بخش مهندسی نفت، دانشگاه شهید باهنر کرمان

**دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۲۸؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۳۰**

**چکیده**

در این تحقیق از داده های هفت حلقه چاه بمنظور بررسی و مدل‌سازی پایداری دیواره چاه انحرافی در حفاری سازند شیلی یکی از بزرگترین میادین نفتی جنوب غرب ایران استفاده شده است. مشکلات ناپایداری دیواره چاه باعث تحمیل هزینه های گزاف و تأخیر در پیشبرد برنامه توسعه میدان شده است. بنابراین بمنظور ساخت مدل مکانیکی زمین، چاه دارای اطلاعات کامل نمودارهای پتروفیزیکی، زمان گذر موج طولی و برشی انتخاب گردید. روابط مناسبی به منظور تخمین داده‌های استاتیک ژئومکانیکی میدان مورد مطالعه ارائه می شود که به کمک داده‌های آزمایشگاهی (مغزه) اعتبارسنجی شده است. فشار منفذی سازند جزء اصلی‌ترین پارامترهای ورودی ساخت مدل مکانیکی است که رابطه تخمین بوسیله داده‌های واقعی نمودار RDT اعتبارسنجی گردید. بمنظور محاسبه مقادیر تنش های اصلی و تعیین رژیم تنشی منطقه، تنش افقی حداقل و حداکثر بترتیب به کمک داده آزمایش نشت سازند (LOT) و محل های ریزش دیواره چاه در نمودار تصویری اعتبارسنجی گردید. با بررسی نمودارهای تصویری و آنالیز ۸۹ مورد ریزش دیواره چاه و شکست القائی، امتداد تنش های افقی با دقت بالا مشخص شده است. سپس با استفاده از آنالیز عددی و تحلیلی پایداری دیواره چاه، به کمک معیار شکست موهر-کلمب، حداقل وزن گل مورد نیاز در آزیموت و زاویه های مختلف چاه انحرافی محاسبه گردید. وزن گل پیش بینی شده توسط داده های واقعی حفاری چهار حلقه چاه مجاور در میدان مورد نظر اعتبارسنجی شده است. در مرحله آنایز کمی ریسک هدف بررسی تاثیر میزان عدم قطعیت پارامترهای اصلی (متغیرهای ورودی رابطه تعیین حداقل وزن گل مورد نیاز بر اساس معیار شکست موهر-کلمب) و حساسیت آن‌ها در افزایش درصد موفقیت و کاهش شکست می‌باشد. در روش آنالیز کمی ریسک از روش شبیه سازی مونت کارلو استفاده شده است و نتایج در نمودار تورنادو نمایش داده می شود.

**واژگان کلیدی**

**پایداری دیواره چاه، مدل مکانیکی زمین، تنش افقی حداقل و حداکثر، آنالیز کمی ریسک، روش مونت کارلو، نمودار تورنادو.**

## ۱- مقدمه

در عملیات‌های حفاری، تعیین مناسب وزن گل در جلوگیری از ناپایداری دیواره چاه نیاز است. داده‌های ورودی اولیه به منظور تخمین پنجره ایمن گل شامل پارامترهای الاستیک و مقاومتی سنگ، فشار منفذی و تنش‌های درجا می‌باشد [۱]. داده‌های ورودی اولیه از آنالیز داده‌های نمودارگیری محاسبه می‌شوند و به وسیله نتایج آزمایشگاهی مغزه کالیبره و

*نویسنده مسئول: استاد دانشگاه شهید باهنر کرمان،
پست الکترونیک: jalalifar@uk.ac.ir

اعتبارسنجی می‌گردند [۲]. امروزه در تمام برنامه‌ریزی‌های چاه تقابلی بین علم و اقتصاد به وجود آمده است. ناپایداری دیواره چاه باعث عدم تولید از چاه می‌شود که نیازمند صرف زمان و هزینه خواهد بود. کاهش زمان‌های عدم تولید از چاه باید نقش بسیار مهمی در برنامه‌ریزی‌های پیشگیرانه چاه داشته باشند که می‌توان با شناسایی ریسک‌های حفاری و پدیده‌های زمین‌شناسی به این منظور دست یافت. تهیه مدل مکانیکی زمین در فاز برنامه‌ریزی چاه و اصلاح نمودن این مدل در زمان واقعی تولید می‌تواند بسیاری از هزینه‌های مربوط به چاه را کاهش دهد. مدل مکانیکی مناسب نیاز به سه فاز ساخت اولیه، اصلاح کردن مدل در زمان تولید و اعمال واقعی مدل در چاه می‌باشد. روش‌های آماری بر اساس آنالیز کمی ریسک در دهه‌های اخیر به عنوان ابزاری جهت تعیین میزان عدم قطعیت در تخمین پارامترهای نفتی کاربرد دارند [۳].

## ۲- بررسی زمین‌شناسی

میدان نفتی مورد مطالعه جزء یکی از میادین جنوب غرب ایران است که رسوبگذاری این میدان نفتی به دوره زمین‌شناسی هلوسن مربوط می‌باشد. اغلب لیتولوژی سازندهای تشکیل‌دهنده در حفره مخزنی ۱/۲-۸ اینچ عبارتند از لایمستون، سنگ رسی همراه با زیر لایه‌های آندریت، لایه‌های نمکی و شیلی. سازند مورد بررسی که دارای مشکلات ناپایداری می‌باشد، دارای حدود ۵/۶ درصد شیل و ضخامت تقریبی ۳۷ متر می‌باشد. این لایه حاوی شیل، زمانی مشکلات بسیار زیادی و جبران‌ناپذیری ایجاد می‌نماید که به صورت انحرافی با امتداد و زاویه نامناسب حفاری می‌گردد.

## ۳- مدل مکانیکی زمین

مدل مکانیکی زمین، مدلی عددی بمنظور محاسبه پارامترهای مقاومتی، خواص الاستیک سنگ، فشار منفذی سازند و وضعیت عددی تنش‌های درجا است [۱]. در مدل مکانیکی زمین، پارامترهای ورودی مدل بر اساس داده‌های نمودارگیری تعیین می‌شوند و سپس بوسیله نتایج آزمایشات مغزه مربوط به میدان مورد بررسی اعتبارسنجی می‌گردند [۲]. تعیین مقادیر دینامیک پارامترهای الاستیک سنگ با استفاده از داده‌های ابزار موج صوتی حاصل می‌گردد، در حالی که پارامتر مدول یانگ ($E$) و ضریب پواسون ($v$) با استفاده از مقادیر سرعت موج طولی و برشی همراه با مقادیر دانسیته لایه‌های زمین محاسبه می‌گردد [۳]. لازم بذکر است که مدول‌های الاستیک دینامیک دارای مقادیر بیشتری هستند و باید به مدول‌های استاتیک تبدیل شوند [۴]. روابط بسیار زیادی بمنظور محاسبه مدول‌های استاتیک در میادین و سازندهای گوناگون ارائه شده است. مدول یانگ لایه‌های زیرزمینی با استفاده از روابط الاستیک دینامیک محاسبه می‌شوند [۳] و سپس بوسیله معادلات پیشنهادی *Wang (2001)* به مدول یانگ استاتیک تبدیل می‌شوند [۵]. نتایج حاصل شده از روابط پیشنهادی تخمین مدول یانگ استاتیک بوسیله داده‌های آزمایشگاهی مغزه کالیبره و اعتبارسنجی می‌شوند. با بررسی انجام شده، رابطه (۱) بعنوان معادله مناسب جهت تخمین مدول یانگ استاتیک در چاه قائم ($A$) در میدان مورد بررسی معرفی می‌گردد. نسبت پواسون دینامیک بوسیله روابط الاستیک دینامیک محاسبه می‌شود [۳]. نسبت پواسون دینامیک بر خلاف مدول یانگ استاتیک، اختلاف زیادی با مقادیر استاتیک ندارند [۵-۷]. بنابراین بمنظور کاهش عدم قطعیت و افزایش دقت در تخمین نسبت پواسون، روابط الاستیک دینامیک بوسیله‌ی داده‌های آزمایشگاهی مغزه (چاه $B$) کالیبره و اعتبارسنجی می‌گردد و رابطه (۲) بمنظور تخمین مقادیر استاتیک نسبت پواسون در چاه قائم ($A$) معرفی می‌شود. مقاومت تک محوره سنگ ($UCS$) از جمله مهم‌ترین پارامترهای مکانیک‌سنگی مورد نیاز بمنظور آنالیز پایداری دیواره چاه است [۸]. این پارامتر در آزمایشگاه بوسیله‌ی آزمایشات مخرب مکانیکی بر روی مغزه‌های سنگی محاسبه می‌شود. مغزه‌های سنگی در یک چاه بصورت بسیار پراکنده تهیه می‌گردند. بنابراین معمولا از روابط تجربی و استفاده از داده‌های نمودارگیری بمنظور محاسبه پارامتر مقاومتی سنگ استفاده می‌شود [۹]. این روابط تجربی باید بوسیله نتایج داه‌های آزمایشگاهی مغزه که در فواصل گوناگون از دیواره چاه تهیه شده است، کالیبره و اعتبارسنجی گردد. پارامتر مقاومت تک محوره سنگ در سازندهای گوناگون چاه قائم ($A$) بوسیله رابطه پیشنهاد شده *Bradford et al., (1998)* تخمین زده شد و توسط داده-های آزمایشگاهی مغزه مربوط به چاه ($B$) بعد از انطباق

عمق، کالیبره و اعتبارسنجی شد. رابطه (۳) بعنوان رابطه تخمین مقاومت تک محوره سنگ در چاه قائم ($A$) در میدان مورد بررسی معرفی می‌گردد. که $E_{dyn.}$، $E_{sta.}$، $\nu_{sta.}$، $\Delta t_p$، $\Delta t_s$، $UCS$ و $Nphi$ به ترتیب مدول یانگ دینامیک (گیگا پاسکال) و مدول یانگ استاتیک (گیگا پاسکال)، نسبت پواسون، زمان گذر موج طولی ($\mu s/ft$) و زمان گذر موج برشی ($\mu s/ft$)، مقاومت فشاری تک محوره سنگ (کیلو پاسکال) و مقادیر نمودار نوترون می‌باشند.

$$E_{sta.} = (0.4 \times E_{dyn.}) - 3.5 \quad (۱)$$

$$\nu_{sta.} = 0.5 \times [(\Delta t_s^2 - 2\Delta t_p^2)/(\Delta t_s^2 - \Delta t_p^2)] - 0.13 \quad (۲)$$

$$UCS = 286423 \times e^{-17.23\, Nphi} \quad (۳)$$

پارامتر فشار منفذی از پارامترهای بسیار مهم است که در زمان حفاری و تولید مخازن هیدروکربنی باید تعیین گردد. پارامتر فشار منفذی از پارامترهای اصلی در ساخت مدل مکانیکی زمین است و معمولاً با استفاده از آنالیز داده‌های چاه‌پیمایی تخمین زده می‌شود. هرگونه اشتباه در تخمین این پارامتر ممکن است موجب فواران چاه، هرزروی جزئی تا شدید گردد [۱۰]. تخمین مستقیم فشار منفذی سازند با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری بسیار هزینه‌بر و زمان‌بر می‌باشد [۱۱]. علاوه بر موارد ذکر شده، داده‌های مربوط به ابزارهای اندازه‌گیری محدود به فواصل مشخصی از دیواره چاه اس. بنابراین تخمین فشار منفذی سازند بصورت غیر مستقیم و با استفاده از خصوصیات فیزیکی سازند حاصل از داده‌های نمودارگیری پیشنهاد می‌گردد [۱۲-۱۴]. معادلات *Eaton* یکی از موفق‌ترین روابط است که بمنظور تخمین فشار منفذی سازند استفاده می‌شود [۱۵]. تنش روباره، فشار هیدروستاتیک و روند بارگذاری نرمال از شرایط استفاده معادلات *Eaton* است [۱۴]. با توجه به شرایط موجود در میدان مورد بررسی، از معادلات *Eaton (1975)* بمنظور محاسبه فشار منفذی سازند در چاه قائم ($A$) استفاده شده است (رابطه (۴)). سپس نتایج تخمین زده بوسیله داده‌های ابزار *RDT* اعتبارسنجی گردید. نتایج اعتبارسنجی توسط داده‌های واقعی *RDT* مربوط به چاه ($A$) در شکل ۳-الف نمایش داده شده است که بیانگر دقت مقادیر تخمینی فشار منفذی است.

$$PPG = OBG - (OBG - P_{ng}) \times \left[\frac{(\mathrm{Ln}\emptyset_0 - \mathrm{Ln}\emptyset)}{cZ}\right] \quad (۴)$$

که $PPG$ گرادیان فشار منفذی سازند (*Psi/ft.*)، $OBG$ گرادیان فشار روباره سازند (*Psi/ft.*)، $P_{ng}$ فشار منفذی نرمال سازند که با توجه به آنالیز سیال سازندی و درجه شوری بطور میانگین برابر با (*Psi/ft.*) ۰/۴۵، $\emptyset$ تخلخل سازندی، $Z$ عمق چاه (*ft.*)، $\emptyset_0$ تخلخل اولیه سازند و ، $c$ مقدار ثابت حاصل از نمودار نمایی تخلخل-عمق که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۷۲۲۷ و $2\times10^{-4}$- می‌باشد. تخمین تنش‌های روباره معمولا با استفاده از داده‌های نمودار دانسیته انجام می‌شود (رابطه (۵)). تنش روباره موثر با استفاده از تنش روباره و فشار منفذی محاسبه می‌گردد. تعیین تنش درجای افقی فرایند ساده و مستقیم نمی‌باشد و بحث‌های زیادی در مورد آن صورت گرفته است. روش‌های قابل استفاده برای تعیین تنش‌های درجا در مکان‌هایی با رژیم تکتونیکی آرام و یا فعال امکان‌پذیر است [۳]. روش *Poroelastic* یکی از موفق‌ترین روش‌های توسعه‌یافته در تخمین تنش‌های درجای افقی می‌باشد [۱۵]. مدول یانگ، نسبت پواسون، تنش روباره و فشار منفذی پارامترهایی هستند که در این روش بکار گرفته می‌شوند. ضریب بایوت ($\alpha$) بعنوان اصلاح کننده اثر فشار منفذی با توجه به تراکم‌پذیری حجم و اجزاء ماتریکس سنگ، معمولا برابر با یک در نظر گرفته می‌شود [۴] و مقدار کرنش‌های جانبی ($e_x$ و $e_y$) با استفاده از روش آزمایش و خطا مابین مقادیر تخمینی تنش‌های درجای افقی و نتایج واقعی آزمایش نشت سازند (*Leak-off Test*) تعیین می گردد. در این مطالعه بمنظور تخمین تنش‌های درجای افقی در چاه قائم ($A$) از روش *Poroelastic* طبق روابط (۶) و (۷) استفاده شده است و بمنظور ارزیابی صحت مقادیر تخمین‌زده تنش افقی حداقل ($\sigma_h$) در چاه قائم ($A$) و تعیین مقادیر کرنش‌های جانبی، از مقدار واقعی آزمایش نشت سازند استفاده شده است. نتایج محاسبه تنش‌های درجای میدان مورد بررسی در شکل ۳-ب نمایش داده شده است. در شکل ۳-ب تغییرات تنش‌های اصلی درجای میدان مورد بررسی در چاه ($A$) نمایش داده شده است. همانطور که قبلا بیان گردید از داده واقعی آزمایش نشت سازند بمنظور محاسبه مقدار کرنش‌های جانبی ($e_x$ و $e_y$) همراه با انطباق

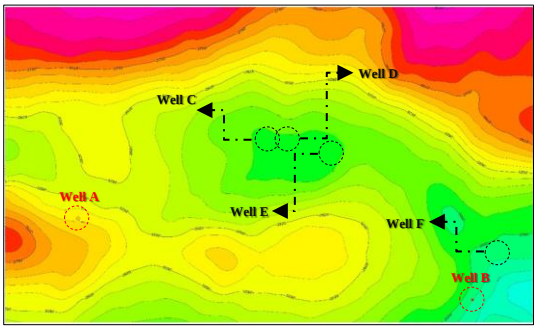
نمودار تغییرات تنش افقی حداقل بر داده مربوطه استفاده شده است. با توجه به شکل ۳-ب رژیم تنشی منطقه به صورت نرمال $(\sigma_h \leq \sigma_H \leq \sigma_V)$ می‌باشد.

$$\sigma_V = \int_0^z \rho(z)gdz \quad (۵)$$

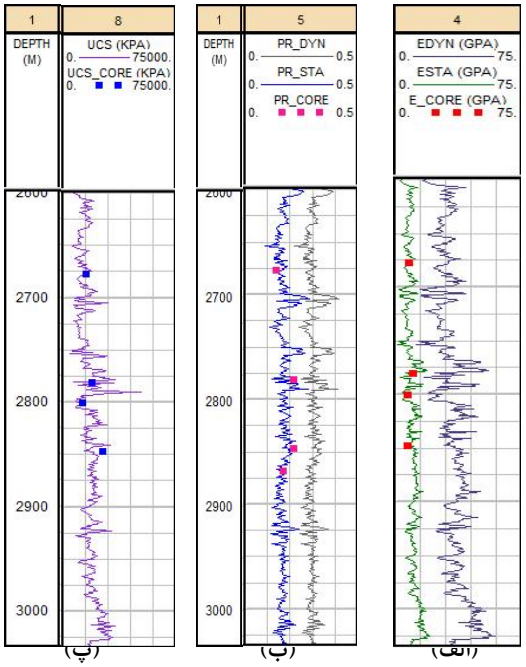
$$\sigma_h = \frac{v}{1-v}\sigma_V - \frac{v}{1-v}\alpha P_p + \frac{E}{1-v^2}e_x + \frac{vE}{1-v^2}e_y \quad (۶)$$

$$\sigma_H = \frac{v}{1-v}\sigma_V - \frac{v}{1-v}\alpha P_p + \frac{E}{1-v^2}e_y + \frac{vE}{1-v^2}e_x \quad (۷)$$

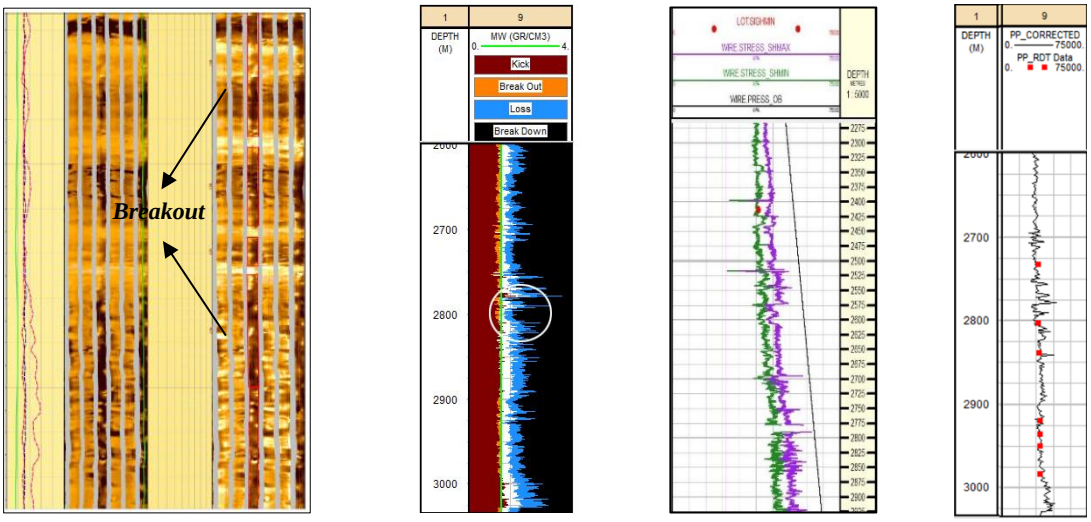
که $\sigma_h$، $\sigma_H$ تنش‌های افقی حداقل و حداکثر، $v$ نسبت پواسون، $P_p$ فشار منفذی سازند، $\alpha$ ضریب بایوت، $E$ مدول یانگ، $e_x$ و $e_y$ به ترتیب کرنش‌های جانبی در امتداد تنش افقی حداقل و حداکثر است. بنابراین پارامترهای مورد نیاز جهت ساخت مدل مکانیکی زمین تخمین زده شد. در ساخت مدل مکانیکی زمین شکل ۳-پ در چاه قائم $(A)$ از معیار شکست موهر-کلمب استفاده گردید. نمودار تصویری *XRMI* شکل ۳-ت در دو قسمت جداگانه، بطور کامل حفره ۱/۲-۸ اینچ (۱۲۳۰ متر) چاه قائم $(A)$ را شامل می‌شود. بمنظور تعیین امتداد تنش‌های درجای افقی، تعداد ۴۳ مورد ریزش برشی $(BO)$ در دیواره چاه قائم (A) با امتداد ۳۴۱-۱۶۱ درجه در قسمت اول مطابق شکل ۴-الف و تعداد ۴۶ مورد با امتداد ۳۴۵-۱۶۵ درجه در قسمت دوم نمودار تصویری مطابق شکل ۴-ب بطور واضح مشخص گردید. رژیم تنشی منطقه مورد بررسی از نوع نرمال می‌باشد، بطوریکه بزرگترین تنش اصلی $(\sigma_1)$ همان تنش روباره در امتداد قائم، تنش اصلی میانی $(\sigma_2)$ و یا تنش افقی حداکثر در امتداد ۲۴۵-۷۵ درجه و کوچکترین تنش اصلی $(\sigma_3)$ در رژیم تنشی منطقه مورد بررسی از نوع نرمال می‌باشد، بطوریکه بزرگترین تنش اصلی $(\sigma_1)$ همان تنش روباره در امتداد قائم، تنش اصلی میانی $(\sigma_2)$ و یا تنش افقی حداکثر در امتداد ۲۴۵-۷۵ درجه و کوچکترین تنش اصلی $(\sigma_3)$ در واقع تنش افقی حداقل در امتداد ۳۴۵-۱۶۵ درجه است. بنابراین حفاری در امتداد تنش افقی حداقل بعنوان مسیر بهینه نیاز به کمترین وزن گل را دارد. تعیین امتداد بهینه حفاری انحرافی به تنهایی راه حل این مسئله نخواهد بود. زیرا آزیموت چاه‌های انحرافی از سمت کارفرما و با توجه به برنامه‌های تولید تعیین می‌گردد. در این مطالعه بمنظور تعیین حداقل وزن گل مورد نیاز به کمک معیار شکست موهر-کلمب، آنالیز عددی و تحلیلی پایداری دیواره چاه انحرافی در آزیموت و زوایای شیب مختلف چاه مدل سازی شده است.




**شکل ۱: موقعیت چاه‌های قائم ($A$ و $B$) و چاه‌های انحرافی ($C$، $D$، $E$ و $F$) در میدان نفتی مورد نظر**

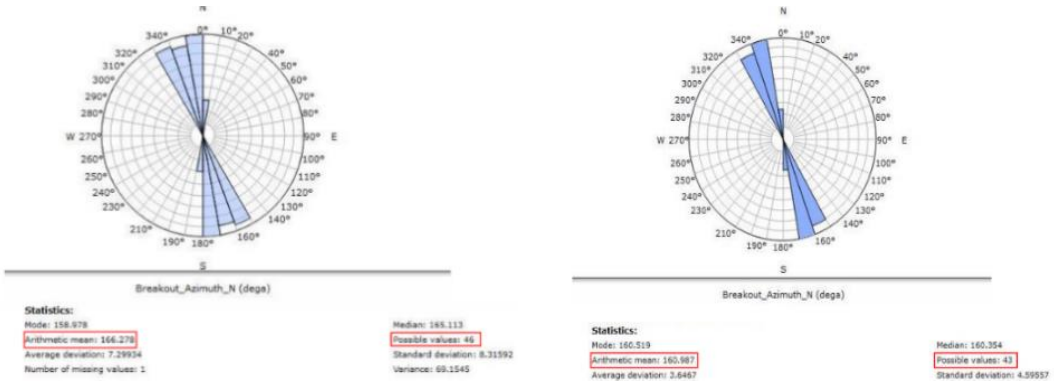



**شکل ۲: نمودارهای الف: مدول یانگ. ب: نسبت پواسون. پ: مقاومت تک محوره سنگ در چاه قائم $(A)$ همراه با اعتبارسنجی داده‌های آزمایشگاهی مغزه مربوط به چاه مجاور $(B)$**




(ت) (پ) (ب) (الف)

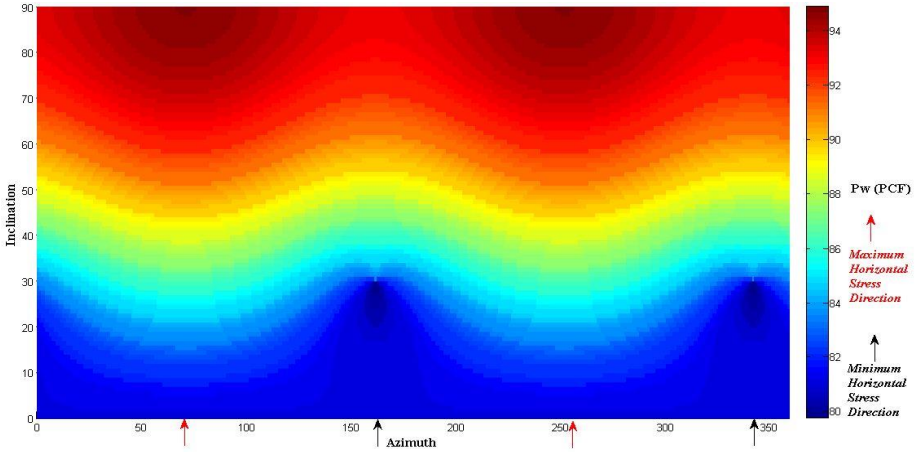
**شکل ۳: الف: نمودار تخمین فشار سازندی همراه با اعتبارسنجی داده‌های آزمایشگاهی مغزه. ب: نمودار تنش‌های اصلی درجا . پ: مدل مکانیکی زمین. ت: نمودار تصویری *XRMI* همراه با تعیین محل‌های ریزش *LOT*همراه با اعتبارسنجی داده واقعی دیواره در چاه قائم (*A*).**




(ب) (الف)

**شکل ۴: (الف): نمودار گل سرخی امتداد تنش افقی حداقل ($\sigma_h$) در قسمت اول نمودار تصویری چاه (*A*) (ب): نمودار گل سرخی امتداد تنش افقی حداقل ($\sigma_h$) در قسمت دوم نمودار تصویری چاه (*A*)**

نتایج این مدل سازی در شکل ۵ نمایش داده شده است. در مجاورت چاه قائم (*A*)، بمنظور اعتبارسنجی مدل پیش‌بینی حداقل وزن گل پایدار، چهار چاه انحرافی *C*، *D*، *E* و *F* انتخاب شدند که موقعیت این چاه‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است. با توجه به دارا بودن بازدارنده‌های شیلی و کنترل صافاب گل در سیال حفاری بمنظور کنترل پایداری شیمیائی، دو چاه *C* و *F* دارای مشکلات ناپایداری مکانیکی زیادی می‌باشند. ناپایداری دیواره در سه چاه *C*، *D* و *F* از میدان مورد بررسی موجب هدر رفتن ۵۱ روز از زمان دکل-های حفاری شده است. حداقل وزن گل مورد نیاز بمنظور پایداری دیواره در چهار چاه انحرافی *C*، *D*، *E* و *F* با استفاده از مدل سازی عددی و تحلیلی تعیین گردید و نتایج در جدول ۱ نمایش داده شده است. **شکل** ۱




**شکل ۵: پیش‌بینی حداقل وزن گل مورد نیاز جهت پایداری دیواره چاه انحرافی بر اساس تغییرات آزیموت و زاویه شیب**

**جدول ۱: مقایسه حداقل وزن گل پیش‌بینی شده و واقعی بمنظور پایداری دیواره چاه‌های انحرافی**

| نام چاه | زاویه ورود به سازند شیلی | زاویه خروج از سازند شیلی | آزیموت ورود به سازند شیلی | وزن گل پیش‌بینی شده (پوند) | وزن گل واقعی (پوند) |
|---|---|---|---|---|---|
| C | ۳۰° | ۴۵° | ۳۵۷° | ۸۸ | ۸۷ |
| D | ۳۰° | ۴۲° | ۱۶۵° | ۸۴ | ۸۳ |
| E | ۳۷° | ۴۳° | ۱۴۵° | ۸۵ | ۸۳ |
| F | ۳۷° | ۴۷° | ۲۱۴° | ۸۹ | ۸۷ |

علّت تخمین وزن گل بالای معیار شکست موهر-کلمب بمنظور دستیابی به پایداری دیواره چاه را چشم‌پوشی از تاثیر تنش اصلی میانی ($\sigma_2$) در مقاومت سنگ بیان می‌کنند [۱۶].

## ۴- بررسی پایداری دیواره چاه انحرافی به کمک آنالیز کمی ریسک

روش ارزیابی کمی ریسک اولین بار در صنعت نفت و گاز با رویکرد آنالیز توابع احتمال توسط *Ottesen et al. (1999)* مطرح گردید. آنالیز پایداری چاه ترکیبی از مدل‌های تحلیلی همراه با مقادیر عملیاتی آستانه‌ای مانند فشار شکست است. این مقادیر آستانه‌ای با استفاده از تابع حد وضعیت بمنظور تعیین احتمال شکست و موفقیت بکار گرفته می‌شوند. در روش ارزیابی کمی ریسک، ابتدا داده‌های ورودی مدل ارزیابی و بصورت عددی اندازه‌گیری می‌شوند. سپس با استفاده از مفاهیم تحلیلی احتمال، میزان پایداری دیواره چاه بعنوان تابعی از فشار وارده به دیواره چاه (وزن سیال حفاری) توسط مدل‌های سه‌بعدی اندازه‌گیری می‌شود. در این تحقیق از مفاهیم الاستیک غیرخطی استفاده شده است. تابع حد وضعیت در آنالیز کمی ریسک بصورت رابطه (۸) تعریف می‌شود [۱۷].

$$F_L = F_C(x) - F_L(x) \quad (۸)$$

که $F$ تابع شکست، $F_C$ تابع شکست بحرانی و $F_L$ بعنوان تابع حد وضعیّت تعریف می‌شود. $x$ بعنوان متغیر مستقل، متغیر تصادفی می‌باشد که در تحلیل آنالیز پایداری دیواره چاه در واقع همان پارامترهای اصلی ساخت مدل مکانیکی زمین است. در مدل‌های سازنده آنالیز پایداری دیواره چاه از معیارهای شکست بمنظور ارتباط مابین داده‌های اولیه ورودی و تعیین حداقل وزن گل استفاده می‌شود. معیار شکست موهر-کلمب جزء معمول‌ترین معیارهای آنالیز پایداری دیواره چاه است. این معیار خطی، اثر تنش اصلی میانی را در تخمین مقاوت سنگ در نظر نمی‌گیرد [۱۸]. رابطه مستقیمی بمنظور تخمین تابع حد وضعیت برای

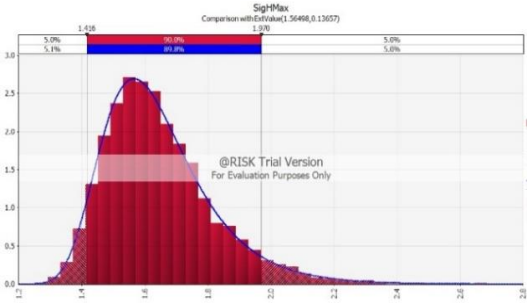
عملیات‌های حفاری وجود ندارد. در رابطه (۸) شکست بحرانی زمانی رخ می‌دهد که $F_C(x) \leq 0$ باشد [1]. بنابراین حداقل وزن گل مورد نیاز بمنظور پایداری دیواره چاه با استفاده از معیار شکست موهر-کلمب مطابق رابطه (۹) حاصل می‌گردد.

$$P_{w_{MC}} \leq \frac{3\sigma_H - \sigma_h - \frac{2C\,Cos(\varphi)}{1-Sin(\varphi)} + P_O\left(\frac{1+Sin(\varphi)}{1-Sin(\varphi)} - 1\right)}{1+\frac{1+Sin(\varphi)}{1-Sin(\varphi)}} \quad (۹)$$

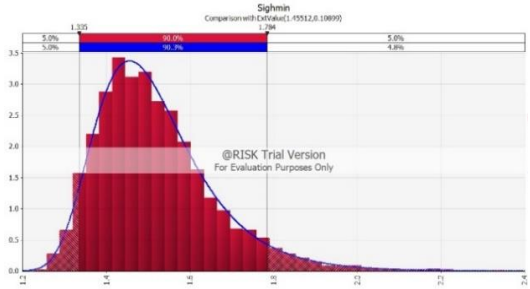
با توجه به رابطه (۹) پارامترهای ورودی مورد نیاز بمنظور تعیین تابع توزیع احتمال عبارتند از: $\sigma_H$ (تنش افقی حداکثر)، $\sigma_h$ (تنش افقی حداقل)، $\varphi$ (زاویه اصطکاک داخلی سنگ)، $C$ (چسبندگی سنگ) و $P_P$ (فشار منفذی سازند) که بصورت رابطه (۱۰) ارائه شده است.

$$P_{w_{MC}}(X) = P(\sigma_H, \sigma_h, \varphi, c, Pp) \quad (۱۰)$$

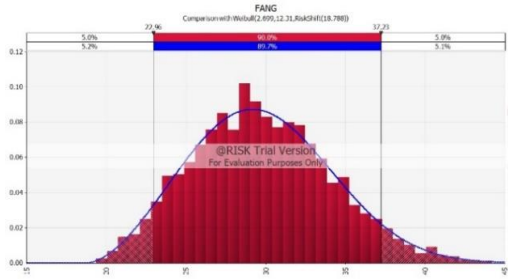
عدم قطعیت هر یک از پارامترهای اصلی بطور جداگانه بررسی می‌شود و مطابق شکل ۶ تا شکل ۱۰ مناسب‌ترین تابع توزیع احتمال و منحنی تطابق مناسب بمنظور نرمال‌سازی و پوشش حداکثری داده‌ها انتخاب می‌گردد. در شبیه‌سازی مونت-کارلو نتایج تحقق‌های مستقل سیستم به شکل توزیع‌های احتمالی خروجی‌های ممکن تبدیل می‌شوند. در نتیجه خروجی‌ها بصورت مقادیر تک نیستند، بلکه بصورت توزیع احتمال می‌باشند. در این تحقیق، آنالیز کمی ریسک حداقل وزن گل مورد نیاز جهت پایداری دیواره چاه ($A$)، با استفاده از روش مونت -کارلو شبیه‌سازی عددی گردید و نتیجه آنالیز حساسیت بصورت نمودار تورنادو در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. نمودار تورنادو بمنظور تعیین پارامتر اصلی موثر و اهمیت اثر تغییرات ایجاد شده‌ی پارامتر مورد نظر است. نمودار تورنادو نمونه‌ای از نمودار میله‌ای است که پارامترهای ورودی بر اساس اهمیت اثر آن‌ها بصورت عمودی قرار گرفته‌اند. شکل ۱۱ بیانگر نتایج آنالیز حساسیت اثر تغییرات ایجاد شده در پارامترهای ژئومکانیکی ورودی بر تعیین حداقل وزن گل پایداری دیواره چاه ($A$) است. با توجه به نمودار تورنادو در شکل ۱۱، تنش افقی حداقل، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب چسبندگی سنگ پارامترهایی هستند که به ترتیب کمترین تاثیر را بر روی تعیین حداقل وزن گل مورد نیاز جهت پایداری دیواره چاه در میدان مورد بررسی دارند.



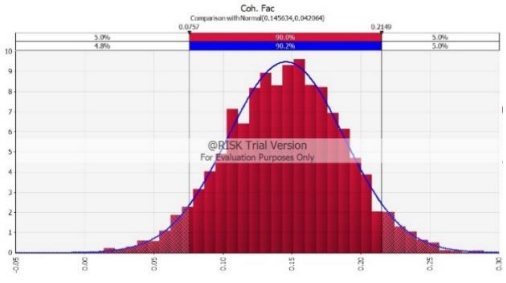

**شکل ۶: تابع توزیع احتمال Extvalue منطبق شده بر پارامتر تنش افقی حداکثر ($\sigma_H$)**



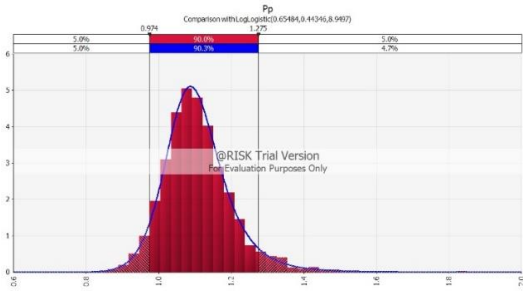

**شکل ۷: تابع توزیع احتمال Extvalue منطبق شده بر پارامتر تنش افقی حداقل ($\sigma_h$)**




**شکل ۸: تابع توزیع احتمال Weibull منطبق شده بر پارامتر زاویه اصطکاک داخل(FANG)**

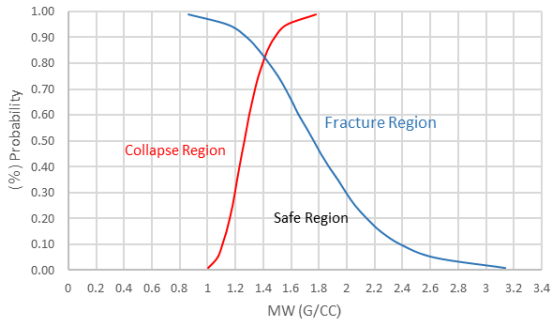



**شکل ۹: تابع توزیع احتمال Normal منطبق شده بر پارامتر ضریب چسبندگی سنگ (C)**

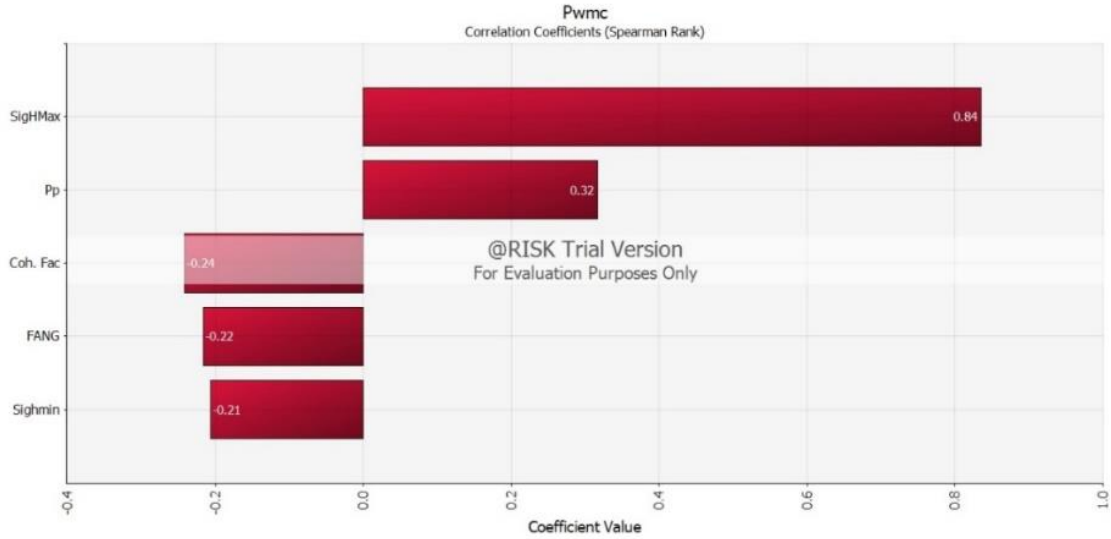



**شکل ۱۰: تابع توزیع احتمال LogLogistic منطبق شده بر پارامتر فشار منفذی ($P_P$)**

بنابراین ایجاد عدم قطعیت در تخمین این پارامترها دارای اهمیّت بسزایی نمی‌باشد. بعنوان مثال ۱۴٪ تغییرات در مقادیر تنش افقی حداقل ($\sigma_h$)، می‌تواند تا ۲۱٪ در تخمین حداقل وزن گل مورد نیاز جهت پایداری دیواره چاه تغییرات ایجاد کند. در صورتیکه پیش‌بینی حداقل وزن گل مورد نیاز جهت پایداری دیواره چاه مورد بررسی به شدت نسبت به تغییرات پارامتر تنش افقی حداکثر ($\sigma_H$) وابسته است.




**شکل ۱۱: تعیین درصد موفقیت پنجره ایمن وزن گل حفاری تخمین زده با استفاده از معیار**




**شکل ۱۲: خروجی آنالیز حساسیت پایداری دیواره چاه (A) بر اساس نمودار تورنادو و شبیه‌سازی مونت-کارلو**

## ۵- نتیجه‌گیری

این تحقیق شامل دو مدل‌سازی است که عبارتند از: مدل-سازی مکانیکی زمین و مدل‌سازی ارزیابی کمی ریسک. در مدل‌سازی مکانیکی زمین روابط بسیار مناسب با دقت بالا جهت تخمین مدول‌های الاستیک و فشار منفذی سازند ارائه گردید، سپس پایداری دیواره چاه‌های انحرافی در سازند شیلی بوسیله تعین حداقل وزن گل مورد نیاز بر اساس تغییرات آزیموت و زاویه شیب چاه مورد بررسی قرار گرفت که نتایج با دقت بالایی حاصل شد. علّت تخمین وزن گل بالای معیار شکست موهر-کلمب بمنظور دستیابی به پایداری دیواره چاه، چشم‌پوشی از تاثیر تنش ($\sigma_2$) در مقاومت سنگ است. در مدل سازی کمی ریسک توسط شبیه‌سازی مونت-کارلو، تنش افقی حداقل، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب چسبندگی سنگ پارامترهایی هستند که به ترتیب کمترین تاثیر را بر روی تعیین حداقل وزن گل مورد نیاز جهت پایداری دیواره چاه در میدان مورد بررسی دارند.

بنابراین ایجاد عدم قطعیت در تخمین این پارامترها دارای اهمیّت بسزایی نمی‌باشد. در صورتیکه پیش‌بینی حداقل وزن گل مورد نیاز جهت پایداری دیواره چاه مورد بررسی به شدت نسبت به تغییرات پارامتر تنش افقی حداکثر ($\sigma_H$) وابسته است و کمترین خطا در اندازه‌گیری مقدار تنش افقی حداکثر می‌تواند موجب اشتباهات بسیار زیادی در تعیین حداقل وزن گل مورد نیاز جهت پایداری دیواره چاه شود. همچنین تعیین تنش افقی حداکثر بصورت مستقیم امکان ندارد و همین موضوع موجب ایجاد عدم قطعیت بسیار زیادی در تخمین این پارامتر می‌شود.

## ۶- منبع‌ها


[1] Ottesen, R. H., Zheng, R. H., McCann, R. C., "Borehol eStability Assessment Using Quantitative Risk Analysis," *Proceedings ofS PE/IADC Drilling Conference*, 11 March 1999.

[2] S. M. E. Jalali and S. F. Forouhandeh, "Reliability Estimation of Auxiliary Ventilation Systems in Long Tunnels during Construction," *Safety Science*, vol. 49, no. 5, pp. 664-669, June 2011.

[3] S. M. E. Jalali and M. Eftekari, "An Experimental Criterion to Determine Pillar Strength in Salt Mines," in *Modern Management of Mine Prouducting, Geology & Environmental Protection*, Albena, 2008.

[4] B. Singh and R. K. Goel, Tunnelling in Weak Rocks, J. A. Hudson, Ed., Amsterdam: Elsevier B.V, 2006, pp. 325-333.

[5] Aadnoy, S. B., Looyeh, R, "Petroleum Rock Mechanics : Drilling Operation and Well Design," *Elsevier Publication*, p. 359, 2010.

[6] Rasouli, V., Zacharia, J., Elike, M., "The influence of perturbed stresses near faults on drilling strategy : a case study in Blacktip field," *Petrol. Sci. Eng*, p. 76, 2011.

[7] Moos, D., Peska, P., Finkbeiner, T., Zoback, M., "Comprehensive wellbore stability analysis utilizing Quantitative Risk Assessment," *J. Pet. Sci. Eng*, vol. 38(3–4), pp. 97-109, 2003.

[8] S. Aadnoy, "Quality assurance of wellbore stability analysis," *SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition*, pp. Paper SPE/IADC 140205, 1–3, March 2011. Amsterdam, Netherlands.

[9] R. Gholami, "Practical application of rock failure criteriain wellbore stability problem," Vols. 6, 13-25.

[10] Fjaer, E., Holt, R.M.,Hordrud, P.,Raaen, A.M.,Risnes, *Petroleum Related Rock Mechanic (Development in Petroleum Sciences. Elsevier, Amsterdam.*, 2008.

[11] M. Zoback, *Reservoir Geomechanic. Cambridge University Press, United*, 2007.

[12] Wang, Amos, Nur, Amos(Eds.), "Dynamic versus static elastic properties of reservoir rocks," *Seismic and Acoustic Velocities in Reservoir*, p. 531–539, 2001.

[13] Cheng, C.H.,Johnston,D.H., *Dynamic and static moduli. Geophys. Res. Lett.*, vol. 8, pp. 39-42, 1981.

[14] Sinha, B.K.,Wang,J.,Kisra,S.,Li,J.,Pistre,V.,Bratton,T.,Sanders,M., "Estimation of formation stresses using borehole sonic data," *Proceedings of SPWLA 49th Annual Logging Symposium*, May 25–28, 2008.

[15] Horsrud, P., "Estimating mechanical properties ofs hale from empirical correlation," *SPE Drill. Complet*, vol. 16, pp. 68-73.

[16] Tingay,M.R.P.,Hillis,R.R.,Swarbrick,R.E., Morley,C.K.,Damit,A.R., "overpressure and pore-pressure prediction in the Baram province, Brunei," *AAPG Bull*, 2009.

[17] Chopra, S., Huffman, A., "Velocity determination for pore pressure prediction," *CSEG*, 2006.

[18] Eaton, B.A, "The Equation for Geopressure Prediction from Well Logs Society of Petroleum Engineers of AIME," *SPE5544*, 1975.

[19] Gutierrez, M.A., Braunsdore, N.R., Couzens, B.A, "Calibration and ranking ofpore pressure prediction models," *The leading Edge*, pp. 1516-1523, 2006.

[20] Zhang, J., "Pore pressure prediction from well logs Methods, modifications, and newa pproaches," *Earth Sci. Rev.*, vol. 108, p. 50–63, 2011.

[21] Maleki, Sh, Gholami,R., Rasouli,V., Moradzadeh,A., Ghvami,R., Sadeghzadeh,F., "Comparison of different failure criteria in prediction of safe mud weight window in drilling practice," *Earth Sci.*, vol. 136, pp. 36-58, 2014.

[22] Al-Ajmi, A. M., Zimmerman, R.W, "stability analysis of vertical boreholes using the Mogi–Coulomb failure criterion," *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 43, pp. 1200-1211, 2006.