

بررسی انواع ریزش دیواره چاه‌های نفت در هنگام حفاری

سونیا آقایی*، دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین،

suniya.aghayi@yahoo.com

مهدی حسینی، استادیار گروه مهندسی معدن دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین، meh_hosseini18@yahoo.com

چکیده

پایداری چاه یک اهمیت حیاتی در موفقیت عملیات حفاری است. یکی از اهداف اصلی هر مأموریت حفاری، حفار چاه با هزینه کمتر است. پایداری چاه تابع چندین فاکتور مهم مانند راستا و آزیموت، تنش‌های برجا، وزن گل، پارامترهای مقاومت سنگ و غیره است که بعضی از این فاکتورها قابل کنترل و بعضی غیرقابل کنترل هستند. فاکتورهای قابل کنترل راستا، آزیموت و وزن گل است. با تغییر این پارامترها می‌توان مشکلات پایداری را بطور قابل توجهی کاهش داد. شناخت انواع گسیختگی‌های بوجود آمده در دیواره‌ی چاه، در تحلیل پایداری چاه اهمیت زیادی دارد. اصلی‌ترین شرط برای پایداری چاه در حال حفاری، برقراری تعادل بین تمرکز تنش در اطراف چاه و مقاومت سنگ است. ناپایداری در دیواره‌ی چاه وقتی ایجاد می‌شود که مقدار تنش موثر در دیواره‌ی چاه از مقاومت سنگ فراتر رود. در این مقاله به بحث در مورد تاثیر تنش‌های القایی اطراف چاه بر نوع ریزش دیواره‌ی چاه‌های نفتی پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: ریزش دیواره، چاه نفت، حفاری

مقدمه

مطالعه رفتار چاه با تغییرات شرایط بارگذاری علاقه خاص مهندسان میدانی شامل مهندسی نفت، مهندسی ژئوتکنیک و معدن است. هدف اصلی در طول حفاری و تولید نفت و گاز، پایدار نگه‌داشتن چاه است. درک توزیع تنش در اطراف چاه حفاری شده، اهمیت زیادی در موقع حفاری، تولید، تزریق و محاسبه فشار شکستگی دارد. توزیع تنش اغلب حاصل میدان تنش غیرهیدرواستاتیک در یک محیط زمین‌شناسی است (Bradley, 1978). پایداری چاه یک مسئله پیوسته در صنعت نفت است و هزینه‌های سالیانه قابل توجهی به این صنعت وارد می‌شود. نگرانی بزرگ مهندسان حفاری پایدار نگهداشتن دیواره چاه از شکست یا ریزش است. در سال‌های اخیر، استفاده از چاه‌های مایل و چاه‌های افقی به طور پیوسته افزایش یافته است. با توجه به ملاحظات اقتصادی، نیاز به درک بهتر مکانیزم‌های شکست برای توسعه چاه‌ها است. در اکثر مطالعات قبلی، شرایط زمین‌شناسی و همچنین توزیع تنش را همسانگرد در نظر می‌گرفتند (Gupta & Zaman, 1999). شناخت انواع گسیختگی‌های بوجود آمده در دیواره‌ی چاه، در تحلیل پایداری چاه اهمیت زیادی دارد. اصلی‌ترین شرط برای پایداری چاه در حال حفاری، برقراری تعادل بین تمرکز تنش در اطراف چاه و مقاومت سنگ است. ناپایداری در دیواره‌ی چاه وقتی ایجاد می‌شود که مقدار تنش موثر در دیواره‌ی چاه از مقاومت سنگ فراتر رود (Birchwood, 2002). اگر مقاومت سنگ از تنش القایی ایجاد شده بیشتر باشد، چاه پایدار است و در غیر اینصورت احتمال ناپایداری وجود دارد. ناپایداری چاه می‌تواند در هر مرحله از عمر چاه شامل حفاری، تکمیل و شبیه‌سازی، آزمایش‌های جریان، تولید و تخلیه اتفاق بیافتد. ناپایداری چاه یکی از علل مشکلات

حفاری است. در نتیجه باعث هزینه‌های قابل توجه، از دست دادن زمان ارزشمند، گاهی اوقات از دست دادن بخشی از چاه و یا کل چاه می‌شود (Dusseault, 1994).

تحلیل تنش اطراف چاه

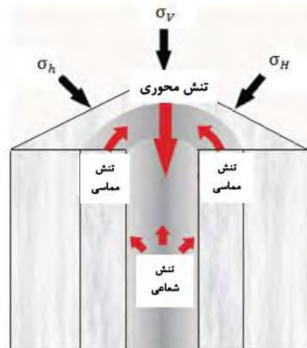
سازندهای زیرزمینی تحت تنش فشاری عمودی، ناشی از وزن روباره می‌باشند و تنش‌های افقی منجر به مهار جانبی می‌شوند. تحت عمل تنش‌های برجای فوق، در ابتدای حفاری چاه، توده سنگ از تعادل ابتدایی خارج شده و تعادل اولیه از بین می‌رود.

با فرض اینکه تنش‌های اصلی موجود در محیط (قبل از ایجاد چاه)، σ_V (تنش قائم)، σ_H (تنش افقی حداکثر) و σ_h (تنش افقی حداقل) باشند، پس از حفر، تنش‌های اطراف دیواره چاه خود را به تنش‌های القایی می‌دهند. تنش‌های القایی به وجود آمده در اطراف دیواره چاه عبارتند از: σ_r (تنش شعاعی)، σ_θ (تنش مماسی) و σ_z (تنش محوری). با این حال، تنش‌های القایی تنها در محدوده‌ای در حدود ۲ تا ۳ برابر شعاع چاه القا می‌شوند و با گذر از این محدوده، تنش‌های موجود در محیط، برابر با تنش‌های قبلی که σ_V (تنش قائم)، σ_H (تنش افقی حداکثر) و σ_h (تنش افقی حداقل) می‌باشند، خواهند شد (B. Pasic, 2007) (switch argument).

بنابراین عمدتاً دو دسته تنش در تحلیل پایداری چاه‌های نفتی نقش دارند:

الف) تنش‌های برجای (تنش‌های اولیه): σ_V (تنش قائم)، σ_H (تنش افقی حداکثر) و σ_h (تنش افقی حداقل)

ب) تنش‌های القایی (تنش‌های ثانویه): σ_r (تنش شعاعی)، σ_θ (تنش مماسی) و σ_z (تنش محوری)



شکل ۳: تنش‌های برجای و تنش‌های اعمال شده اطراف چاه (B. Pasic, 2007)

تنش‌های برجای از چاه تاثیر نمی‌پذیرند و در مقابل، تنش‌های القایی در دیواره چاه (سطح اشتراک گل و سازند) فعال می‌شوند. این تنش‌ها را می‌توان توسط دانسیته گل کنترل نمود. به کمک سیستم مختصات کارترین، به خوبی می‌توان تنش‌های برجای منطقه را توصیف نمود. یکی از تنش‌ها به صورت قائم و دو تنش دیگر افقی هستند و هر سه این تنش‌ها دو به دو بر هم عمودند. اگر مقدار دو تنش افقی متفاوت باشند، در این صورت

تنش افقی حداکثر، σ_H و تنش افقی حداقل، σ_h خواهد بود. اولین معادله ارائه شده برای تعیین تنش‌های القایی در اطراف یک فضای دایره‌ای شکل با فرض الاستیک و همسانگرد بودن محیط، توسط کرش (kirsch) در سال ۱۸۹۸ ارائه شد. در سال ۱۹۸۸ معادلات مشابهی برای محیط پوروالاستیک و همسانگرد ارائه شده که فرض بر موازی بودن محور چاه و یکی از تنش‌های اصلی است (Detournay, 1988). تنش حول دیواره‌ی چاه

در یک محیط الاستیک، نفوذناپذیر، همگن و همسانگرد بوسیله روابط کرش تعیین می‌شود. روابط کرش روابط ساده‌ای هستند که در اکثر میادین نفتی، به منظور تخمین تنش در اطراف دیواره‌ی چاه به کار می‌روند (Bell & Bachu, 2003). در سیستم مختصات قطبی، تنش‌های اطراف چاه با جهت دلخواه بصورت روابط ۱ تا ۶ می‌باشد:

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma_x^0 + \sigma_y^0}{2} \right) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \left(\frac{\sigma_x^0 - \sigma_y^0}{2} \right) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \quad (1)$$

$$+ \sigma_{xy}^0 \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta + P_w \frac{a^2}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{\sigma_x^0 + \sigma_y^0}{2} \right) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \left(\frac{\sigma_x^0 - \sigma_y^0}{2} \right) \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \quad (2)$$

$$- \sigma_{xy}^0 \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \sin 2\theta - P_w \frac{a^2}{r^2}$$

$$\sigma_z = \sigma_z^0 - \nu \left[2 \left(\sigma_x^0 - \sigma_y^0 \right) \frac{a^2}{r^2} \cos 2\theta + 4 \sigma_{xy}^0 \frac{a^2}{r^2} \sin 2\theta \right] \quad (3)$$

$$\sigma_{r\theta} = \left[- \left(\frac{\sigma_x^0 - \sigma_y^0}{2} \right) \left(1 - 3 \frac{a^4}{r^4} + 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \right] + \sigma_{xy}^0 \left(1 - 3 \frac{a^4}{r^4} + 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \quad (4)$$

$$\sigma_{\theta z} = \left(-\sigma_{xz}^0 \sin \theta + \sigma_{yz}^0 \cos \theta \right) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (5)$$

$$\sigma_{rz} = \left(\sigma_{xz}^0 \cos \theta + \sigma_{yz}^0 \sin \theta \right) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \quad (6)$$

که a شعاع چاه، P_w فشار درونی چاه (فشار گل) و ν ضریب پواسون است. زاویه θ در جهت ساعتگرد از محور X اندازه‌گیری می‌شود (Hiramatsu, 1968).

مکانیزم شکست چاه

ناپایداری چاه در اثر مکانیزم مکانیکی و یا شیمیایی (فعالیت‌های شیمیایی سیال و سازند) می‌باشد. در حالت کلی چهار نوع شکست در چاه رخ می‌دهند (Sharan, 2008). که در ذیل دو نوع آن که مهم است شرح داده شده است.

شکست برشی

غالباً به دلیل وزن پایین یا افت فشار سیال حفاری رخ می‌دهد (Al-Ajmi, 2009). این نوع شکست وقتی رخ می‌دهد که تنش برشی بر دیواره چاه از مجموع مقاومت چسبندگی و مقاومت نیروی اصطکاک داخلی بین اجزای سنگ بیشتر شود. جهت این شکاف‌ها به موازات تنش افقی حداقل می‌باشند (Bradley, 1978).

به طور کلی شکست برشی در سازندهای شکننده، منجر به ریزش دیواره و افزایش قطر چاه می‌شود و در سازندهای پلاستیک مثل نمک منجر به تغییر شکل پلاستیک و کاهش قطر چاه می‌شود. برحسب اینکه تنش‌های اصلی چه وضعیتی نسبت به هم داشته باشند، حالات مختلف شکست اتفاق می‌افتد. برای

فهم بهتر نوع شکست لازم است که سه اصل همواره مد نظر قرار بگیرد:
با ثابت بودن هر کدام از تنش‌ها، در نقطه‌ی شکست، دو صفحه‌ی شکست ایجاد می‌شود که صفحات محتمل شکست نامیده می‌شوند.

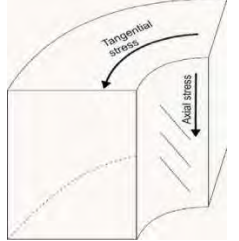
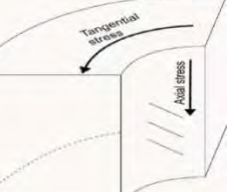
تنش اصلی حداکثر نیمساز زاویه‌ی حاده و تنش اصلی حداقل نیمساز زاویه‌ی منفرجه است.
تنش میانی تعیین کننده‌ی شکل شکستگی است، بطوریکه:

اگر تنش محوری، تنش میانی باشد، گسیختگی برشی اتفاق می‌افتد که بسته به مقدار تنش شعاعی و تنش مماسی، می‌تواند عریض یا باریک باشد که به ترتیب گسیختگی برشی عریض و گسیختگی برشی باریک نامیده می‌شوند (جدول ۱).

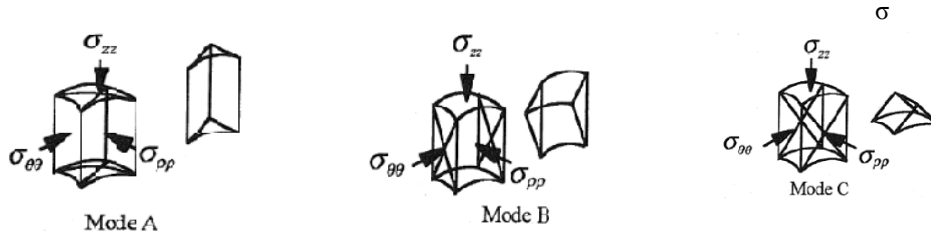
اگر تنش مماسی، تنش میانی باشد، گسیختگی برشی ضربه‌ای اتفاق می‌افتد که بسته به مقدار تنش محوری و تنش شعاعی، می‌تواند عمیق یا کم عمق باشد که به ترتیب گسیختگی برشی ضربه‌ای عمیق و گسیختگی برشی ضربه‌ای کم عمق نامیده می‌شوند (جدول ۱).

جدول ۱- انواع گسیختگی‌های برشی دیواره چاه‌های نفت (B. Pasic, 2007)

<p>گسیختگی برشی عریض: زمانی رخ می‌دهد که تنش مماسی در دیواره چاه تنش بیشینه و تنش شعاعی (فشار چاه) تنش کمینه باشد. عرض ناحیه‌ی گسیخته شده در این حالت حدود $\alpha = 30^\circ$ تا 90° درجه است</p> <p>شرایط تنش‌ها $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$</p> <p>این نوع گسیختگی، پوسته‌پیزی نیز نامیده می‌شود.</p>		<p>۱</p>
<p>گسیختگی برشی باریک: گسیختگی برشی باریک هنگامی رخ می‌دهد که تنش شعاعی (فشار چاه)، تنش اصلی بیشینه و تنش مماسی، تنش اصلی کمینه باشد.</p> <p>شرایط تنش‌ها $\sigma_r > \sigma_z > \sigma_\theta$</p>		<p>۲</p>
<p>گسیختگی برشی ضربه‌ای عمیق: این گسیختگی زمانی رخ می‌دهد که تنش شعاعی، تنش بیشینه و تنش محوری، تنش اصلی کمینه باشد.</p> <p>شرایط تنش‌ها $\sigma_r > \sigma_\theta > \sigma_z$</p>		<p>۳</p>
<p>گسیختگی برشی ضربه‌ای کم عمق: این گسیختگی هنگامی رخ می‌دهد که تنش محوری، تنش بیشینه و تنش شعاعی، تنش کمینه باشد. این دو تنش در صفحه‌ی قائم عمل کرده و عامل به وجود آورنده‌ی گسیختگی برشی می‌باشد که در راستای تنش افقی کمینه قرار می‌گیرد.</p> <p>شرایط تنش‌ها $\sigma_z > \sigma_\theta > \sigma_r$</p> <p>این نوع گسیختگی، چنبری و توریک (Toric) نیز نامیده می‌شود.</p>		<p>۴</p>

<p>گسیختگی برشی پله‌ای با زاویه‌ی زیاد: این گسیختگی هنگامی رخ می‌دهد که تنش مماسی، تنش اصلی کمینه و تنش قائم، تنش اصلی بیشینه باشد. در نتیجه یک ترک برشی با زاویه‌ی باز به وجود می‌آید که حدود یک چهارم محیط چاه را احاطه می‌کند.</p> <p>شرایط تنش‌ها</p> $\sigma_z > \sigma_r > \sigma_\theta$ <p>این نوع گسیختگی، حلزونی، مارپیچی و هلیکال (Helical) نیز نامیده می‌شود.</p>		<p>۵</p>
<p>گسیختگی برشی پله‌ای با زاویه‌ی کم: هنگامی رخ می‌دهد که تنش مماسی، تنش اصلی بیشینه و تنش قائم، تنش اصلی کمینه باشد. در نتیجه یک ترک برشی با زاویه بسته به وجود می‌آید.</p> <p>شرایط تنش‌ها</p> $\sigma_\theta > \sigma_r > \sigma_z$		<p>۶</p>

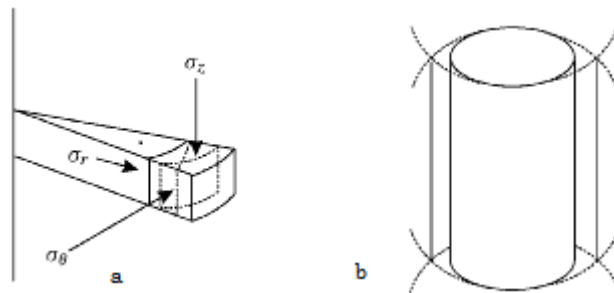
چون در طبیعت امکان اینکه تنش شعاعی بیشتر از تنش محوری باشد وجود ندارد، گسیختگی‌های ۲ و ۳ و ۶ غیر واقعی هستند و فرم ریزش در سه تایی دیگر که مود A و B و C هستند در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴: سه مود ریزش در دیواره چاه

در شکل ۴ $\sigma_z = \sigma_{zz}$ ، $\sigma_r = \sigma_{pp}$ و $\sigma_\theta = \sigma_{\theta\theta}$ هستند.

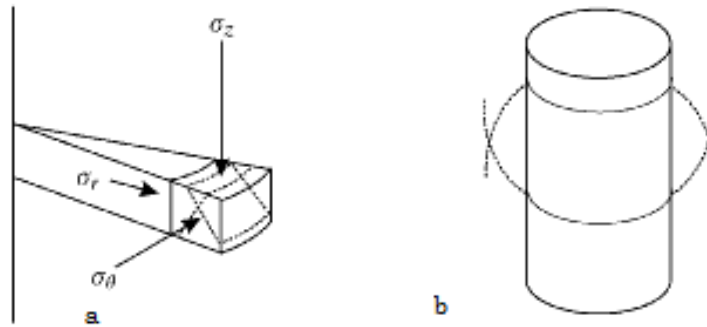
در مود A (شکست پوسته پیازی)، شکست در سطوح برشی متقاطع، موازی با تنش محوری رخ می‌دهد (شکل ۵).



شکل ۵: a- تنش‌های وارد بر المانی از دیواره چاه، b- شکست پوسته پیازی (Fjaer, et al., 2008)

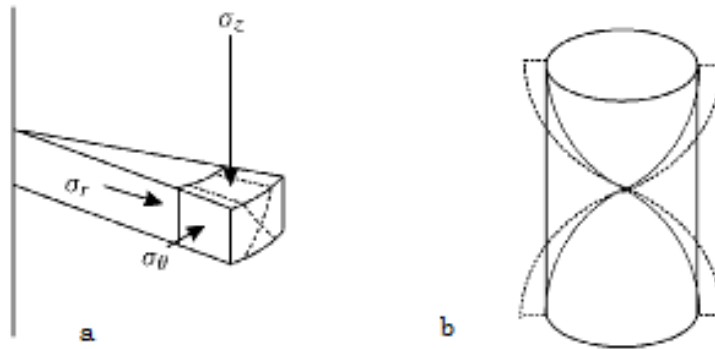
حلقوی رخ می‌دهد (شکل ۶).

در مود B (شکست توریک)، شکست در قطعات



شکل ۶: a- تنش‌های وارد بر المانی از دیواره چاه، b- شکست توریکی (Toric) (Fjaer, et al., 2008)

در مود C (شکست هلیکال)، شکست در صفحات چندبرشی متقاطع موازی با شعاع رخ می‌دهد (شکل ۷).



شکل ۷: a- تنش‌های وارد بر المانی از دیواره چاه، b- شکست هلیکال (Helical) (Fjaer, et al., 2008)

شکست کششی

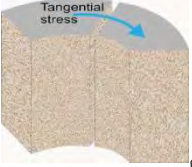
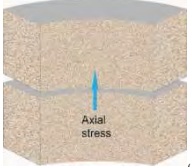

شکست کششی زمانی رخ می‌دهد که تنش ناشی از سیال حفاری از مقاومت کششی سازند تجاوز کند. وزن بالای سیال حفاری باعث شکست هیدرولیکی شده و فرار سیال به داخل سازند و تغییر شکل سازند را سبب می‌شود. از این رو شکست هیدرولیکی، حد بالای پنجره گل (محدوده بین حد بالا و پایین فشار گل) جهت حفاری مناسب می‌باشد. معمولاً شکست کششی زمانی اتفاق می‌افتد که تنش موثر حداقل از مقاومت کششی سازند تجاوز کند. در بعضی موارد شکست کششی به دلیل نرخ زیاد تولید هیدروکربن رخ می‌دهد که باعث اتساع ساختمان سازند و از دست رفتن مقاومت مکانیکی آن می‌گردد (Gupta & Zaman, 1999). در



هفدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران (۷ تا ۹ آبان ماه ۱۳۹۲)

جدول ۲ اشکال این شکستگی‌ها و شرایط بوجود آمدن آن‌ها آورده شده است.

جدول ۲: انواع گسیختگی های کششی دیواره چاه های نفت (B. Pasic, 2007)

کششی	گسیختگی	کششی	گسیختگی	کششی	گسیختگی
	 <p>قائم</p>		 <p>افقی</p>		 <p>استوانه ای</p>
<p>هنگامی رخ میدهد که تنش مماسی وارد بر دیواره چاه از حد مقاومت کششی سنگ در برگیرنده چاه تجاوز کند. شرایط حالت پایدار است $\sigma_t \leq -T_0$</p>	<p>گسیختگی کششی افقی به ندرت در دیواره چاه مشاهده می شود. شرایط حالت پایدار است. $\sigma_z \leq -T_0$</p>	<p>هنگامی رخ می دهد که تنش شعاعی وارد بر دیواره چاه از مقاومت کششی سنگ در برگیرنده چاه تجاوز کند. شرایط حالت پایدار است $\sigma_r \leq -T_0$</p>			

نتیجه گیری

ناپایداری در دیواره ی چاه وقتی ایجاد می شود که مقدار تنش موثر در دیواره ی چاه از مقاومت سنگ فراتر رود. تنش های برجا از چاه تاثیر نمی پذیرند و در مقابل، تنش های القایی در دیواره چاه (سطح اشتراک گل و سازند) فعال می شوند.

شکست برشی در سازندهای شکننده منجر به ریزش دیواره و افزایش قطرچاه می شود و در سازندهای پلاستیک مثل نمک منجر به تغییر شکل پلاستیک و کاهش قطرچاه می شود. با ثابت بودن هر کدام از تنش ها، در نقطه ی شکست، دو صفحه ی شکست ایجاد می شود که صفحات محتمل شکست نامیده می شوند.

اگر تنش محوری، تنش میانی باشد، گسیختگی برشی اتفاق می افتد که بسته به مقدار تنش شعاعی و تنش مماسی، می تواند عریض یا باریک باشد که به ترتیب گسیختگی برشی عریض و گسیختگی برشی باریک نامیده می شوند.

اگر تنش مماسی، تنش میانی باشد، گسیختگی برشی ضربه ای اتفاق می افتد که بسته به مقدار تنش محوری و تنش شعاعی، می تواند عمیق یا کم عمق باشد که به ترتیب گسیختگی برشی ضربه ای عمیق و گسیختگی برشی ضربه ای کم عمق نامیده می شوند.

اگر تنش شعاعی، تنش میانی باشد، گسیختگی برشی پله ای اتفاق می افتد که بسته به مقدار تنش محوری و تنش مماسی می تواند با زاویه ی زیاد یا کم باشد که به ترتیب گسیختگی برشی پله ای با زاویه ی زیاد و گسیختگی برشی پله ای با زاویه ی کم نامیده می شوند.

حالت هایی که تنش شعاعی از تنش محوری بیشتر باشد، غیر واقعی هستند.

شکست کششی زمانی رخ می دهد که تنش ناشی از سیال حفاری از مقاومت کششی سازند تجاوز کند.



هفدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران (۷ تا ۹ آبان ماه ۱۳۹۲)

References:

- 1-Al-Ajmi, A. M. (2009). A new well path optimization model for increased mechanical borehole stability. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, vol. 69, pp. 53-62.
- 2-B. Pasic, N. G. (2007). Wellbore instability: causes and consequences. 19.
- 3-Bell, J., & Bachu, S. (2003). In situ stress magnitude and orientation estimates for Cretaceous coal-bearing strata beneath the plains area of central and southern Alberta. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, vol. 51, pp.1-28.
- 4-Birchwood, R. (2002). Options for enhanced wellbore stability.
- 5-Bradley, W. (1978). Bore Hole Failure Near Salt Domes. *paper SPE 7503 presented at the 53th Annual Fall Technical conference and Exhibition of the SPE of AIME, 1-3 October*.
- 6-Bradley, W. (1979). Failure of inclined boreholes. *Journal of Energy Resources Technology*, vol.101, pp. 232-241.
- 7-Detournay, E. (1988). Poroelastic response of a borehole in a non-hydrostatic stress field. *in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, pp.171-182.
- 8-Dusseault, M. (1994). Analysis of borehole stability. *in Proceedings of the 8th IACMAG Conference*, pp.125-137.
- 9- Fjaer, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raaen, A.M., & Risnes, R. (2008). *mechanics, petroleum related rock*
- 10-Gupta, D., & Zaman, M. (1999). Stability of boreholes in a geologic medium including the effects of anisotropy. *Applied Mathematics and Mechanics*, vol 20, pp. 837-866.
- 11-Hiramatsu, Y. (1968). Determination of the stress in rock unaffected by boreholes or drifts, from measured strains or deformations. *in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, pp. 337-353.
- 12- Fjaer, E., Holt, R.M., Horsrud, P., Raaen, A.M., & Risnes, R. (2008). *mechanics, petroleum related rock*.
- 13-Sharan, S. (2008). Analytical solutions for stresses and displacements around a circular opening in a generalized Hoek-Brown rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 45, pp. 78-85.