



مروری بر روش‌های تحلیلی پایداری چاه نفت و نقد کاستی‌های آن

احمد فهیمی‌فر • دانشگاه صنعتی امیرکبیر

امین توحیدی* • شرکت ملی نفت

چکیده

یکی از مهم‌ترین مسائل در حین حفاری چاه نفت و گاز پایداری آن است به طوری که فقط زیان مادی حاصل از ناپایداری چاه در سازندهای شیلی سالانه ۱/۳ میلیارد دلار برآورد شده است. [۱] با توجه به اینکه روش‌های تحلیلی ارائه شده در حوزه پایداری چاه‌های نفت هر یک دارای فرضیات متفاوتی می‌باشند، در نتیجه معادلات مختلفی را برای تنش‌های ایجاد شده ناشی از حفاری ارائه می‌دهند. به منظور فهم مشترک از این معادلات، در این مقاله روش‌های تحلیلی به سه دسته الاستیک، پوروالاستیک و پلاستیک تقسیم شده است. هر یک از این سه دسته نیز به زیردسته‌های مرتبط گسترش یافته‌اند. در ادامه، به مدل‌های رفتاری قابل استفاده در چاه‌های نفت و مسأله یافتن شعاع ناحیه پلاستیک پرداخته شده است.

اطلاعات مقاله

* دریافت:

۹۴/۲/۲۸

* پذیرش:

۹۴/۴/۲

* ارسال برای چاپ:

۹۴/۵/۶

واژگان کلیدی

روش‌های تحلیلی

پایداری چاه

مدل‌های رفتاری

مقدمه

میزان مشخصی کمتر شود و حفاری در سازند ضعیف باشد، چاه ناپایدار شده و اگر فشار گل حفاری از حد مشخصی فراتر رود باعث ایجاد ترک یا گسترش ترک‌های موجود در سازند گشته و منجر به هرزروی گل حفاری در سازند می‌شود. به محدوده مجاز گل حفاری پنجره ایمن گل حفاری گویند. [۸]

لازم به ذکر است عملاً در بیشتر موارد حفارها از علم مکانیک سنگ برای یافتن وزن بهینه گل حفاری استفاده نمی‌کنند و به تجربیات خود و قواعد سرانگشتی سرچاه بسنده می‌کنند. [۹]

۱- محاسبه تنش در اطراف چاه

تاکنون روش‌های تحلیلی بسیاری در خصوص روابط میدان تنش و کرنش محیط حفاری شده ارائه شده است که در ادامه، تاریخچه مهم‌ترین کارهای صورت گرفته بیان می‌گردد. مزیت روش‌های تحلیلی، ساده بودن و عدم نیاز به بسیاری از پارامترهای مربوط به سنگ و محیط حفاری است که شاید مقدار آن‌ها در زمان شروع حفاری نامعلوم باشد [۱۰] همچنین در صورت به دست آوردن حل تحلیلی برای یک مسأله، حساسیت سنجی پارامترهای مختلف به سادگی انجام می‌گیرد.

برای حل تحلیلی می‌بایست معادلات تعادل، سازگاری (Compatibility) و رفتاری (Constitutive) برقرار شوند. همچنین شرایط مرزی برای نیرو و تغییر مکان به صورت توأم ارضا گردد. [۱۱]

در آنالیز پایداری چاه‌های نفت ابتدا باید مشخص گردد چه موقع چاه ناپایدار می‌گردد. ناپایداری چاه به دلیل شکست سنگ اطراف دیواره چاه در حالتی که مقدار تنش مؤثر در دیواره چاه از استحکام سنگ تجاوز کند، ایجاد می‌شود. اگر استحکام سنگ بیشتر از مقدار تنش القایی باشد، چاه پایدار خواهد ماند اما در شرایط عکس، سنگ تسلیم خواهد شد و احتمال ناپایداری در چاه وجود دارد. از لحاظ اجرایی، هنگامی چاه پایدار تلقی می‌گردد که قطر آن برابر قطر مته حفاری باشد و برای مدت طولانی شکل خود را حفظ کند. با این تعریف، جدا شدن محدود دانه‌های سنگ از اطراف چاه جزو ناپایداری چاه محسوب نمی‌شود. [۱،۲]

در مورد چاه‌ها و مخازن نفتی، انواع مختلفی از ناپایداری وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها ناپایداری در پوش سنگ مخزن، ناپایداری خود چاه، تولید ماسه از چاه، ناپایداری ناشی از واکنش شیمیایی سیال حفاری با سازند چاه و... می‌باشد. [۳-۶]

به طور کلی مواردی مانند تنش‌های برجای زمین، فشار سیال منفذی، مقاومت مکانیکی و خصوصیات شیمیایی سنگ از عوامل غیرقابل کنترل در پایداری چاه‌ها می‌باشند و عواملی نظیر خصوصیات مکانیکی و شیمیایی گل حفاری، آزمون و شیب چاه جزو عوامل قابل کنترل پایداری چاه‌ها هستند. [۷]

همانطور که اشاره شد از گل حفاری برای تأمین پایداری کوتاه‌مدت چاه بهره می‌گیرند بدین صورت که اگر فشار ناشی از وزن گل حفاری از

*نویسنده‌ی عهده‌دار مکاتبات (a.tohidi@aut.ac.ir)

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

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

$$\tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta$$

معادلات-۳: حل تحلیلی توسط Kirsch

فرضیات حل تحلیلی فوق بر پایه‌ی دوبعدی بودن، محیط الاستیک خطی، در نظر گرفتن محیط به صورت غیرمتخلخل، لحاظ نکردن فشار ناشی از گل حفاری و... می‌باشد. این معادلات بعداً توسط آزمایش‌های اندازه‌گیری کرنش و روش فوتوالاستیک تأیید گردید. [۱۴]

در ادامه، Bradley بر مبنای کارهایی که Fairhurst انجام داده بود، معادلات تنش اطراف چاه را مطابق معادلات-۴ منتشر کرد. فرضیاتی که وی در نظر گرفت عبارتند از مدل‌سازی سازند اطراف چاه به صورت الاستیک خطی، در طول محور چاه شرایط کرنش مسطح برقرار است و جریان سیال به داخل یا خارج از سازند وجود ندارد. تفاوتی که معادلات Bradley با معادلات Kirsch دارد سه‌بعدی است و فشار ناشی از گل حفاری که بر دیواره چاه اعمال می‌شود (Pw) را لحاظ کرده است. معادلات Bradley هنوز به طور گسترده در صنعت نفت به منظور طراحی وزن گل حفاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. [۱۵]

$$\sigma_r = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right) \left(1 - \frac{R_w^2}{r^2}\right) + \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right) \left(1 + \frac{3R_w^4}{r^4} - \frac{4R_w^2}{r^2}\right) \cos 2\theta + \tau_{xy} \left(1 + \frac{3R_w^4}{r^4} - \frac{4R_w^2}{r^2}\right) \sin 2\theta + P_w \frac{R_w^2}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right) \left(1 + \frac{R_w^2}{r^2}\right) - \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right) \left(1 + \frac{3R_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \tau_{xy} \left(1 + \frac{3R_w^4}{r^4}\right) \sin 2\theta - P_w \frac{R_w^2}{r^2}$$

$$\sigma_z = \sigma_{zz} - \nu \left[2(\sigma_x - \sigma_y) \frac{R_w^2}{r^2} \cos 2\theta + 4\tau_{xy} \frac{R_w^2}{r^2} \sin 2\theta \right], \tau_{r\theta} = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right) \left(1 - \frac{3R_w^4}{r^4} + \frac{2R_w^2}{r^2}\right) \sin 2\theta$$

$$+ \tau_{xy} \left(1 - \frac{3R_w^4}{r^4} + \frac{2R_w^2}{r^2}\right) \cos 2\theta, \tau_{\theta z} = (-\tau_{xz} \sin \theta + \tau_{yz} \cos \theta) \left(1 + \frac{R_w^2}{r^2}\right),$$

$$\tau_{rz} = (\tau_{xz} \cos \theta + \tau_{yz} \sin \theta) \left(1 - \frac{R_w^2}{r^2}\right)$$

معادلات-۴: حل تحلیلی توسط Bradley

البته Hiramatsu & Oka بیان داشتند که در معادلات-۴ بخش $\tau_{r\theta}$ ، ترم اول معادله در یک منفی می‌بایست ضرب گردد. [۱۷] در معادلات فوق R_w برابر شعاع چاه حفاری و r فاصله از مرکز چاه می‌باشد و $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ تنشهای قائم و برشی برجا هستند که در جهت محور چاه دوران داده شده‌اند. همچنین ν ضریب پواسون می‌باشد. در نتیجه در جدار چاه ($r = a$) و با اعمال شرایط مرزی $\sigma_r = P_w = \tau_{rz} = \tau_{\theta z} = 0$ معادلات-۵ به دست خواهد آمد.

معادلات سازگاری با فرض پیوستگی محیط و در قالب روابط کرنش تغییر مکان ارائه می‌گردند. معادلات رفتاری به نوع رابطه بین تنش‌های قائمی با کرنش‌های ناشی از این تنش‌ها می‌پردازند. تفاوت‌های موجود در روش‌های تحلیلی به لحاظ کردن مدل‌های رفتاری متفاوت برمی‌گردد به طوری که همزمان با پیشرفت‌های آزمایشگاهی، معادلات رفتاری متنوعی که توانایی کشف پیچیدگی‌های موجود در طبیعت را داشته باشند، ارائه گردیده است.

در حل تحلیلی سعی بر این است که معادله تعادل ناشی از حفاری چاه حل گردد. معادلات تعادل در فرم تنشی که از نوشتن تعادل در سه جهت X, Y, Z به دست می‌آید، به صورت معادلات-۱ می‌باشد.

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x = 0, \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y = 0,$$

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \rho f_z = 0$$

معادلات-۱: تعادل در مختصات دکارتی

این معادلات در مختصات استوانه‌ای به صورت معادلات ۲ نشان داده شده است. [۱۲]

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} + \rho f_r = 0, \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{z\theta}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + \rho f_\theta = 0,$$

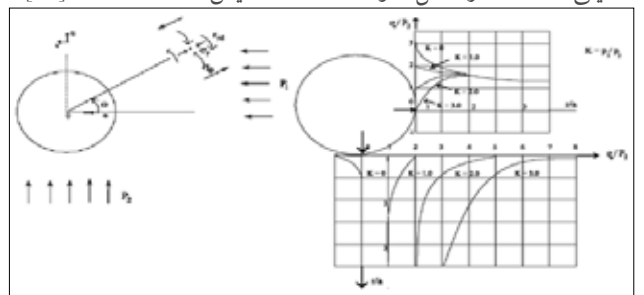
$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\tau_{rz}}{r} + \rho f_z = 0$$

معادلات-۲: تعادل در مختصات استوانه‌ای

۱-۱- روش‌های تحلیلی الاستیک

ساده‌ترین فرض برای معادله رفتاری مصالح، الاستیک خطی می‌باشد. بدین صورت که رابطه تنش و کرنش به صورت خطی بوده و هم‌زمان با باربرداری کرنش‌های ایجاد شده در مصالح، از بین می‌روند. نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که بسیاری از مصالح باربر نظیر فلزات، چوب، سنگ، سرامیک، بتن و... در محدوده تغییر شکل‌های کوچک دارای رفتار الاستیک خطی می‌باشند.

مسئله به دست آوردن تنش‌های ناشی از یک حفره دایره‌ای در محیط جامد بینهایت که تحت تنش‌های یکنواخت دور از حفره قرار گرفته است، نخستین بار توسط مهندس آلمانی Kirsch در سال ۱۸۹۸ حل گردید. حل تحلیلی Kirsch در شکل-۱ و معادلات-۳ نمایش داده شده است. [۱۳]



شکل ۱ | حل نموداری Kirsch (معادلات ۳)



کاربرد داشت. در صورتی که در طبیعت در مورد مصالحی مانند خاک و سنگ با محیط متخلخل مواجه هستیم. یعنی در داخل محیط، سیال دیگری مانند آب یا نفت وجود دارد. اولین بار ترزاقی مفهوم تنش در محیط متخلخل را بدین صورت بیان نمود که خواص مقاومتی و تغییر شکل پذیری در محیط متخلخل خاک به جای تنش به تنش موثر $(\sigma^A = \sigma - p)$ وابسته است. سپس آقای بایو رابطه کلی تری را بیان نمود که برای مصالح مانند سنگ نیز کاربرد داشت که به رابطه تنش موثر بایو $(\sigma^A = \sigma - \alpha.p)$ معروف شد. بدین صورت که برای سنگ‌هایی با ساختار بسیار محکم، ورود و خروج سیال تأثیری در مقاومت و تغییر شکل سنگ نداشته و در نتیجه، ضریب بایو (α) برابر صفر می‌باشد در عوض برای مصالحی مانند خاک که دارای ساختار ضعیفی می‌باشند، این ضریب برابر یک است. با در نظر گرفتن محیط متخلخل برای اطراف چاه معادلات ۸ قابل استفاده است. [۱۷]

$$\sigma_r = a_1 \left(1 - \frac{R_w^2}{r^2} \right) + a_2 \left(1 + 3 \frac{R_w^4}{r^4} - 4 \frac{R_w^2}{r^2} \right) \cos 2\theta + \tau_{xy}^0 \left(1 + 3 \frac{R_w^4}{r^4} - 4 \frac{R_w^2}{r^2} \right) \sin 2\theta$$

$$+ \frac{2\eta}{r^2} \left[\int_{R_w}^r r' \Delta P_f(r') dr' - \frac{r^2 - R_w^2}{R_0^2 - R_w^2} \int_{R_w}^{R_0} r' \Delta P_f(r') dr' + P_w \frac{R_w^2}{r^2} \right]$$

$$\sigma_\theta = a_1 \left(1 + \frac{R_w^2}{r^2} \right) - a_2 \left(1 + 3 \frac{R_w^4}{r^4} \right) \cos 2\theta + \tau_{xy}^0 \left(1 + 3 \frac{R_w^4}{r^4} \right) \sin 2\theta$$

$$- \frac{2\eta}{r^2} \left[\int_{R_w}^r r' \Delta P_f(r') dr' - r^2 \Delta P_f(r) + \frac{r^2 + R_w^2}{R_0^2 - R_w^2} \int_{R_w}^{R_0} r' \Delta P_f(r') dr' - P_w \frac{R_w^2}{r^2} \right]$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 4v \left(a_2 \frac{R_w^2}{r^2} \cos 2\theta + \tau_{xy}^0 \frac{R_w^2}{r^2} \sin 2\theta \right) + 2\eta \Delta P_f(r) - 4\eta \frac{v}{R_0^2 - R_w^2} \int_{R_w}^{R_0} r' \Delta P_f(r') dr'$$

معادلات-۸: حل تحلیلی با در نظر گرفتن فشار حفره‌ای

که نمادهای به کار رفته در معادلات-۸ در معادلات-۹ نمایش داده شده است.

$$a_1 = \left(\frac{\sigma_x^0 + \sigma_y^0}{2} \right), \quad a_2 = \left(\frac{\sigma_x^0 - \sigma_y^0}{2} \right), \quad \eta = \frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)} \alpha, \quad \Delta P_f(r) = P_f(r) - P_{f0}$$

$$\sigma_x^0 = I_{xx'}^2 \times \sigma_H + I_{xy'}^2 \times \sigma_H + I_{xz'}^2 \times \sigma_v, \quad \sigma_y^0 = I_{yx'}^2 \times \sigma_H + I_{yy'}^2 \times \sigma_H + I_{yz'}^2 \times \sigma_v,$$

$$\sigma_z^0 = I_{zx'}^2 \times \sigma_H + I_{zy'}^2 \times \sigma_H + I_{zz'}^2 \times \sigma_v, \quad \tau_{xy}^0 = I_{xx'} \times I_{yx'} \times \sigma_H + I_{xy'} \times I_{yy'} \times \sigma_H$$

$$+ I_{xz'} \times I_{yz'} \times \sigma_v,$$

$$I_{xx'} = \cos \alpha \times \cos i; \quad I_{yx'} = -\sin \alpha; \quad I_{zx'} = \cos \alpha \times \sin i; \quad I_{xy'} = \sin \alpha \times \cos i; \quad I_{yy'} = \cos \alpha; \quad I_{zy'} = \sin \alpha \times \sin i; \quad I_{xz'} = -\sin i; \quad I_{yz'} = 0; \quad I_{zz'} = \cos i,$$

معادلات-۹: نمادهای بکار رفته در معادلات-۸

در معادلات-۸، Pf فشار منفذی سیال در جداره چاه و P_{f0} فشار منفذی سیال حفره‌ای در نقاط دور از چاه می‌باشد. [۱۳] ازوایای α و i برای تبدیل تنش‌ها از چاه قائم به چاه مایل است (شکل-۲). [۱۸]

به تعبیر ساده‌تر در صورت دانستن تنش‌های اصلی در یک سازند با ضرب تانسور تبدیل تنش (شکل ۳-۳) در تنش‌های اصلی، تنش‌های قائم و برشی در جهت چاه مایل به دست می‌آید. [۱]

$$\sigma_\theta = \sigma_x + \sigma_y - p_w - 2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta - 4\tau_{xy} \sin 2\theta,$$

$$\sigma_z = \sigma_z - v[2(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + 4\tau_{xy} \sin 2\theta], \quad \tau_{\theta z} = 2(\tau_{yz} \cos \theta - \tau_{xz} \sin \theta),$$

معادلات-۵: تنش در جداره چاه براساس حل Bradley

در صورتی که محور چاه در جهت محور تنش‌های اصلی قرار گیرد، معادلات-۴ به شکل ساده‌تری قابل ارائه می‌باشند که در معادلات-۶ نمایش داده شده است. [۱۲]

$$\sigma_r = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R_w^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3 \frac{R_w^4}{r^4} - 4 \frac{R_w^2}{r^2} \right) \cos 2\theta + p_w \frac{R_w^2}{r^2}$$

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

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu_{fr}(\sigma_H - \sigma_h) \frac{R_w^2}{r^2} \cos 2\theta, \quad \tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 - 3 \frac{R_w^4}{r^4} + 2 \frac{R_w^2}{r^2} \right) \sin 2\theta, \quad \tau_{rz} = \tau_{\theta z} = 0$$

معادلات-۶: معادلات-۴ هنگامی که محور چاه در جهت محور تنش‌های اصلی است.

در چاه افقی که محور چاه در جهت تنش‌های اصلی است، معادلات فوق با تعویض تنش‌های دور از چاه قابل استفاده است. در جداره چاه $(r=R_w)$ معادلات ۶ به معادلات ۷ ساده می‌شود. [۱۲]

$$\sigma_r = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{R_w^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3 \frac{R_w^4}{r^4} - 4 \frac{R_w^2}{r^2} \right) \cos 2\theta + p_w \frac{R_w^2}{r^2}$$

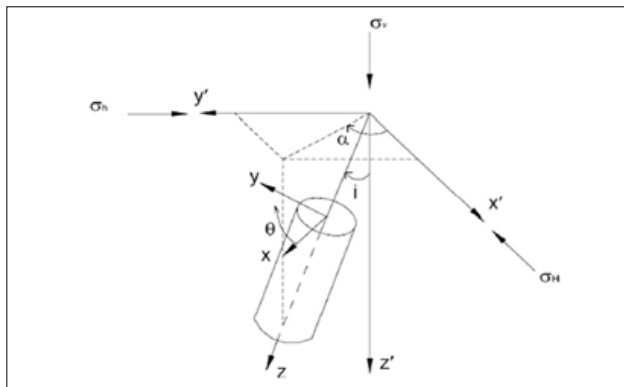
$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{R_w^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3 \frac{R_w^4}{r^4} \right) \cos 2\theta - p_w \frac{R_w^2}{r^2}$$

$$\sigma_z = \sigma_v - 2\nu_{fr}(\sigma_H - \sigma_h) \frac{R_w^2}{r^2} \cos 2\theta, \quad \tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 - 3 \frac{R_w^4}{r^4} + 2 \frac{R_w^2}{r^2} \right) \sin 2\theta, \quad \tau_{rz} = \tau_{\theta z} = 0$$

معادلات-۷: معادلات-۶ در جداره چاه

۱-۲- روش‌های تحلیلی پوروالاستیک

معادلاتی که تاکنون ارائه گردید برای یک محیط جامد غیر متخلخل



شکل ۲ | زوایای α و i برای تبدیل تنش‌های چاه قائم به مایل

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin^2 \alpha & \cos^2 \alpha & 0 \\ \cos^2 \alpha \cos^2 i & \sin \alpha \cos^2 i & \sin^2 i \\ \cos^2 \alpha \sin^2 i & \sin^2 \alpha \sin^2 i & \cos^2 i \\ -\sin \alpha \cos \alpha \cos i & \sin \alpha \cos \alpha \cos i & 0 \\ \cos i \sin i (\cos \alpha)^2 & \cos i \sin i (\sin \alpha)^2 & -\cos i \sin i \\ -\sin i \cos \alpha \sin \alpha & \sin i \sin \alpha \cos \alpha & 0 \end{bmatrix}$$

شکل ۳ | ماتریس تبدیل تنش‌های اصلی به تنش‌ها در جهت چاه مایل

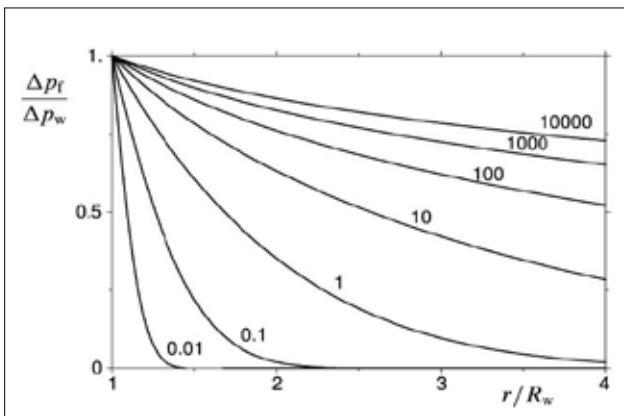
با جدار چاه در نظر گرفتن محیط سنگ به عنوان یک محیط پیوسته بدون ترک، در نظر نگرفتن تغییرات فشار حفره ای سیال با زمان را جز فرضیات خود دارد.

۱-۲-۱- پوروالاستیک تابع زمان

هنگامی که مصالح، الاستیک خطی و غیرمتخلخل فرض شوند بازتوزیع تنش هنگام حفاری چاه بلادرنگ اتفاق می افتد. در صورتی که مصالح، متخلخل و نفوذپذیر در نظر گرفته شوند به دلیل اینکه سیال به مرور زمان با جابه جایی فشار وارده را از بین می برد، اثر زمان در تحلیل های پوروالاستیک لحاظ می شوند. همانطور که اشاره شد در معادلات ۸- فرض بر این بود که فشار سیال حفره ای فقط تابعی از شعاع است، در صورتی که فشار سیال حفره ای به دو دلیل با زمان تغییر می کند؛ دلیل اول ناشی از برداشت سیال از مخزن می باشد و دلیل دوم ناشی از نشست مخزن است. برای اینکه مکانیزم اول اتفاق بیفتد دیواره چاه باید نفوذپذیر در نظر گرفته شود و برای اینکه تغییر در فشار حفره ای سیال ناشی از نشست مخزن را به دست آوریم لازم است که از حرکت سیال در مخزن جلوگیری شود در نتیجه دیواره چاه نفوذناپذیر فرض می گردد. [۱۹]

Detourny & Cheng (1998) [۲۰] اثر تابعیت زمان چاه قائم تحت تنش های غیریکنواخت دور از چاه را بررسی کردند. بدین صورت که در حالت اول با فرض نفوذپذیری دیواره ای چاه با حل معادلات تعادل، الاستیسیته و تحکیم نتایج تغییرات فشار حفره ای و تنش مماسی با زمان را به صورت شکل ۵ و شکل ۶ نمایش دادند.

در حالتی که دیواره چاه را نفوذناپذیر فرض کنیم و تنش های افقی دور از سازند ناهمسانگرد باشد حفاری چاه منجر به ایجاد کرنش حجمی در مخزن و متعاقباً تغییر در فشار حفره ای سیال می گردد که این فشار حفره ای به مرور زمان به کمک جریان ایجاد شده از بین می رود. برای محاسبه فشار حفره ای ناشی از تغییرات تنش در مخزن، فرض نفوذناپذیری دیواره چاه لازم می باشد. Detourny & Cheng برای حالت نفوذناپذیری دیواره چاه، تغییرات تنش



شکل ۵ | تغییرات فشار حفره ای با فاصله از چاه و زمان

حل نموداری معادلات ۸- با فرض اینکه تغییرات فشار حفره ای سیال با شعاع ثابت باشد، در شکل ۴- نمایش داده شده است. [۱۲]

در صورتی که جریان سیال در محیط متخلخل از رابطه دارسی (معادله ۱۰) تبعیت کند، حل تحلیلی معادلات ۸- برابر معادلات ۱۱- می گردد. [۱۷]

$$\frac{Q_0}{2\pi r h} = \frac{k}{\eta f} \frac{dP_f}{dr}$$

معادله ۱۰- معادله دارسی

$$\sigma_r = a_1 \left(1 - \frac{R_w^2}{r^2}\right) + a_2 \left(1 + 3\frac{R_w^4}{r^4} - 4\frac{R_w^2}{r^2}\right) \cos 2\theta + \tau_{xy}^0 \left(1 + 3\frac{R_w^4}{r^4} - 4\frac{R_w^2}{r^2}\right) \sin 2\theta$$

$$- \eta (P_0 - P_w) \left\{ \frac{R_w^2}{R_0^2 - R_w^2} \left[1 - \left(\frac{R_0}{r}\right)^2 \right] + \frac{\ln\left(\frac{R_0}{R_w}\right)}{\ln\left(\frac{R_0}{R_w}\right)} \right\} + P_w \frac{R_w^2}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = a_1 \left(1 + \frac{R_w^2}{r^2}\right) - a_2 \left(1 + 3\frac{R_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \tau_{xy}^0 \left(1 + 3\frac{R_w^4}{r^4}\right) \sin 2\theta$$

$$- \eta (P_0 - P_w) \left\{ \frac{R_w^2}{R_0^2 - R_w^2} \left[1 + \left(\frac{R_0}{r}\right)^2 \right] + \frac{\ln\left(\frac{R_0}{R_w}\right) - 1}{\ln\left(\frac{R_0}{R_w}\right)} \right\} - P_w \frac{R_w^2}{r^2}$$

$$\sigma_z = \sigma_z^0 - 4 \times \left(a_2 \times \frac{R_w^2}{r^2} \times \cos 2\theta + \tau_{xy}^0 \times \frac{R_w^2}{r^2} \times \sin 2\theta \right) - \eta (P_0 - P_w) \left[\frac{2v R_w^2}{R_0^2 - R_w^2} + \frac{2 \ln\left(\frac{R_0}{R_w}\right) - v}{\ln\left(\frac{R_0}{R_w}\right)} \right]$$

معادلات ۱۱- : معادلات ۸- با فرض جریان شعاعی

معادلات ۱۱- : در جدار چاه مایل به شکل معادلات ۱۲- درمی آید.

$$\sigma_r = P_w, \quad \sigma_\theta = \sigma_x^0 + \sigma_y^0 - 2(\sigma_x^0 - \sigma_y^0) \cos 2\theta - 4\tau_{xy}^0 \sin 2\theta - P_w + 2\eta(P_w - P_0),$$

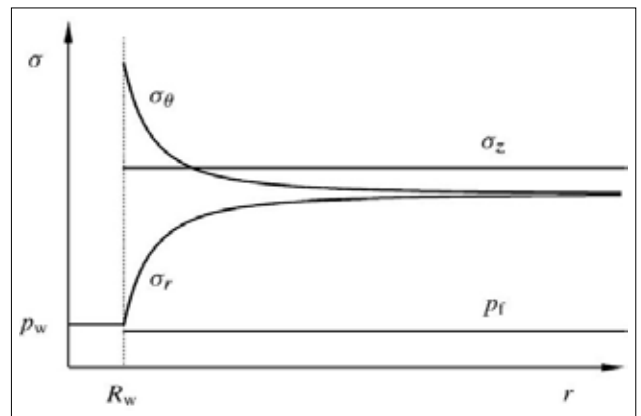
$$\sigma_z = \sigma_z^0 - v[2(\sigma_x^0 - \sigma_y^0) \cos 2\theta + 4\tau_{xy}^0 \sin 2\theta] + 2\eta(P_f - P_0),$$

$$\tau_{\theta z} = 2(-\tau_{xz}^0 \sin \theta + \tau_{yz}^0 \cos \theta), \quad \tau_{r\theta} = 0, \quad \tau_{rz} = 0,$$

معادلات ۱۲- : حل تحلیلی معادلات ۱۱- در جدار چاه

تنها تفاوت معادلات ۱۲- با معادلات ۵- در اضافه شدن ترم فشار حفره ای در معادلات به علت شرایط محیط متخلخل می باشد.

معادلات ۱۱- علی رغم کامل بودن، مسائلی از قبیل محیط الاستیک خطی، در نظر نگرفتن اندر کنش سیمانکاری و لوله چاه به عنوان پوشش



شکل ۱۴ | حل تحلیلی



پوروالاستیک به دلیل تغییرات حرارتی و واکنش‌های شیمیایی نیز رخ می‌دهد که در این مقاله به آن‌ها اشاره نشده است.

۲-۲-۱- تحلیل پوروالاستیک با در نظر گرفتن اثر تخریب ناشی از حفاری
 (Kaewjuea&etall (2014) تحلیل پوروالاستیک تابع زمان را با در نظر گرفتن تغییرات خصوصیات هیدرولیکی (نفوذپذیری) و مکانیکی (مدول برشی) اطراف چاه به علت حفاری مورد بررسی قرار دادند که تا کنون این مورد علی‌رغم اهمیت در نظر گرفته نشده بود. بدین صورت که به علت حفاری چاه تا محدوده مشخصی از اطراف چاه مدول برشی به صورت خطی کاهش یافته و نفوذپذیری افزایش می‌یابد به طوری که با در نظر گرفتن این تغییر، تغییر مکان شعاعی افزایش می‌یابد و هم چنین تخلیه شعاعی سیال به سمت چاه زیاد می‌شود با این وجود تنش مماسی نسبت به حالتی که این تغییرات لحاظ نشود کاهش پیدامی‌کند. [۲۲]

۳-۲-۱- شعاع ناحیه پلاستیک

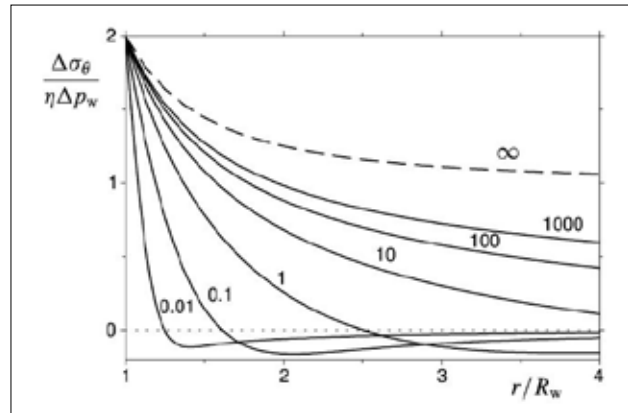
تمامی روش‌های تحلیلی که تا کنون بررسی گردید بر مبنای در نظر گرفتن محیط الاستیک و پوروالاستیک برای سازند مورد حفاری می‌باشد، حال سؤالی که به ذهن متبادر می‌گردد این است که در چه شرایطی دیگر فرض الاستیک بودن مصالح نامناسب است و رفتار مصالح به علت تغییر شکل‌های

Parameter	$S_1 > S_2 > S_3$	$S_2 > S_1 > S_3$	$S_3 > S_1 > S_2$	$S_1 > S_3 > S_2$	$S_2 > S_3 > S_1$	$S_3 > S_2 > S_1$
a_1	$\frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2}$	$\frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2}$	$\frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2}$	$\frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2}$	$\frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2}$	$\frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2}$
a_2	$\frac{\sigma'_x - \sigma'_y}{2}$	$\frac{\sigma'_x - \sigma'_y}{2}$	$\frac{\sigma'_x - \sigma'_y}{2}$	$\frac{\sigma'_x - \sigma'_y}{2}$	$\frac{\sigma'_x - \sigma'_y}{2}$	$\frac{\sigma'_x - \sigma'_y}{2}$
a_3	$a_2 \times \cos 2\theta + \tau'_{xy} \times \sin 2\theta$	$a_2 \times \cos 2\theta + \tau'_{xy} \times \sin 2\theta$	$a_2 \times \cos 2\theta + \tau'_{xy} \times \sin 2\theta$	$a_2 \times \cos 2\theta + \tau'_{xy} \times \sin 2\theta$	$a_2 \times \cos 2\theta + \tau'_{xy} \times \sin 2\theta$	$a_2 \times \cos 2\theta + \tau'_{xy} \times \sin 2\theta$
a_4	$\eta(P'_a - P_w)$	$\eta(P'_a - P_w)$	$\eta(P'_a - P_w)$	$\eta(P'_a - P_w)$	$\eta(P'_a - P_w)$	$\eta(P'_a - P_w)$
a_5	$\frac{R_w^2}{R_0^2 - R_w^2}$	$\frac{R_w^2}{R_0^2 - R_w^2}$	$\frac{R_w^2}{R_0^2 - R_w^2}$	$\frac{R_w^2}{R_0^2 - R_w^2}$	$\frac{R_w^2}{R_0^2 - R_w^2}$	$\frac{R_w^2}{R_0^2 - R_w^2}$
a_6	$(k+1) \times (a_1 + P_w) + 4ka_2$	$(a_1 - P_w) + 4vka_2$	$4vka_2 + P_w - a_1 - 4a_3$	$(k+1) \times (P_w - a_1) - 4a_3$	$k(P_w - a_1) - 4a_3v$	$4a_3(k-v) + k(a_1 - P_w)$
a_7	$-a_4a_5R_0^2$	$-a_4a_5R_0^2$	$a_4a_5R_0^2$	$a_4a_5kR_0^2$	$a_4a_5(k+1)R_0^2$	$-a_4a_5kR_0^2$
a_8	$1 + (k-1) \times \ln(R_0)$	$(vk-1) + (1-2k) \times \ln(R_0)$	$vk + (1-2k) \times \ln(R_0)$	$(1-k) \ln(R_0) + k$	$(2-k) \times \ln(R_0) + k$	$(2-k) \times \ln(R_0) - v$
c_1	$a_6R_0^2 + a_7$	$a_6R_0^2 + a_7$	$a_6R_0^2 + a_7$	$a_6R_0^2 + a_7$	$a_6R_0^2 + a_7$	$a_6R_0^2 + a_7$
c_2	$-3(k+1) \times a_3R_0^2$	$-3a_3R_0^2$	$3a_3R_0^2$	$3(k+1)a_3R_0^2$	$3ka_3R_0^2$	$-3ka_3R_0^2$
c_3	$\frac{(1-k)a_4}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$\frac{(1-2k)a_4}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$\frac{(1-2k)a_4}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$\frac{(1-k)a_4}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$\frac{(2-k)a_4}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$\frac{(2-k)a_4}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$
c_4	$C_0 + (k+1)a_3 + kS_2^2 + a_4a_5 \times (a_1 - a_4a_5) - \frac{a_4a_5}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$C_0 - a_1 - a_3 + kS_2^2 + a_4a_5 \times (1-2vk) + \frac{a_4a_5}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$C_0 - a_1 - a_3 + kS_2^2 + a_4a_5 \times (1-2vk) + \frac{a_4a_5}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$C_0 - (k+1)a_3 + (k-1) \times (a_1 - a_4a_5) + \frac{a_4a_5}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$(C_0 - S_2^2) + k(a_1 - a_3) + a_4a_5 \times (2v-k) + \frac{a_4a_5}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$	$(C_0 - S_2^2) + k(a_1 - a_3) + a_4a_5 \times (2v-k) + \frac{a_4a_5}{\ln(\frac{R_0}{R_w})}$

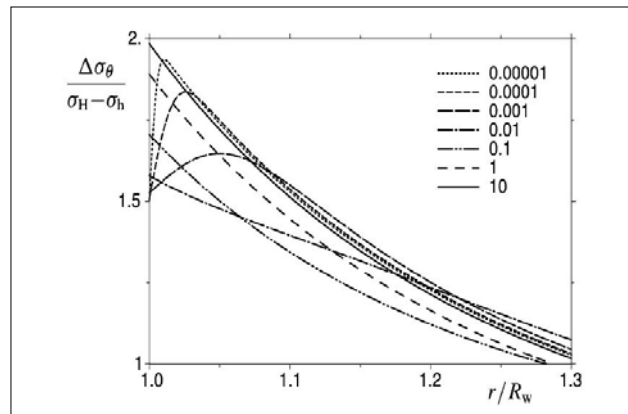
شکل ۹ نماد های به کار رفته در معادله ۱۳

مماسی با زمان را که با تفاوت تنش‌های اصلی بی‌بعد گردیده، ارائه نمودند (شکل-۷).

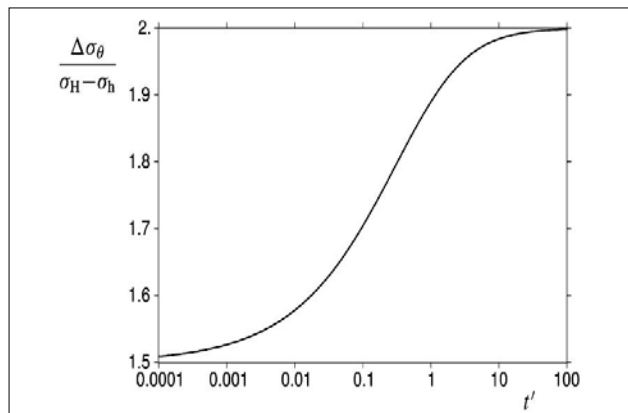
برای مثال تغییرات تنش مماسی در جداره چاه با زمان در شکل ۸- نشان داده شده است. در یک مثال عملی، با در نظر گرفتن $P_w=20\text{Mpa}$, $sH=40\text{Mpa}$ $sh=30\text{Mpa}$ در زمان‌های اولیه به 20Mpa در زمان‌های طولانی تغییر می‌کند. لازم به ذکر است اثر تابعیت زمان در فضای



شکل ۶ تغییرات تنش مماسی با فاصله از چاه و زمان



شکل ۷ تغییرات تنش مماسی در حالت دیواره نفوذ ناپذیر



شکل ۸ تغییرات تنش مماسی با زمان در جداره چاه

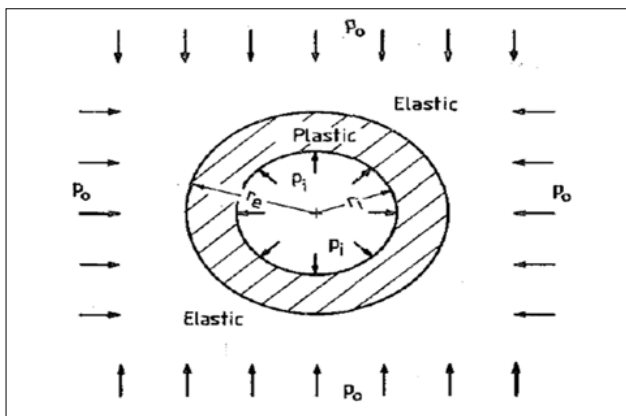
۳-۱- روش های تحلیلی پلاستیک

پس از مشخص شدن اینکه در چه مواقعی وارد ناحیه پلاستیک می گردیم و نحوه به دست آوردن شعاع ناحیه پلاستیک، فعالیت های انجام گرفته در محیط پلاستیک مرور می شود. در اغلب روش های حل پلاستیک، رفتار سنگ الاستوپلاستیک با الاستیک تُرد شکن پلاستیک فرض می شود و تنش های برجا به صورت همسانگرد در نظر گرفته می شوند. همچنین، در اکثر تحلیل های پلاستیک از معیار گسیختگی خطی موهر کولومب یا غیر خطی هوک براون بهره گرفته شده است. با این وجود مطابق شکل ۱۰ ژئومترالی هایی مانند خاک و سنگ می توانند پس از ورود به ناحیه پلاستیک از خود رفتار نرم شونده یا سخت شونده نشان دهند. به عبارت دیگر، پارامترهای مقاومتی نظیر زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در حین گسترش کرنش پلاستیک در حالت نرم شوندگی کاهش و در حالت سخت شوندگی افزایش می یابند؛ اگرچه توقع بر این است که در اکثر اوقات مصالح سنگی دارای رفتار نرم شونده باشند. تجربیات آزمایشگاهی نشان می دهد که تحت تنش های محصور نسبتاً زیاد (که در چاه های نفت و گاز اتفاق می افتد) مصالح رفتار سخت شونده از خود نمایش می دهند. [۲۰]

در شکل ۱۱ نمادهای تحلیل پلاستیک ارائه شده است. اگر رفتار مصالح مطابق شکل ۱۲ الاستیک تُرد شکن پلاستیک باشد از معیار گسیختگی هوک براون طبق معادله ۱۴ تبعیت کند، در شرایط تقارن محوری معادلات ۲ تبدیل به معادله ۱۵ می شود با حل هم زمان معادله ۱۴ و معادله ۱۵، معادلات ۱۶ استخراج می گردد. با توجه به اینکه در مرز شعاع ناحیه پلاستیک هر دو راه حل الاستیک و پلاستیک معتبر می باشد، در نتیجه با جایگذاری حل تحلیلی الاستیک در معیار گسیختگی و حل معادله بر حسب شعاع، شعاع ناحیه پلاستیک طبق معادلات ۱۷ بر اساس معیار گسیختگی هوک بر آون به دست می آید. [۲۱]

نتیجه گیری

در این مقاله مهم ترین کارهای تحلیلی صورت گرفته در زمینه آنالیز پایداری چاه های نفت و گاز مرور و به سه دسته الاستیک، پورو الاستیک و پلاستیک



شکل ۱۱ نماد های بکار رفته در معادلات ۱۶ و ۱۷

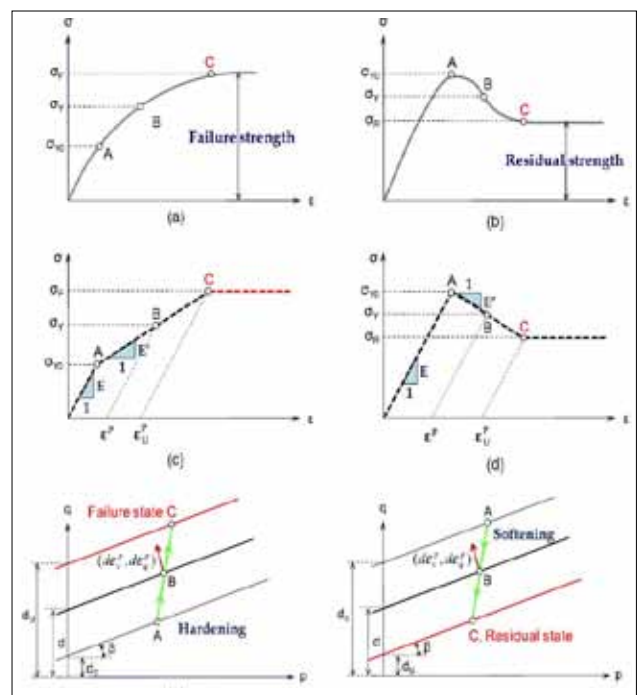
بزرگ وارد ناحیه پلاستیک می گردد.

یکی از مسائلی که در تحلیل پلاستیک مورد توجه قرار می گیرد، به دست آوردن محدوده پلاستیک اطراف چاه می باشد که به طور خلاصه تحت عنوان شعاع ناحیه پلاستیک مطرح می شود. با جایگزینی تنش های الاستیک در معیارهای گسیختگی و مرتب کردن معادله بر حسب r ، شعاع ناحیه پلاستیک R_p به دست می آید. در نتیجه، شروع ورود به ناحیه پلاستیک زمانی است که R_p مقداری مثبت را اتخاذ کند. برای مثال با جای گذاری معادلات ۱۱ در معیار گسیختگی موهر کولومب، معادله ۱۳ به دست می آید. [۱۹]

$$\left(\frac{1}{R_p}\right)^2 \times \left[C_1 + C_2 \left(\frac{1}{R_p}\right)^2 \right] + C_3 \ln(R_p) = C_4, \quad (C_1, C_2, C_3, C_4) \\ = f(P_w, P_f, \alpha, \phi, R_w, R_0, \vartheta, \sigma_H, \sigma_n, \sigma_v, i, \alpha, \theta)$$

معادله ۱۳: محاسبه شعاع پلاستیک (جایگذاری معادلات ۱۱ در معیار موهر کولومب)

پارامترهای معادله ۱۳ در شکل ۹-۹ و در سه حالت رژیم عمومی تنش (نرمال-امتداد لغز و معکوس) ارائه شده است. نکته جالب توجه این است که معادله ۱۳ وابسته به زاویه θ (زاویه نسبت به تنش افقی حداکثر) می باشد و بنابراین، در حالت عمومی ناحیه پلاستیک به شکل دایره نیست که البته با فرضیات برابری تنش های افقی و قائم بودن چاه، معادله ۱۳ مستقل از زاویه θ می گردد و در نتیجه شعاع ناحیه پلاستیک دور تا دور چاه یکسان می شود. [۱۹]



شکل ۱۰ سمت چپ رفتار سخت شونده مصالح سمت راست رفتار نرم شونده مصالح به صورت واقعی و تقریب مهندسی



$$\sigma_{\theta} = \sigma_r + (m_r \sigma_c \sigma_r + s_r \sigma_c^2)^{1/2}$$

معادله ۱۴ - معیار گسیختگی هوک براون

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} = 0$$

معادله ۱۵ - معادله تعادل (معادلات ۳) در حالت تقارن محوری

$$\sigma_r = \frac{m_r \sigma_c}{4} \left[\ln \left(\frac{r}{r_i} \right) \right]^2 + \left[\ln \left(\frac{r}{r_i} \right) \right] (m_r \sigma_c p_i + s_r \sigma_c^2)^{1/2} + p_i, \sigma_{\theta} = \sigma_r + (m_r \sigma_c \sigma_r + s_r \sigma_c^2)^{1/2}$$

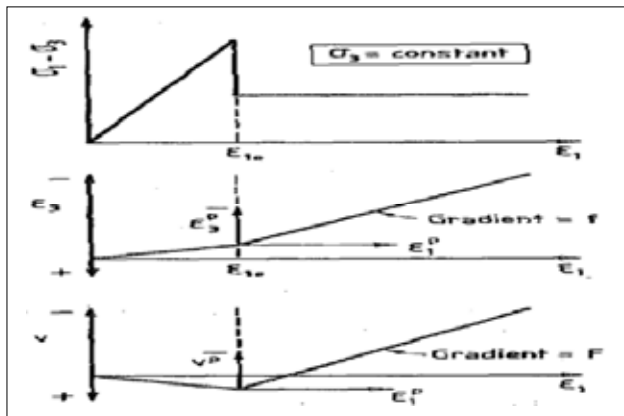
معادلات ۱۶ - تنش های شعاعی و مماسی در ناحیه پلاستیک با استفاده از معیار گسیختگی هوک براون

$$r_e = r_i \exp \left[N - \frac{2}{m_r \sigma_c} (m_r \sigma_c p_i + s_r \sigma_c^2)^{1/2} \right]$$

$$N = \frac{2}{m_r \sigma_c} (m_r \sigma_c p_0 + s_r \sigma_c^2 - m_r \sigma_c^2 M)^{1/2}$$

معادلات ۱۷ - شعاع ناحیه پلاستیک (جایگذاری حل تحلیلی الاستیک در معیار گسیختگی هوک براون)

دسته بندی گردید. همچنین، روش پوروالاستیک به زیر دسته های تابع زمان و در نظر گرفتن تخریب ناشی از حفاری تقسیم شد. در مورد روش های تحلیلی پلاستیک به مسائل عمق ورود به ناحیه پلاستیک و یافتن شعاع ناحیه پلاستیک با دو معیار گسیختگی موهر-کولومب و هوک-براون اشاره شد. همچنین، فرضیات و محدودیت های مربوط به هر یک از این روش ها نیز بیان شد.



شکل ۱۲ | رفتار مصالح الاستیک تر دشکن پلاستیک

پانویس ها

¹ Cap Rock Integrity

² Wellbore Instability

³ Sand Production

منابع

- Petroleum related rock mechanics (Vol. 53). Elsevier.
- [13] Goodman, R. E., Taylor, R. L., & Brekke, T. L. (1968). A model for the mechanics of jointed rock. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.*
- [14] Timoshenko, S., & Goodier, J. N. *Theory of elasticity*, 1951. New York, 412
- [15] Bradley, W. B. (1979). Failure of inclined boreholes. *Journal of Energy Resources Technology*, 101(4), 232239-.
- [16] Hiramatsu, Y., & Oka, Y. (1968, July). Determination of the stress in rock unaffected by boreholes or drifts, from measured strains or deformations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 5, No. 4, pp. 337353-)*. Pergamon.
- [17] Heidarian, M., Jalalifar, H., Schaffie, M., & Jafari, S. (2014). New Analytical Model for Predicting the Unstable Zone Around the Borehole. *SPE Journal*, (Preprint).
- [18] Al-Shaabi, S. K., Al-Ajmi, A. M., & Al-Wahaibi, Y. (2013). Three dimensional modeling for predicting sand production. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 109, 348363-.
- [19] Detournay, E., & Cheng, A. D. (1988, June). Poroelastic response of a borehole in a non-hydrostatic stress field. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts (Vol. 25, No. 3, pp. 171182-)*. Pergamon.
- [20] Chen, S. L., Abousleiman, Y. N., & Muraleetharan, K. K. (2011). Closed-Form Elastoplastic Solution for the Wellbore Problem in Strain Hardening/Softening Rock Formations. *International Journal of Geomechanics*, 12(4), 494507-.
- [21] Brown, E. T., Bray, J. W., Ladanyi, B., & Hoek, E. (1983). Ground response curves for rock tunnels. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(1), 1539-1549.
- [22] Kaewjuea, W., & Senjuntichai, T. (2014). Poromechanical response of borehole in excavation disturbed zone. *Computers and Geotechnics*, 56, 148-159.
- [1] ایپارسامهر، د.، معارف وند، پ.، عطایی، پ. م. (۱۳۸۹)، دانشگاه، ص. ا. بررسی انواع ریزش ها در پاینداری دیواره چاه های نفتی و روش های پایدار سازی آنها.
- [2] Jang, Y., Yu, M., Miska, S. Z., & Takach, N. (2009, January). Wellbore Stability: A Critical Review and Introduction to DEM. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers.
- [3] Shukla, R., Ranjith, P., Haque, A., & Choi, X. (2010). A review of studies on CO2 sequestration and caprock integrity. *Fuel*, 89(10), 26512664-.
- [4] Wu, R. (2006). Some fundamental mechanisms of hydraulic fracturing (Doctoral dissertation, Georgia Institute of Technology).
- [5] بلاغ، آ. س.، موسوی، م.، موسوی، س. (۱۳۸۸)، دانشکده، م. م.، پردیس، د. د. ف. و. دانشگاه ت. پیش بینی تولید ماسه با استفاده از مدل سازی عددی.
- [6] Abdulhadi, N. O., Germaine, J. T., & Whittle, A. J. (2010). Experimental study of wellbore instability in clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137(8), 766776-.
- [7] Salehi, S., Hareland, G., & Nygaard, R. (2010). Numerical simulations of wellbore stability in under-balanced-drilling wells. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 72(3), 229235-.
- [8] Charlez, P. A. (1997). The impact of constitutive laws on wellbore stability: a general review. *SPE Drilling & Completion*, 12(02), 119128-.
- [9] Mohiuddin, M. A., Khan, K., Abdurraheem, A., Al-Majed, A., & Awal, M. R. (2007). Analysis of wellbore instability in vertical, directional, and horizontal wells using field data. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 55(1), 8392-.
- [10] موحدی، ن. ع.، قاسم، ا. م.، یاراحمدی، م. (۱۳۹۳)، دانشگاه، آ. ا.، واحد، ع. و. ت. ت. و. و. گ. برآورد فشار بهینه گل حفاری با استفاده از معیارهای مختلف شکست در چاه های آنحرافی، مطالعه موردی: چاه sk52 میدان نفتی سلمان
- [11] Potts, D. M., Zdravkovic, L., & Zdravkovic, L. (2001). *Finite element analysis in geotechnical engineering: application (Vol. 2)*. Thomas Telford
- [12] Fjar, E., Holt, R. M., Raaen, A. M., Risnes, R., & Horsrud, P. (2008).