



#### 1 مقدمه

ناپابداری چاه در مرحله حفاری درون ساختگاهها یکی از پر خرج ترین مشکلاتی است که صنعت نفت با آن مواجه است. با توجه به افزایش روز افزون هزینههای نگهـداری مـورد نیـاز بـرای پایـدار سـازی دیواره چاههای نفتی، شرکتهای نفتی تمایل بیشتری برای استفاده از چاههـای بـاز (بـدون نگهـداری) نشان دادهاند، در نتیجـه شـناخت تمـام پارامترهـای مـوثر بـر ناپایـداری دیـواره چاههـا الـزامی اسـت. پارامترهای موثر بر پایداری دیواره چاههـای نفـتی عبارتنـد از: تنشهـای برجـا، فشـار منفـذی سـازد، مقاومت سنگ در برگیرنده، فشار سیال حفاری و مسیر حفاری.

کنترل ناپایداریهای دیواره چاه، نیاز بـه درک متقابـل انـدرکنش مقـاومت سـنگ و تنش برجـا دارد. بـا توجه به اینکه تنش برجا و مقاومت سـنگ در کنـترل مـا نیسـتند، تنهـا راه جلوگـیری از گسـیختگیهای دیواره در طول حفاری به دست آوردن مسیرهای بهینه حفاری و محدوده بهینه وزن گل حفاری است، که این دو پارامتر قابل کنترل هستند و با تغییر دادن آنها میتوان نتیجه مطلوب را بدست آورد [1].

در این مُقَالَه، تَحلَیل پایداری در امتدادهای مُخَلَف و تخْمین امتداد بهینه حفاری از نظر پایداری، شَـرح داده شده است. حفاری در امتداد بهینه، کمک بسیاری به کاهش هزینهها میکند، چون در این امتدادها نیاز به وزن گل کمتری برای جلوگیری از ناپایداری است. همچنین حفاری بصورت افقی کمک بسیاری به ازدیاد برداشت نفت میکند، چـون عملیات حفـاری، درون سـازند نفتده انجـام شـده و ارتبـاط بیشتری با نفت مخزن دارد. بنـابراین اطلاع از اینکـه امتـداد حفـاری در امتـداد تفیت میباری. پایداری بیشتری برخوردار است یا در امتداد تنش افقی حداکثر، حائز اهمیت میبارد.

روشهای مختلفی از قبیل فیزیکی، تجربی و عددی برای تحلیل پایـداری و محاسـبه تنش وجـود دارد. اغلب سازههای زیرزمینی دارای اشکال پیچیدهای بوده و وجود درز و شکاف در آنها سبب میشود که استفاده از روشهای معمولی (فیزیکی، تجربی)، برای محاسبه تنشهـا در آنهـا ناکارآمـد و غـیر قابـل استفاده باشد. امروزه با پیشرفت روشهای عددی قابـل اجـرا توسـط کـامپیوتر حـل اینگونـه مسـایل بهبود یافته و جوابهای ارایه شده به روشهای مختلف به میزان بیشتری به واقعیت نزدیک میباشـند. با توجه به اینکه محیط مورد تحلیل فاقـد درزه و شـکاف اسـت، از روش تفاضـل محـدود، کـه یکی از روشهای عددی است و محیط را بصورت پیوسته در نظر میگیرد، استفاده شـده اسـت. نـرم افـزار FLAC برای حل مسائل مکانیک سـنگ و خـاک در محیطهـای پیوسـته بـر مبنـای روش تفاضـل محـدود پایهگذاری شده است.

بدین ترتیب برای سازند سنگ آهک مخزن نفتی کوپال، تحلیل پایداری حفاری در سه امتداد قائم، تنش افقی حداقل و تنش افقی حداکثر با استفاده از نرمافـزار FLACانجـام شـده اسـت، تـا امتـداد بهینـه حفاری در شرایط کلی قائم و افقی و همچنین در انتخاب بین دو امتـداد تنش افقی حـداقل و حـداکثر به دست آید.

### 2 تعیین پارامترهای ژئومکانیکی

پارامترهای ژئومکانیکی مخزن حاصل از بررسیهای دینامیکی بـا اسـتفاده از لاگ صـوتی (کـه شـامل زمان گذر موج فشاری و برشـی) و لاگ چگـالی بـه دسـت میآینـد. بـا انـدازهگیری خـواص یـاد شـده پارامترهای ژئومکانیکی سازند به شرح ذیل محاسبه میشوند [2]، [3]: ضریب پواسون دینامیکی

$$v_d = \frac{\left(\overline{\Delta t_c}\right)^{-2}}{2\left(\left(\frac{\Delta t_s}{\Delta t_c}\right)^2 - 1\right)} = \frac{V_{c^2} - 2V_{s^2}}{2\left(V_{c^2} - V_{s^2}\right)}$$

مدول الاستيسيته ديناميكي



هشتمین کنفرانس مکانیک سنگ ۲۰–۲۲ اردیبهشت ۱۴۰۱–داتشگاه صنعتی شاهرود

$$E_{d} = \frac{\rho_{b} \left( \frac{3}{\Delta t_{c}} \right)^{-4}}{\left( \frac{\Delta t_{s}}{\Delta t_{c}} \right)^{2} - 1} = \frac{\rho_{b} V_{s^{2}} (3V_{c^{2}} - 4V_{s^{2}})}{V_{c^{2}} - V_{s^{2}}}$$

مدول برشي ديناميكي

مدول حجمي ديناميكي

 $G_d = 1.348 \times 10^{10} \cdot \frac{r_b}{At}$ 

$$(K_b)_d = \frac{1}{c_b} = 1.348 \times 10^{10} \cdot \rho_b (\frac{1}{\Delta t_c^2} - \frac{1}{3\Delta t_s^2})$$

که در این روابط  ${}^{\Delta t_c}$  زمان گذر موج فشاری برحسب میکرو ثانیه بر فوت،  ${}^{\Delta t_s}$  زمان گذر موج برشی بر حسب میکرو ثانیه بر فوت،  ${}^{E_c}$  زمان گذر موج برشی بر حسب میکرو ثانیه بر فوت،  ${}^{E_c}$  زمان گذر موج برشی بر حسب میکرو ثانیه بر فوت،  ${}^{E_c}$  مدول یانگ دینامیکی بر حسب میکرو ثانیه بر فوت،  ${}^{B_c}$  مدول یانگ دینامیکی بر حسب پوند بر اینچ مربع،  ${}^{b_c}$  مدول یانگ دینامیکی بر حسب پوند بر اینچ مربع،  ${}^{b_c}$  مدول یانگ دینامیکی بر حسب پوند بر اینچ مربع،  ${}^{b_c}$  مدول یانگ دینامیکی بر حسب پوند بر اینچ مربع،  ${}^{b_c}$  مدول برشی دینامیکی بر حسب پوند بر اینچ مربع،  ${}^{b_c}$  مدول پواسون، مدول  ${}^{(K_b)_d}$  مدول حجمی دینامیکی بر حسب پوند بر اینچ مربع، و می براهند. بین مدول با توجه به اینکه در مدلهای ژئومکانیکی مقادیر استایکی، باید مورد استفاده قـرار گیرنـد، بین مـدول یانگ دینامیکی و استایکی در میدان نفتی کوپال، برای یکی از چاهها، توسط شرکت شلومبرژه رابطه دیل به دست آمده است [4]:

در این رابطه <sup>E</sup> مدول یانگ دینامیکی، مدول یانگ استاتیکی و <sup>¢</sup>ه تخلخل موثر، هستند. مقدار تنش عمودی و تنش افقی حداکثر از روابط ذیل به دست آمدهاند [5]، [6]:

$$\sigma_{v} = \sum_{i=1}^{L} \rho_{i} h_{i}$$
  
$$\sigma_{H} = \frac{v}{1-v} (\sigma_{v} - A_{v} P_{p}) + A_{H} P_{p} + \frac{E}{1-v^{2}} \varepsilon_{1} + \frac{vE}{1-v^{2}} \varepsilon_{2}$$

که pi چگـالی، hi ضـخامت لايـه ilم، <sup>σ</sup><sup>ـπ</sup>تنش افقي حـداکثر، <sup>٤</sup><sup>ـر</sup>کـرنش در نتيجـه نـيروي تکتـونيکي در امتداد تنش حداکثر، <sup>2ع</sup>کرنش در نتيجه نيروي تکتونيکي در امتداد تنش حداقل، <sup>ν</sup>ضريب پواسـون، Av ثابتPoroelastic در امتداد عمودي، AH ثابت پـورو الاسـتيك در امتـداد افقي، <sup>P</sup>فشـار منفـذي و E مدول يانگ (الاستيسيته) هستند.

## 3 مشخصات عمومی و ژئومکانیکی میدان نفتی کوپال

میدان نفتی کوپال در ًشمال استان خوزستان و در فاصله 60 کیلومتری شرق شهرسـتان اهـواز واقـع شده است. سازند آسماری در میدان نفتی کوپال بطور کلی از 7 زون تشکیل شده اسـت، کـه عمـدتا دارای سنگ آهک، شیل و ماسه سنگ هستند. با توجه به اینکه تحلیل پایداری بر روی مقطع سنگ آهک در عمق 3791 متری انجام شده، پارامترهای مربوط به سازند، جریان سیال و تنشهای منطقه، برای سازند سنگ آهک مخزن در جداول 1 و 2 آورده شده است [7]، [8].

وزن مخصوص (gr/cm³)	مدولیانگ GPa) )	ضريب پواسون	زاویـــــه اصطکاک (درجه)	چسبندگ ی (MPa)	تنش عمود (MPa)	تنش افقی حداکثر (MPa)	تنش افقی حداقل (MPa)
7/2	44	0.3	40	27	7/9 6	4/5 9	5/4 4

جدول 1: مشخصات ژئومکانیکی سازند و تنشهای منطقه تنش افقی حداقل

جدول 2: مشخصات جریان سیال سازند فشار منفذی

تخلخل (%)	نفوذپذی بری (md)	مدول سيال (GPa)	چگالی نفت gr/) (cm <sup>3</sup>	فشار منفذی (MPa))
8	3	63/0	692/0	1/31



# 4 تحلیل پایداری چاہ با نرم افزار FLAC

اولین مرحله برای مدل کردن تغییر شکل دیواره چاه به کمک روشهای عددی، تقسیم کـردن محیـط به اجزای کوچک است. ابعاد مدل دو بعدی ساخته شده 120 سانتیمتر \* 120 سانتیمتر و هر محور به 80 قسمت تقسیم شده است، یعنی ابعاد هر المان 5/1 سانتیمتر \* 5/1 سانتیمتر اسـت. بـا اسـتفاده از این نرمافزار در ابتدا مدل چـاه سـاخته شـده، و پارامترهـای مختلـف مکـانیکی و جریـانی سـازند و همچنین تنشهای برجا در آن قرار داده شده، و مدل در سه امتداد حفاری قائم، تنش افقی حداکثر و حداقل درون سازند سنگ آهک مخزن در عمق 3791 متر، با فشار گل 32 MPa، اجرا شـده و تحلیـل حساسیت انجام شده است.

در اشکال 1 تا 4، ناحیه پلاستیک اطراف چاه و حداکثر جابجایی در جهت افقی، در شرایط حفـاری در امتداد قائم و تنش افقی حداقل و حداکثر نشان داده شده است.

همانطور که در شکلهای 1 و 2 مشـاهده میشـود، ناحیـه پلاسـتیک اطـراف چـاه در شـرایط حفـاری بصورت افقی بیشتر از قائم است، که نشان میدهد حفـاری در امتـداد افقی ناپایـدارتر از حفـاری در امتداد قائم است.



شکل 1: ناحیه پلاستیک در شرایط حفاری قائم



شکل 2: ناحیه پلاستیک در شرایط حفاری در امتداد تنش افقی حداقل

شکل 3 نشان میدهد، جابجایی در اطراف دیواره چاه بیشترین مقدار را داشته، و با فاصله گرفتن از دیواره چاه کم میشود. در شکل 4 نیز، مشاهده میشود مقدار جابجایی در شرایط حفاری در امتـداد تنش افقی حداکثر بیشتر از حفاری در امتداد تنش افقی حداقل است، که نشـان میدهـد، حفـاری در امتداد تنش افقی حداکثر دارای پتانسیل ناپایداری بیشتری است.





شکل 3: جابجایی در جهت افقی در شرایط حفاری در جهت تنش افقی حداقل



#### شکل 4: جابجایی در جهت افقی در شرایط حفاری در جهت تنش افقی حداکثر

در جـدول 3، نتـایج کلی تحلیـل، بـرای حفـاری در سـه امتـداد قـائم، تنش افقی حـداقل و تنش افقی حداکثر آورده شده است. همانطور که از مقادیر جدول 3 استنباط میشـود، حفـاری قـائم نسـبت بـه دیگر امتدادهای حفاری، دارای بیشـترین پایـداری اسـت. همچـنین در انتخـاب امتـداد حفـاری بصـورت افقی، بیشترین پایداری در امتداد تنش افقی حداقل اسـت، کـه دارای مقـدار جابجـایی و تنش اصـلی حداکثر کمتری نسبت به حفاری در امتداد تنش افقی حداکثر دارد. در شکل 5 نیز، امتداد بهینه حفاری در شرایط افقی نشان داده شده است.

جدول 3: مقادیر حداکثر جابجایی در جهت افقی و تنش اصلی حداکثر در شرایط حفاری امتداد قائم، تنش افقی حداقل و حداکثر

امتداد حفاری	حداکثر جابجایی در جهت افقی (m)	تنش اصلی تمرکز یافته (MPa)					
قائم	6/1× <sup>5-</sup> 10	98					
تنش افقی حداقل	<sup>5-</sup> 10×55/2	185					
تنش افقی حداکثر	8/5× <sup>5-</sup> 10	193					

همانطور که از شکل 5 پیداست، در امتداد تنش اصـلی حـداکثر دیـواره در شـرایط کشـش میباشـد، همچنین حفـاری در این امتـداد، کمـترین گسـیختگی برشـی را ایجـاد میکنـد. همـانطور کـه مشـاهده میشود.





شکل 5: تحلیل پایداری چاہ افقی در دو امتداد تنش افقی حداقل و حداکثر

همچنین تحلیل پایداری در امتدادهای مختلف حفاری در شرایط مختلف رژیم تنش در اشکال 6 و 7 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود بیشترین و کمترین پایداری در شرایط رژیم رنشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود بیشترین و کمترین پایداری در شرایط رژیم تنش  $\sigma_{I}^{i}\sigma_{J}$ 



 $\sigma_{H}{}^{\dot{t}}\sigma_{h}{}^{\dot{t}}\sigma_{V}{}^{\dot{t}}$  شکل 6: تحلیل پایداری در امتدادهای مختلف حفاری در شرایط رژیم تنش



 $\sigma_{H}{i}\sigma_{V}{i}\sigma_{h}{i}$ شکل 7: تحلیل پایداری در امتدادهای مختلف حفاری در شرایط رژیم تنش



مشتمین کنفرانس مکانیک سنگ ۲۰–۲۲ اردیبهشت ۱۴۰۱–داتشگاه صنعتی شاهرود

# 5 نتىچە گىرى

نتیجهگیری کلی تحلیل پایداری چاه در امتدادهای مختلف حفاری نشان میدهد، که چاههای قائم نسبت به چاههای افقی از پایداری بیشتری برخوردار هستند، و در محدوده بیشتری از فشار گـل، چـاه پایـدار می باشد. حداکثر جابجایی افقی دیواره در فشـار گـل MPa 32 در شـرایط حفـاری بصـورت قـائم، در امتداد تنش افقی حداقل و حداکثر، بترتیب 5-10×6/1، 5-10×55/2 و 5-10×8/5 مـتر، بـه دسـت آمد. همچنین حفاری در امتداد تنشّ افقّی حداقل دارای پایداری بیشتری نسـبت بـه حفـاری در امتـداد تنش افقی حداکثر است. حفاری در امتداد تنش افقی حداقل، کمترین گسیختگی برشـی را داشـته، و به وَزن گلَ کمتریَ برای جلوگیَرَی اَز ناپایـداری نیـاز دارد. ناپَایـداریَ بـه صـورت کُشُشـی، َدر اطـرافَ دیواره چاه، در امتداد تنش افقی حداکثر بوجود میآید. کمترین پایداری چاه نیز در شـرایط رژیم تنش ، بترتیب در امتداد تنش افقی حداقل و قائم است. <sup>(6</sup>٫٬<sup>i</sup>σ٫<sup>i</sup> و <sup>6</sup>٫٬<sup>i</sup>σ٫<sup>i</sup> ر

## 6 مراجع

[1] Wiprut D.J., Zoback M.D., "High horizontal stress in the Visund field, Norwegian North Sea: Consequences for borehole stability and sand production", SPE 47244, 1998

[2] Tixier M. P., Loveless G.W., Anderson R.A., "Estimation of Formation Strength From the Mechanical-Properties Log", SPE 4532, 1975

[3] Darshan k. Sethi, "Well log application in rock mechanics", SPE 9833, 1981

[4] Akbar M., Tchambaz M., Al Adani N., Tamimi M., Gaffari Nik B., "Kupal- 41 Integrated formation evaluation, Asmari foramation", Schlumberger Middle East S.A., 2004

[5] Rahim Zillur, Y.Al-Qahtani Mohammed, Aramco Saudi., Goodman Harvey., Hilarides W.K., Norman W.D., "The Role of Geomechanical Earth Modeling in the Unconsolidated Pre-Khuff Field Completion Design for Saudi Arabian Gas Wells", SPE 84258, 2003

[6] Ohen Henry A., "Calibrated wireline mechanical rock properties model for predicting and preventing wellbore collapse and sanding", SPE 82236, 2003

and sanding", SPE 82230, 2003 [7] امید پور، آرمین، سکانس استراتیگرافی سازند آسماری و بررسی دیاژنز ومحیط رسوبی آن در میدان نفتی کوپال، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه تهران، دانشکده علوم، 1383 [8] شعبانی، شیروان، ارزیابی پتروفیزیکی چاه شماره 39 کوپال، شـرکت ملی منـاطق نفت خـیز جنـوب، گزارش شماره پ-1397، 1381