

بررسی تاثیر فشار منفذی بر فشار شکست در عملیات شکست هیدرولیکی در مخازن نفت و گاز، با روش المان محدود

حبیب الله شاکری امیرالمومنین: کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک علیرضا علیزاده عطار: استادیار، دانشگاه صنعت نفت محمد آبدیده: استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی امیدیه خلیل شهبازی: استادیار، دانشگاه صنعت نفت

\$\$\$\$\$

چکیدہ:

با گذشت چند سال از تولید نفت و گاز، بهرهدهی چاهها به دلیل تغییر ساختار لایههای زمین ناشی از رخ دادن فر آینده مانند رسوب آسفالتین و فشرده شدن مخزن کاهش مییابد. یک روش معمول برای رفع این مشکل، استفاده از فر آیند شکست هیدرولیکی است. در این فر آیند یک سیال با فشار بالا به درون چاهی که دارای شکافهای طبیعی یا از پیش ایجاد شده است، تزریق می شود. در این پژوهش، مدل دو بعدی از مخزنی با شکاف اولیه با استفاده از شبیه سازی عددی در نرم افزار Sonic Log Data طراحی شده تا تاثیر فشار منفور از دادههای نمودار صوتی (ماد سیال برای رشد شکاف اولیه با می ای بر مان والیه با می می ای از پیش در نرم افزار ABAQUS طراحی شده تا تاثیر فشار منفذی (Pore Pressure) بر حداکثر فشار سیال برای رشد شکاف اولیه با مغار می مختلف اولیه با منوار شکست نامیده می شود بررسی شود. برای این منظور از دادههای نمودار صوتی (معمای می مختلف اولیه بنا می فشار شکست نامیده می شود بررسی شود. برای این منظور از دادههای نمودار صوتی (معمای می مختلف از لایهی بنگستان در جنوب ایران جهت محاسبهی خواص ژئومکانیکی چاه مانند تنش های درجا در عمقهای مختلف از لایهی هدف استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که فشار شکست با افزایش فشار منفذی، کاهش می اید. اهمین از لایه یا نیزوهش این این منظور از دادههای نمودار صوتی (sonic Log Data) مخزن این که فشار شکست با افزایش فشار منفذی، کاهش می یابد. اهمیت با یا نیان می درجا در عمقهای مختلف از لایه هدف استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می دهد که فشار شکست با افزایش فشار منفذی، کاهش می یابد. اهمیت این پزوهش این است که اگر حداکثر فشار مورد نیاز (فشار شکست) برای شروع گسترش شکاف اولیه محاسبه شود، هرینه های ناشی از خرید پمپهای مورد نیاز در این عملیات کاهش می یابد.

کلید وازدها: شکست هیدرولیکی، فشار شکست، فشار منفذی، روش عددی.



Investigation the Effect of Pore Pressure on Breakdown Pressure in Hydraulic Fracturing in Oil and Gas Reservoire, Using Finite Element Method

Habib Allah Shakeri Amiralmomenin: Master of Mechanical Engineering Alireza Alizadeh Attar: Assistant Professor, Petroleum University of Technology Mohammad Abdideh: Assistant Professor, Islamic Azad University Khalil Shahbazi: Assistant Professor, Petroleum University of Technology

Abstract:

After several years of oil and gas production, the productivity of the wells decreases because processes like asphaltene precipitation and reservoir compaction increase around the wellbore. A common treatment for these wells is performing hydraulic fracturing through injection high pressure fluid into the well. In this study, using sonic log data of Bangestan reservoir in southwest of Iran, a numerical model was implemented to investigate the effect of geomechanical properties such as in-situ stresses at different depths of target layer on maximum required pressure (ie., breakdown pressure) for propagating the initial perforation. Results revealed that breakdown pressure is decreased by enhancement of the pore pressure. The importance of this work is that if the minimum pressure required to initiate crack growth is determined, the needed pump can be chosen more precisely and the unnecessary costs would be omitted.

Keywords: Hydraulic fracturing, Breakdown Pressure, Pore Pressure, Numerical Method

مقدمه:

یک روش شبیه سازی موفق برای افزایش بهرهوری مخازن نفت و گاز، فرایند شکست هیدرولیکی است. در این فرآیند یک سیال با فشار بسار بالا به درون شکاف اولیه یا شکافهای موجود در ساختار لایهی تولید تزریق و باعث گسترش این شکافها میشود [1]. بنابراین، یکی از مهمترین پارامترهای مورد نیاز در این عملیات، فشار لازم برای گسترش شکاف



چهارمین همایسش ملسی زمین سساخت و

زمین شناسی س**اختاری ایسران**

فانشكاه بيرجند

1790 15775

اولیه (Perforation) است که فشار شکست (Breakdown Pressure) نامیده می شود. این فشار به خواص ژنومکانیکی سازند (مانند توزیع تنش اطراف چاه و فشار منفذی و غیره) بستگی دارد. در ک درست ساختار زمین شناسی در لایه های تولید نفت و گاز باعث بهبود و تسریع عملیات شکست هیدرولیکی می شود. بسیاری از محققان تاثیرات این ساختار و هندسه شکاف های موجود در لایه ها را مورد بررسی قرار دادند. تیموشنکو و گودیر روابطی را برای محاسبهی فشار شکت بدست آوردند و نشان دادند در بسیاری از موارد، سیال از ناحیهی بین لوله های جداری و سازند نفوذ می کند و باعث می شود تر کهای کوچک موجود در سازند در راستای حداکثر تنش درجا رشد کنند [۲]. سلیمان نشان داد که جهت گیری مجدد شکاف اولیه متاثر از تر کهای کوچک و بزرگ موجود در سازند است [۳]. عباس و کیم نشان دادند که در چاه های با زاویه انحراف بالا، یک جفت سوراخ دو طرفه عمود بر هم ایجاد می شود که به نرخ تزریق سیال بستگی دارد [۴]. د پاتر با زاویه انحراف بالا، یک جفت سوراخ دو طرفه عمود بر هم ایجاد می شود که به نرخ تزریق سیال بستگی دارد [۴]. د پاتر با زاویه انحراف بالا، یک جفت سوراخ دو طرفه عمود بر هم ایجاد می شود که به نرخ تزریق سیال بستگی دارد ای بر با زاویه انحراف بالا، یک جفت سوراخ دو طرفه عمود بر هم ایم المان مر تبه بالا و المان نوک تر ک (استفاده از معار حداکثر با زاویه مورد بررسی قرار داد [۵]. با این حال، تاثیر تغییرات خواص ژئومکانیکی مخزن و هندسهی شکاف اولیه بر منش نر مال) مورد بررسی قرار داد [۵]. با این حال، تاثیر تغییرات خواص ژئومکانیکی مخزن و هندسهی شکاف اولیه بر منش نر مال) مورد بردی اثر داد [۵]. با این حال، تاثیر تغییرات خواص ژئومکانیکی مخزن و هندسه ی شکاف اولیه بر منری بر فشار شکست و استفاده از شیه سازی عددی و نرم افرا (SBA بررسی می شود. اهمیت این پزوه ش این افقی در جای اطراف مخزن، اثر تغییرات فشار منفذی را در عمقهای مختلف از مخزن بنگستان(از عمق ماسه می فره ش متری ای فر مان می در نیار شای مورد نیاز (فشار شکست) برای شروع گسترش شکاف اولیه محاسبه شود، هزینه های ناشی از خرید پیمهای مورد نیاز رفشار مورد نیاز فیات کاهش می باید.

محاسبهی خواص ژئومکانیکی با استفاده از دادههای نمودار صوتی (Sonic Log Data)

چقرمگی شکست سنگ آهک (جنس سنگ مخزن بنگستان) از رابطه (۱) بدست می آید [۶]. $K_{Ic} = 0.005 + 0.155\sigma_t - 0.00312\sigma_c + 0.0148E$ (۱) (۱) $K_{Ic} = 0.005 + 0.155\sigma_t - 0.00312\sigma_c + 0.0148E$ K_{Ic} $K_{Ic} = 0.005 + 0.155\sigma_t - 0.00312\sigma_c + 0.0148E$ $F_{Ic} = 0.41E_{dvn} - 1.06$ (۳) محاسبه می شود [۸]. $E = 0.41E_{dvn} - 1.06$, E < 15GPa (۲)

$$E = 1.153E_{dyn} - 15.2$$
 , $E > 15GPa$ (\mathbf{r})

در روابط (۲) و (۳) E_{dyn} مدول یانگ دینامیکی است و از دادههای نمودار صوتی؛ طبق رابطه ی (۴) بدست می آید[۹]

$$E_{dyn} = \rho v_s^2 \left(\frac{3v_p^2 - 4v_s^2}{v_p^2 - v_s^2} \right) \times 10^{-6}$$
 (F)





زمین شناسی سے ختاری ایے ان

فانشكاه بيرجند

*P*_p و *V_s* به ترتیب نشان دهنده سرعت فشاری و برشی (عرضی) امواج صوتی هستند. این امواج از طریق فرستنده ی سوند صوتی به داخل سازند فرستاده می شوند و از طریق دریافت کننده این سوند دریافت می شوند و پس از ثبت زمان رفت و بر گشت این امواج و مسافت طی شده سرعت آنها را محاسبه می کنند. همچنین ضریب پواسون استاتیکی و دینامیکی تقریبا با همدیگر برابر بوده و از رابطه ی (۵) بدست می آید[۹].

$$\nu = \left(\frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)}\right) \tag{2}$$

از طرف دیگر تنشهای موثر افقی وارد شده بر دیوارهی مخزن از روابط (۶) و (۷) محاسبه می شوند [۱۰].

$$\begin{split} \sigma_{h} &= \frac{v}{1-v} \sigma_{v} - \frac{v}{1-v} \alpha p_{R} + \alpha p_{R} + \frac{v}{1-v^{2}} \epsilon_{y} + \frac{vE}{1-v^{2}} \epsilon_{x} \end{split} \tag{(f)} \\ \sigma_{H} &= \frac{v}{1-v} \sigma_{v} - \frac{v}{1-v} \alpha p_{R} + \alpha p_{R} + \frac{v}{1-v^{2}} \epsilon_{x} + \frac{vE}{1-v^{2}} \epsilon_{y} \end{aligned} \tag{V} \\ \sigma_{H} &= \frac{v}{1-v} \sigma_{v} - \frac{v}{1-v} \alpha p_{R} + \alpha p_{R} + \frac{v}{1-v^{2}} \epsilon_{x} + \frac{vE}{1-v^{2}} \epsilon_{y} \end{aligned} \tag{V} \\ \sigma_{x} &= \frac{v}{1-v} \sigma_{v} - \frac{v}{1-v} \alpha p_{R} + \alpha p_{R} + \frac{v}{1-v^{2}} \epsilon_{x} + \frac{vE}{1-v^{2}} \epsilon_{y} \end{aligned}$$

که در این رابطه p(z) چگالی لایه های بالایی، g شتاب گرانش و z عمق مورد نظر است.

توضيحات مدل وشبيه سازي عددي براي محاسبه فشار شكست:

1790,5777

مدل مورد نظر مطابق شکل ۱، صفحه افقی برش خورده از مخزن بنگستان است که دارای ابعاد مشخص ۲۰۱۵۲۴ متر متر مربع می باشد. در این مدل فرض شده است که طول شکاف اولیه (a) با شعاع چاه (R) برابر و معادل ۲۰۰۶۳۵ متر می باشد. این شکاف نسبت به راستای حداکثر تنش افقی هیچ گونه انحرافی ندارد. خواص ژئومکانیکی مخزن که از جنس سنگ آهک (Limestone) است از رواز بط (۱) تا (۸) با استفاده از داده های نمودار صوتی (Sonic Log Data) برای عمق های مختلف (۲۰۸۰/۹ تا ۲۰۷۹/۱ متر) محاسبه و نتایج در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به نوسانات ابزارهای صوتی هنگام فرستادن و دریافت این امواج، ناپیوستگی هایی در داده های نمودار صوتی وجود دارد. بنابراین زیر بازه های از این بازه یکلی (۴۰۸۰/۹ تا ۲۰۷۹/۱ متر) انتخاب شده و تعدادی داده استخراج شده بطوری که تغییرات خواص



زمین شناسی س**اختاری ایسران**

فافشكاه بيرجنك

۲۲ آذر ۱۳۹۵

ژئومکانیکی در این بازهها بصورت کاملا پیوسته میباشد. برای شبیهسازی مخزن مورد نظر، از تغییرات تخلخل و نفوذپذیری سنگ آهک مورد صرف نظر شده و و به ترتیب مقادیر ثابت ۲۸/ و ۰/۱۱ دارسی در نظر گرفته شده است.همچنین مدول بالک و وزن مخصوص نفت ثابت و به ترتیب معادل ۲/۰۵ گیگا پاسکل و ۸۹۳ کیلو گرم بر متر مکعب فرض شده است. طبق داده های نمودار صوتی، مقادیر فشار منفدی از ۳۹ تا ۴۸ مگاپاسکال در عمقهای مختلف متغیر است.

برای بدست آوردن فشار شکست می بایست با تکیه بر مباحث مکانیک شکست، ضرایب شدت تنش را برای مدل مورد نظر را را محاسبه کرد. روش های عددی بسیاری برای محاسبهی ضرایب شدت تنش استفاده می شود. روش المان مرزی (Boundary Element Method) و روش المان محدود (Finite Element Method) دو روش عددی هستند که به صورت گسترده مورد استفاده قرار می گیرند [۱۲]. روش المان محدود برای شکل های با هندسه های پیچیده و شرایط بار گذارهای مختلف، روشی مناسب برای محاسبه ی ضرایب شدت تنش است. منوان مثال آیت الهی و همکار انشان این ضرایب را برای هندسه های دو بعدی و سه بعدی، با استفاده از روش المان محدود با دقت بسار بالایی محاسبه کردند [۱۳].



شکل (۱): مدل شبیه سازی شده مخزن

در این پژوهش، با در نظر گرفتن تغییرات خواص ژئومکانیک و تغیرات ساختاری لایهها در عمقهای مختلف ، ضرایب شدت تنش (Stress Intensity factors) با استفاده از معیار حداکثر تنش مماسی (Maximum Tangential Stress) محاسبه شدند.وجوه شکاف اولیه تحت تاثیر بارگذاری مد اول (مد I) قرار دارند ،همچنین مقدار ضریب شدت تنش در مد دوم (K_{II}) نسبت به مقدار بحرانی خود (K_{II}) بسیار کم و قابل صرف نظر است. به عبارت دیگر مد I، مد غالب است بنابراین، فقط تاثیر مقدار ضریب شدت تنش در مد اول (K_I) در نظر گرفته می شود. برای این منظور جهت بدست آوردن



دانشکاه بیر جند

فشار شکست، فشار Pw را افزایش می دهیم تا مقدار K_I به مقدار بحرانی خود (K_{Ic}) برسد، سپس مقدار متناظر P_w به عنوان فشار شکست در نظر گرفته می شود. مطابق شکل ۲، المان اطراف نوک شکاف اولیه به صورت سینگولار و تعداد المانهای مدل شبیه سازی شده از ۹ هزار تا ۲۵ هزار المان در نظر گرفته شده است.

(Sonic Log data)								
نماد	عمق (<i>m</i>)	'NMD	v	E (GPa)	σ_t (MPa)	σ _c (MPa)	σ _v (MPa)	K_{Ic} $(MPa.m^{0.5})$
d_1	4.1.19	٩	۰/۳۱	۸/۹۸	9/04	57/97	1.7/94	•/٩٨
<i>d</i> ₂	4.12/9	۲۳	۰/۳۰	٩/٨٣	۶/۲۰	54/9.	1.1//	•/94
<i>d</i> ₃	41.V/V	14	۰/۳۱	17/0	٧/٢٩	۵۸/۵۰	۱۰۸/۲۳	١/١٣
d_4	4117/9	۱.	• /٣•	13/38	٧/۵٠	۶۰/۴۰	1.9/81	1/17
d_5	4179/4	10	• /٣٢	13/10	٨/٢٨	۶۰/۲۰	1.7/03	1/29
d_6	4114/1	۴	•/٣۴	۸/۴۳	Δ/VA	۵١/٧٣	۱۰۹/۷۹	•/٨۶
<i>d</i> ₇	4114/1	۵	•/7٧	4/9.	0/4.	47/3.	111/79	• /VV

جدول (1): خواص ژئومکانیکی مخزن بنگستان در عمق های مختلف با استفاده از داده های نمودار صوتی



شکل (۲): المان بندی مدل شبیه سازی شده و المان سینگو لار اطراف نوک ترک

همچنبن برای بررسی همگرایی جوابهای بدست آمده از مدل شبیه سازی شده، مطابق شکل ۳، در عمق مشخصی از چاه تعداد پنج کانتور (C₁, C₂, C₃, C₄, C₅) اطراف نوک شکاف (Perforation tip) در نظر گرفته شده و مقادیر ضریب

ا مخفف Number of Measured Data می باشد. این نماد نشان دهنده ی تعداد داده های ثبت شده در هر باز می عمقی است به طور ی که در آن بازه پیوستگی خواص زئومکانیکی حفظ شده است.



شدت تنش در مد اول بر روی این کانتورها محاسبه شده است. همانظور که در شکل ۵ دیده می شود؛ ضریب شدت تنش برای چهار کانتوری که شامل نوک شکاف اولیه نیستند (C₂, C₃, C₄, C₅) بر حسب مدت زمان همگرایی، مقادیر یکسان اختیار می کنند. این نشان میدهد ، ضریب شدت تنش که در دامنه یخود یک تابع تحلیلی است، مستقل از هر مسیر بسته ای است به طوری که آن مسیر بسته شامل نقطه ی سینگولار تابع نباشد.



شکل (۳): دو شکاف (perforation) متقارن اطراف دیوارهی مخزن (wellbore) و کانتورهای (C₁, C₂, C₃, C₄, C₅) اطراف نوک شکاف (perforation tip)



شکل (۴): مقادیر ضریب شدت تنش (stress intensity factor) بر روی کانتورهای اطراف نوک ترک در عمق مشخصی از چاه



1790 ,571



ین همایشش ما ہے، ز میں

زمین شناسی س**اختاری ایسران**

فانشكاه بيرجند

نتايج:

در این مقاله تاثیر تغیرات فشار منفذی (Pore Pressure) بر فشار شکست (Breakdown Pressure)، بصورت شبیه سازی عددی بررسی شد. مطابق شکل ۵ نتایج نشان می دهد، در سازندهای با فشار منفدی بالاتر، فشار کمتری برای شروع رشد شکاف لازم است. علت کاهش فشار شکست این است که افزایش فشار منفذی باعث کاهش اثر تنش های افقی اطراف مخزن (σ_H, σ_h) وارد بر وجوه شکاف می شود. بنابراین فشار کمتری برای رشد شکاف مورد نیاز است. لذا به منظور کاهش هزینه های خرید پمپ لازم است عملیات شکست هیدولیکی در عمقی از مخزن انجام شود که مقادیر پایین ضریب شدت تنش و حداکثر فشار منفذی را داشته باشد.





References

- [1] Charlez, P. A.; (1997); "*Rock mechanics: petroleum applications*", Editions Technip.
- [2] Timoshenko, S., Timoshenko, S. and Goodier, J.; (1951); "*Theory of Elasticity*", McGraw-Hill book Company.
- [3] Soliman, M.; (1990); "Interpretation of pressure behavior of fractured, deviated, and horizontal wells",
 SPE Latin America Petroleum Engineering Conference, Society of Petroleum Engineers.







فانشكاه بيرجند

Association.

[4]

Kim, C. and Abass, H.; (1991); "Hydraulic fracture initiation from horizontal wellbores: laboratory experiments", The 32nd US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), American Rock Mechanics

1790 jil

- [5] De Pater, C., Weijers, L., Savic, M., Wolf, K., Van den Hoek, P. and Barr, D.; (1994); "Experimental study of nonlinear effects in hydraulic fracture propagation (includes associated papers 29225 and 29687)", SPE Production & Facilities, 9 (04), pp. 239-246.
- [6] Nejati, H. R. and Moosavi, S. A.; (2016); "A new brittleness index for estimation of rock fracture toughness", Journal of Mining and Environment.
- [7] Nazir, R., Momeni, E., Jahed Armaghani, D. and Mohd Amin, M.; (2013); "Correlation between unconfined compressive strength and indirect tensile strength of limestone rock samples", Electr J Geotech Eng, 18, pp. 1737-1746.
- [8] Wang, Z.; (2000); "The Gassmann equation revisited: Comparing laboratory data with Gassmann's predictions", Seismic and acoustic velocities in reservoir rocks, 3, pp. 8-23.
- [9] Fei, W., Huiyuan, B., Jun, Y. and Yonghao, Z.; (2000); "Correlation of Dynamic and Static Elastic Parameters of Rock."
- [10] Guéguen, Y. and Palciauskas, V.; (1994); "Introduction to the physics of rocks", Princeton University Press.

[11] Zoback, M. D. and Zoback, M. L; (1989); "Geophysics", pp. 1221-1232.

- [12] Marji, M. F., Hosseini-Nasab, H. and Kohsary, A. H.; (2007); "A new cubic element formulation of the displacement discontinuity method using three special crack tip elements for crack analysis", JP J. Solids Struct, 1 (1), pp. 61-91.
- [13] Ayatollahi, M., Mirsayar, M. and Nejati, M.; (2010); "Evaluation of first non-singular stress term in bimaterial notches", Computational Materials Science, 50 (2), pp. 752-760.
- [14] Ayatollahi, M. and Aliha, M.; (2007); "Wide range data for crack tip parameters in two disc-type specimens under mixed mode loading", Computational materials science, 38 (4), pp. 660-670.