**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

**◊◊◊◊◊◊◊**

**چکیده:**

با گذشت چند سال از تولید نفت و گاز، بهره‌دهی چاه‌ها به دلیل تغییر ساختار لایه‌های زمین ناشی از رخ دادن فرآیندهایی مانند رسوب آسفالتین و فشرده شدن مخزن کاهش می‌یابد. یک روش معمول برای رفع این مشکل، استفاده از فرآیند شکست هیدرولیکی است. در این فرآیند یک سیال با فشار بالا به درون چاهی که دارای شکاف‌های طبیعی یا از پیش ایجاد شده است، تزریق می‌شود. در این پژوهش، مدل دو بعدی از مخزنی با شکاف اولیه با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم افزار ABAQUS طراحی شده تا تاثیر فشار منفذی (Pore Pressure) بر حداکثر فشار سیال برای رشد شکاف اولیه که فشار شکست نامیده می شود بررسی شود. برای این منظور از داده‌های نمودار صوتی (Sonic Log Data) مخزن بنگستان در جنوب ایران جهت محاسبه‌ی خواص ژئومکانیکی چاه مانند تنش‌های درجا در عمق‌های مختلف از لایه‌ی هدف استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که فشار شکست با افزایش فشار منفذی، کاهش می‌یابد. اهمیت این پزوهش این است که اگر حداکثر فشار مورد نیاز(فشار شکست) برای شروع گسترش شکاف اولیه محاسبه شود، هزینه‌های ناشی از خرید پمپ‌های مورد نیاز در این عملیات کاهش می‌یابد.

**کلید وازه‌ها**: 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](#_ENREF_1)]. بنابراین، یکی از مهمترین پارامترهای مورد نیاز در این عملیات، فشار لازم برای گسترش شکاف

اولیه (Perforation) است که فشار شکست (Breakdown Pressure) نامیده می شود. این فشار به خواص ژئومکانیکی سازند (مانند توزیع تنش اطراف چاه و فشار منفذی و غیره) بستگی دارد. درک درست ساختار زمین‌شناسی در لایه‌های تولید نفت و گاز باعث بهبود و تسریع عملیات شکست هیدرولیکی می‌شود. بسیاری از محققان تاثیرات این ساختار و هندسه شکاف‌های موجود در لایه‌ها 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 لوله‌های جداری و سازند نفوذ می‌کند و باعث می‌شود ترک‌های کوچک موجود در سازند در راستای حداکثر تنش درجا رشد کنند [[2](#_ENREF_2)]. سلیمان نشان داد که جهت‌گیری مجدد شکاف اولیه متاثر از ترک‌های کوچک و بزرگ موجود در سازند است [[3](#_ENREF_3)]. عباس و کیم نشان دادند که در چاه‌های با زاویه انحراف بالا، یک جفت سوراخ دو طرفه عمود بر هم ایجاد می‌شود که به نرخ تزریق سیال بستگی دارد [[4](#_ENREF_4)]. د پاتر تاثیر گسل بر جهت‌گیری مجدد شکست اولیه را با استفاده از المان مرتبه بالا و المان نوک ترک (استفاده از معیار حداکثر تنش نرمال) مورد بررسی قرار داد [[5](#_ENREF_5)]. با این حال، تاثیر تغییرات خواص ژئومکانیکی مخزن و هندسه‌ی شکاف اولیه بر فشار شکست و استفاده از روش‌های عددی تا کنون بررسی نشده است. در این تحقیق، با در نظر گرفتن تغییرات تنش‌ها‌ی افقی درجای اطراف مخزن، اثر تغییرات فشار منفذی را در عمق‌های مختلف از مخزن بنگستان(از عمق 9/4080 تا 1/4179 متری) بر فشار شکست با استفاده از شبیه‌ سازی عددی و نرم افزار ABAQUS بررسی می‌شود. اهمیت این پزوهش این است که اگر حداکثر فشار مورد نیاز(فشار شکست) برای شروع گسترش شکاف اولیه محاسبه شود، هزینه‌های ناشی از خرید پمپ‌های مورد نیاز در این عملیات کاهش می‌یابد.

**◊◊◊◊◊◊◊**

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

چقرمگی شکست سنگ آهک (جنس سنگ مخزن بنگستان) از رابطه (1) بدست می‌آید [[6](#_ENREF_6)].

*(1)*

چقرمگی شکست است. و به ترتیب مقاومت فشاری تک محوره و مقاومت کششی سنگ می‌باشند و به صورت آزمایشگاهی بدست می‌آیند [[7](#_ENREF_7)]. مدول یانگ است و از طریق روابط (2) و (3) محاسبه می‌شود [[8](#_ENREF_8)].

, (2)

, (3)

در روابط (2) و (3) مدول یانگ دینامیکی است و از داده‌های نمودار صوتی؛ طبق رابطه ی (4) بدست می‌آید[[9](#_ENREF_9)]

(4)

و به ترتیب نشان‌دهنده سرعت فشاری و برشی (عرضی) امواج صوتی هستند. این امواج از طریق فرستنده‌ی سوند صوتی به داخل سازند فرستاده می‌شوند و از طریق دریافت‌کننده این سوند دریافت می‌شوند و پس از ثبت زمان رفت و برگشت این امواج و مسافت طی شده سرعت آنها را محاسبه می‌کنند. همچنین ضریب پواسون استاتیکی و دینامیکی تقریبا با همدیگر برابر بوده و از رابظه‌ی (5) بدست می‌آید[[9](#_ENREF_9)].

(5)

از طرف دیگر تنش‌های موثر افقی وارد شده بر دیواره‌ی مخزن از روابط (6) و (7) محاسبه می‌شوند [[10](#_ENREF_10)].

*(6)*

*(7)*

*ثابت بایوت است که مقدار آن از صفر برای محیط غیر متخلخل تا 1 برای محیط کاملا متخلخل تغییر می‌کند. و به ترتیب بیان‌کننده‌ی کرنش نرمال در جهت بیشترین و کمترین تنش‌های افقی می‌باشد.تنش نرمال ناشی از وزن لایه‌های بالایی لایه‌ی افقی مورد بررسی است و از رابطه‌ی (8) محاسبه می‌شود [*[*11*](#_ENREF_11)*].*

*(8)*

*که در این رابطه چگالی لایه‌های بالایی، شتاب گرانش و* z *عمق مورد نظر است.*

**◊◊◊◊◊◊◊**

***توضیحات مدل وشبیه سازی عددی برای محاسبه فشار شکست:***

*مدل مورد نظر مطابق شکل1، صفحه افقی برش‌خورده از مخزن بنگستان است که دارای ابعاد مشخص 1524/0×1524/0 متر مربع می‌باشد. در این مدل فرض شده است که طول شکاف اولیه () با شعاع چاه () برابر و معادل 00635/0 متر می‌باشد. این شکاف نسبت به راستای حداکثر تنش افقی هیچ‌گونه انحرافی ندارد. خواص ژئومکانیکی مخزن که از جنس سنگ آهک (* Limestone*) است از روازبط (1) تا (8) با استفاده از داده‌های نمودار صوتی (*SonicLogData*) برای عمق‌های مختلف ( 9/4080 تا 1/4179 متر) محاسبه و نتایج در جدول 1 ارائه شده است. با توجه به نوسانات ابزارهای صوتی هنگام فرستادن و دریافت این امواج، ناپیوستگی‌هایی در داده‌های نمودار صوتی وجود دارد. بنابراین زیر بازه‌هایی از این بازه‌ی کلی ( 9/4080 تا 1/4179 متر) انتخاب شده و تعدادی داده استخراج شده بطوری که تغییرات خواص*

*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 28/0 و01/0 دارسی در نظر گرفته شده است.همچنین مدول بالک و وزن مخصوص نفت ثابت و به ترتیب معادل 05/2 گیگا پاسکل و 893 کیلوگرم بر متر مکعب فرض شده است. طبق داده های نمودار صوتی، مقادیر فشار منفدی از 39 تا 48 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. روش‌های عددی بسیاری برای محاسبه‌ی ضرایب شدت تنش استفاده می‌شود. روش المان مرزی (*Boundary Element Method*) و روش المان محدود (*Finite Element Method*) دو روش عددی هستند که به‌ صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرند [*[*12*](#_ENREF_12)*]. روش المان محدود برای شکل‌های با هندسه‌های پیچیده و شرایط بارگذار‌های مختلف، روشی مناسب برای محاسبه‌ی ضرایب شدت تنش است.به عنوان مثال آیت‌الهی و همکارانشان این ضرایب را برای هندسه‌های دو بعدی و سه بعدی، با استفاده از روش المان محدود با دقت بسار بالایی محاسبه کردند [*[*13*](#_ENREF_13)*]، [*[*14*](#_ENREF_14)*].*

**

شکل (1): 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 () نسبت به مقدار بحرانی خود () 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 (*) *در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور جهت بدست آوردن*

*فشار شکست، فشار را افزایش می دهیم تا مقدار به مقدار بحرانی خود () برسد، سپس مقدار متناظر به عنوان فشار شکست در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل 2، المان اطراف نوک شکاف اولیه به صورت سینگولار و تعداد المان‌های مدل شبیه‌سازی شده از 9 هزار تا 25 هزار المان در نظر گرفته شده است.*

جدول (1): خواص ژئومکانیکی مخزن بنگستان در عمق‌های مختلف با استفاده از داده‌های نمودار صوتی

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| نماد | عمق | [[1]](#footnote-1)NMD | *ν* |  | *()* | *()* | *(* | *(.)* |
|  | 9/4080 | 9 | 31/0 | 98/8 | 54/6 | 97/52 | 94/102 | 98/0 |
|  | 9/4083 | 23 | 30/0 | 83/9 | 20/6 | 60/54 | 70/107 | 94/0 |
|  | 7/4107 | 14 | 31/0 | 05/12 | 29/7 | 50/58 | 23/108 | 13/1 |
|  | 6/4113 | 10 | 30/0 | 36/13 | 50/7 | 40/60 | 61/109 | 17/1 |
|  | 3/4126 | 15 | 32/0 | 15/13 | 28/8 | 20/60 | 53/107 | 29/1 |
|  | 1/4178 | 4 | 34/0 | 43/8 | 78/5 | 73/51 | 79/109 | 86/0 |
|  | 1/4179 | 5 | 27/0 | 60/4 | 40/5 | 30/42 | 36/111 | 77/0 |

(Sonic Log data)



شکل (2): المان بندی مدل شبیه‌سازی شده و المان سینگولار اطراف نوک ترک

همچنبن برای بررسی همگرایی جواب‌های بدست آمده از مدل شبیه سازی شده، مطابق شکل 3، در عمق مشخصی از چاه تعداد پنج کانتور () اطراف نوک شکاف (Perforation tip) در نظر گرفته شده و مقادیر ضریب

شدت تنش در مد اول بر روی این کانتورها محاسبه شده است. همانظور که در شکل 5 دیده می شود؛ ضریب شدت تنش برای چهار کانتوری که شامل نوک شکاف اولیه نیستند () بر حسب مدت زمان همگرایی، مقادیر یکسان اختیار می کنند. این نشان می‌دهد ، ضریب شدت تنش که در دامنه‌ی خود یک تابع تحلیلی است، مستقل از هر مسیر بسته ای است به‌طوری‌که آن مسیر بسته شامل نقطه‌ی سینگولار تابع نباشد.



شکل ( 3): دو شکاف (perforation) متقارن اطراف دیواره‌ی مخزن (wellbore) و کانتورهای () اطراف نوک شکاف (perforation tip)

شکل( 4): مقادیر ضریب شدت تنش (stress intensity factor) بر روی کانتورهای اطراف نوک ترک در عمق مشخصی از چاه

**◊◊◊◊◊◊◊**

**نتایج:**

در این مقاله تاثیر تغیرات فشار منفذی (Pore Pressure) بر فشار شکست (Breakdown Pressure)، بصورت شبیه سازی عددی بررسی شد. مطابق شکل 5 نتایج نشان می‌دهد، 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 تنش‌های افقی اطراف مخزن () وارد بر وجوه شکاف می شود. بنابراین فشار کمتری برای رشد شکاف مورد نیاز است. لذا به منظور کاهش هزینه‌های 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.

شکل (5): تاثیر فشار منفذی (pore pressure ) بر فشار شکست ( breakdown pressure) در عمق‌های مختلف

()

**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.

[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 Association.

[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 bi-material 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.

1. مخفف Number of Measured Data می باشد. این نماد نشان دهنده ی تعداد داده های ثبت شده در هر بازه‌ی عمقی است به طوری‌ که در آن بازه پیوستگی خواص زئومکانیکی حفظ شده است. [↑](#footnote-ref-1)