

تحلیل عددی عملیات شکست هیدرولیکی در چاههای مایل

مجید رضا آیت الهی

محمد حسن پورکاویان

تهران، نارمک، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، آزمایشگاه خستگی و شکست pourkavian@mecheng.iust.ac.ir

خلاصه مقاله

در طی دهه های گذشته، مطالعات زیادی در زمینه شکست هیدرولیکی انجام شده است. این تکنیک اساساً برای افزایش محصول دهی چاههای نفت و گاز مورد استفاده قرار می گیرد. از آنجاییکه عملیات شکست هیدرولیکی یک فرآیند رشد ترک در دیواره چاه است، معمولاً از دیدگاه مکانیک شکست سنگ مورد بررسی قرار می گیرد. ضرایب شدت تنش، اصلی ترین پارامترها برای تحلیل رفتار رشد ترک هستند. بدین ترتیب، در این مقاله پارامترهای شکست مربوط به یک ترک نیم دایره ای که در دیواره یک چاه ایجاد شده است، به وسیله یک تحلیل سه بعدی المان محدود در نرم افزار ABAQUS، مورد توجه قرار گرفته است. از آنجاییکه در بسیاری از موارد، چاههای نفت و گاز به صورت مایل ایجاد می شوند، در مدل‌های تحلیل شده، تأثیر زاویه چاه بر پارامترهای مختلفی نظیر ضریب شدت تنش مود I، فشار سیال مورد نیاز برای آغاز رشد ترک و پایداری مسیر رشد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله نشان می دهد که با افزایش زاویه چاه و نزدیک شدن به حالت افقی، شکست با فشار سیال کمتری آغاز و در مسیر پایدارتری رشد می کند.

ABSTRACT

During the past decades, many research studies have been conducted in the field of hydraulic fracturing. This technique is basically used for increasing the productivity of oil and gas wellbores. Since the hydraulic fracturing is essentially a process of crack growth in the wellbores and the reservoirs formations, it is preferred to investigate this method using concepts of the rock fracture mechanics. The stress intensity factors are the main parameters for describing the crack growth behavior. Thus, in this paper the fracture parameters of a semi-circular crack induced due to perforation in the wall of an oil well are determined by means of a 3D finite element analysis in the ABAQUS code. Since the inclined wells are developed in many cases, in the analyzed models, the influence of angle of well on various parameters such as the mode I component of stress intensity factor, pumping pressure needed for initiation of crack growth and stability of fracture trajectory are investigated. The results shown that by increasing the angle of well, fracture initiation occurs in lower pumping pressure and more stable fracture trajectory.

کلمات کلیدی: مکانیک شکست، شکست هیدرولیکی، روش اجزاء محدود، تنش های برجا، ضرایب شدت تنش

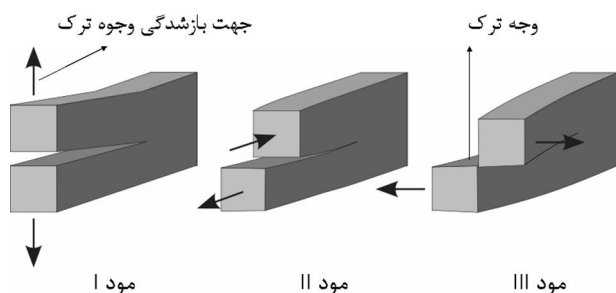
مقدمه

بهبود بهره‌دهی از این مخازن، لازم است که عملیات اضافی روی این نوع مخازن صورت گیرد. این عملیات اضافی، افزایش بازده چاه را در پی دارد. روشهای گوناگونی برای افزایش بازده چاههای نفت و گاز با نفوذپذیری پایین وجود دارد که روشهای تزریق گاز، روشهای شیمیایی، روشهای حرارتی و ... از آن جمله اند.

بسیاری از مخازن نفت و گاز با نفوذپذیری بالا در نقاط مختلف جهان، در حال تمام شدن هستند. از این رو، تأمین مواد خام اولیه مورد نیاز برای مصارف گوناگون صنعتی، بعضاً از مخازن با نفوذپذیری پایین صورت می گیرد. جهت بهره برداری

این پژوهش نشان می دهد که با تغییر زاویه چاه، شکست تحت مود I خالص رشد می کند.

اما در بسیاری از موارد، پایدار بودن مسیر رشد ترک از اهمیت ویژه ای برخوردار است. این پارامتر در طراحی دقیقتر عملیات شکست هیدرولیکی نقش مهمی را ایفا می کند. (Cottrell and Rice (1980) نشان داده اند که در حالت مود I خالص و برای شکست ترد، پایداری مسیر رشد ترک، به علامت تنش T وابسته است. تنش T، ترم دوم در بسط سری تنش است. بر طبق (Cottrell and Rice (1980) در صورتی که تنش T منفی باشد، شکست مسیر ثابتی را طی می کند. اما در مواردی که تنش T مثبت است، شکاف اولیه تمایل دارد که از مسیر اولیه دور شود.



شکل ۲- مودهای اصلی شکست

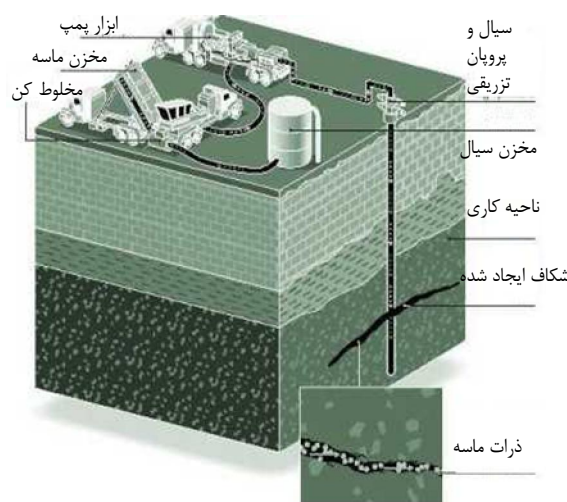
سه شیوه متداول برای تعیین این پارامترهای شکست وجود دارد: ۱- روش های تحلیلی ۲- روش های تجربی ۳- روش های عددی. برای هندسه و بارگذاری های پیچیده، مانند مدلسازی فرآیند شکست هیدرولیکی، روش اجزاء محدود، روش قابل اعتماد و مناسبی برای تعیین این پارامترهاست. در این مقاله از روش عددی و به طور خاص از تحلیل اجزاء محدود برای تعیین پارامترهای شکست در جداره یک چاه ترکدار در حین عملیات شکست هیدرولیکی، استفاده شده است.

فواید و ویژگی های چاههای مایل

به طور کلی اگر دسترسی به مخازن با حفر چاههای عمودی ممکن نباشد و یا برای ایجاد این چاهها مشکل خاصی وجود داشته باشد، حفاری جهت دار در این موارد می تواند دسترسی به مخازن را امکان پذیر سازد.

در تعدادی از موارد، مخزن نفتی در زیر منطقه مسکونی واقع شده اند. در این موارد تنها راه بهره برداری از این مخازن حفاری جهت دار می باشد. موانع طبیعی نظیر کوه ها، عموماً از ساختن ایستگاههای بهره برداری جلوگیری می کنند. در این موارد نیز باید حفاری چاه به صورت مایل انجام شود. یکی دیگر از کاربردهای حفاری مایل، هنگامی است که لازم باشد در عمقی از چاه عمودی قبلاً حفاری شده، شعبه ای فرعی برای دسترسی به مخزن دیگر ایجاد شود. در این موارد معمولاً یک مانع آ، موسوم به پشت بند، در چاه اصلی وجود دارد و یا هدف رسیدن به مخازن بیشتر جهت افزایش برداشت از چاه مورد نظر است. شکل ۳ حالتی را نشان می دهد که در آن هدف از ایجاد چاه مایل، رسیدن به مخازن بیشتر جهت افزایش برداشت از چاه مورد نظر است. در این مقاله بررسی اثرات تغییرات این زاویه بر آغاز رشد شکاف مورد بررسی قرار گرفته است.

اما یکی از روشهای ازدیاد برداشت که در ساختارهای^۱ با نفوذپذیری پایین کاربرد فراوانی دارد، فرآیند شکست هیدرولیکی^۲ است که برای افزایش نرخ تولید و اقتصادی تر کردن برداشت محصول در این نوع ساختارها به کار می رود. عملیات شکست هیدرولیکی، فرآیندی است که در آن سیال با نرخ تزریقی نسبتاً بالا درون چاه پمپ می شود. قبل از پمپ کردن سیال، یک شکاف اولیه^۳ در دیواره چاه ایجاد می شود. به موازات پمپ شدن سیال، فشار در چاه بالا می رود. عملیات پمپ کردن تا جایی ادامه می یابد که فشار به حدی برسد که شکست آغاز شده و شکاف در دیواره چاه رشد کند. برای انجام این عملیات به پمپ هایی با قدرت 2000 hp (1500 kW) نیاز است. هنگامی که دیواره می شکند، سیال درون شکاف جریان می یابد. سپس برای جلوگیری از بسته شدن شکاف، عامل پروپانی درون شکاف قرار می گیرد. شکل ۱ نمای شماتیکی از یک عملیات شکست هیدرولیکی در جداره چاه را نشان می دهد.



شکل ۱- نمای شماتیکی از یک عملیات شکست هیدرولیکی در جداره چاه و ابزار پمپاژ

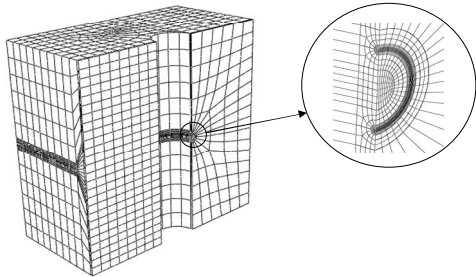
از آنجا که روش شکست هیدرولیکی اساساً یک فرآیند بروز و گسترش ترک می باشد، استفاده از مبانی مکانیک شکست می تواند ابزاری مناسب جهت بررسی مناسب و مطالعه دقیقتر رفتار شکست توده های سنگی در اعماق زمین باشد. مهمترین پارامتری که در مکانیک شکست مطرح است، ضریب شدت تنش می باشد. در نتیجه یکی از مهمترین روش ها در تحلیل شکست و رفتار رشد ترک بر اساس مبانی مکانیک شکست، بررسی این پارامتر است. به همین منظور می بایست برای انواع ترک های موجود در سازه های ترکدار (نظیر جداره چاههای نفت و گاز)، این ضریب محاسبه و مورد تحلیل قرار گیرد.

ضریب شدت تنش بسته به هندسه سازه و بارگذاری روی آن می تواند به سه شکل وجود داشته باشد. حالت اول، ضریب شدت تنش مود I یا مود بازشدگی که در این مود جابجایی وجوه ترک عمود بر جبهه ترک می باشد. حالت دوم، ضریب شدت تنش مود II یا مود لغزشی است که در آن جابجایی وجوه ترک در صفحه ترک ولی عمود بر جبهه ترک می باشد. در حالت سوم، ضریب شدت تنش مود III موسوم به مود پارگی تعریف می شود که در این مود جابجایی وجوه ترک در صفحه ترک و موازی با جبهه ترک است. شکل ۲ این سه مود بارگذاری و تغییر شکل ترک را نشان می دهد. یک ترک می تواند تحت یکی از مودهای I، II، III و یا ترکیبی از آنها که معمولاً ترکیبی از کشش و برش (مود I و II) می باشد، قرار گیرد. نتایج حاصل از

$$E = 10GPa, \nu = 0.25, K_{IC} = 5MPa\sqrt{m}, P_f = 60MPa,$$

$$\sigma_1 = 80MPa, \sigma_2 = 70MPa, \sigma_3 = 60MPa$$

که در آن E مدول الاستیسیته، ν ضریب پواسون، P_f فشار تزریق سیال و K_{IC} چقرمگی شکست می باشد. در واقع حالت بحرانی ضریب شدت تنش است که به عنوان یک ثابت و خاصیت هر ماده ترکدار شناخته می شود.

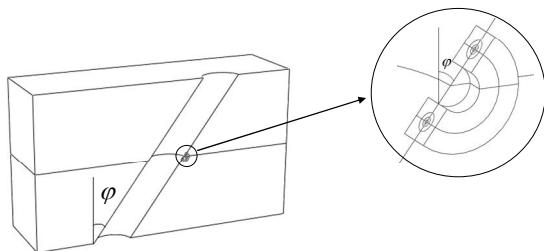


شکل ۵- مدل کامل المان بندی شده چاه ترکدار و ساختار اطراف آن

به منظور مدل سازی تکینگی^۱ موجود در مؤلفه های تنش و کرنش، از المان های ویژه ای به نام المان های تکین، برای جبهه ترک استفاده می شود. المانهای موجود در مدل همگی از نوع مکعبی 20^2 گرهی بوده و تعداد آنها نیز حدود ۱۱۰۰۰ المان می باشد که به دلیل اهمیت بررسی شرایط تنش در اطراف ترک، در این قسمت از المان های ریزتری استفاده شده است. شکل ۵ نمایی از مدل المان بندی شده چاه به همراه ترک موجود در جداره آن را نشان می دهد.

نتایج

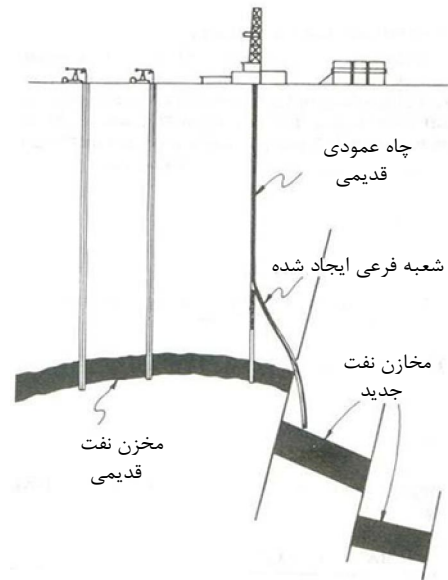
همانطور که ذکر شد، در بسیاری از موارد، به منظور دستیابی به مخازن حفاری به صورت مایل انجام می شود. به منظور بررسی اثرات این پارامتر بر عملیات شکست هیدرولیکی، در این مقاله، زاویه چاه به عنوان یکی از پارامترهای مورد بررسی در نظر گرفته شده است. زاویه ϕ که به عنوان زاویه چاه فرض شده است، در شکل ۶ مشاهده می شود.



شکل ۶- زاویه چاه نسبت به حالت چاه عمودی

زاویه چاه از حالت عمودی تا افقی (نسبت به سطح زمین)، می تواند تغییر کند. از این رو، جهت بررسی این پارامتر، دامنه تغییرات زاویه چاه از ۰ تا ۹۰ درجه در نظر گرفته شده است.

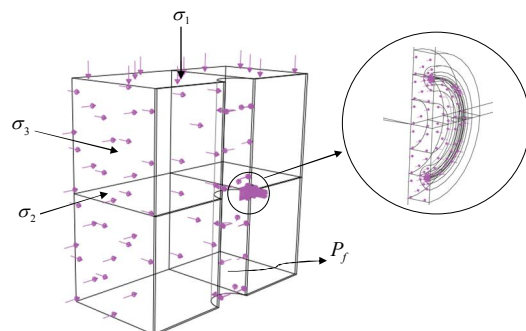
در شکل ۷ اثرات زاویه چاه بر K_{IC}/K_I مورد تحلیل قرار گرفته است.



شکل ۳- ایجاد چاه مایل، جهت دستیابی به مخازن بیشتر، جهت ازدیاد برداشت

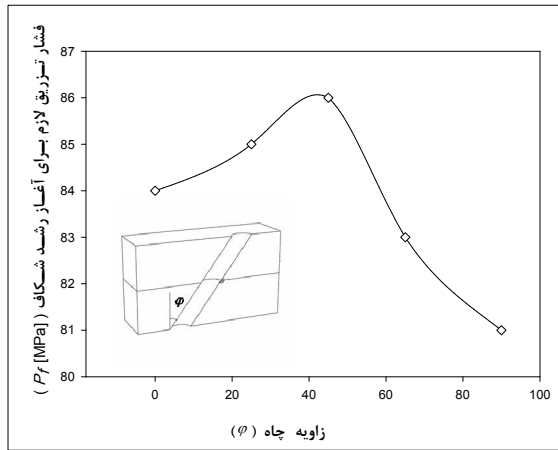
مدلسازی عددی عملیات شکست هیدرولیکی

مدل سازی اجزاء محدود عملیات شکست هیدرولیکی توسط نرم افزار ABAQUS انجام گردید. از قابلیت های ویژه این نرم افزار مدل سازی ساده تر ترک نیم دایره ای شکل می باشد. این نرم افزار ضریب شدت تنش و تنش T را به طور مستقیم محاسبه می کند. در شکل ۴ مدل هندسی و بارگذاری شده چاه به همراه ترک ایجاد شده در جداره آن نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می شود، برای مدل سازی چاه حفر شده در زمین، یک بلوک به عنوان ساختار زمین و استوانه ای توخالی به عنوان چاه در داخل بلوک در نظر گرفته شده است. ابعاد بلوک $2m \times 2m \times 2m$ و قطر چاه نیز $20cm$ در نظر گرفته شده است. برای مدل سازی تنشهای ساختاری اعمالی، بلوک از سه راستای عمود بر هم، تحت بارگذاری σ_1 ، σ_2 و σ_3 قرار داده می شود. ترک اولیه همانطوری که در شکل ۴ نشان داده شده است، نیم دایره ای به شعاع $4cm$ می باشد. همچنین به دلیل وجود تقارن هندسی و بارگذاری جهت سهولت مدل سازی و کاهش زمان تحلیل، تنها نصف مدل مورد بررسی قرار گرفته است. ضمناً نتایج برای عمیق ترین گره مورد بررسی قرار گرفته است.



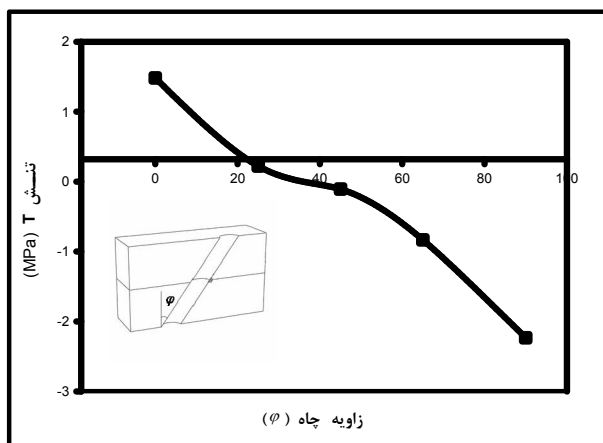
شکل ۴- بارگذاری مدل چاه، ساختار اطراف آن و ترک اولیه

در تحلیل مدلها، خواص مادی در نظر گرفته شده برای توده های سنگی واقع در اعماق زمین، به شرح زیر می باشد (این مقادیر توسط Ingraffea و همکارانش برای یک مخزن با سنگهای زغالی ارائه شده است):



شکل ۸- نمودار حداقل فشار لازم جهت رشد شکاف، بر حسب زاویه چاه

در شکل ۹ اثرات تغییرات زاویه چاه بر تنش T نشان داده شده است.



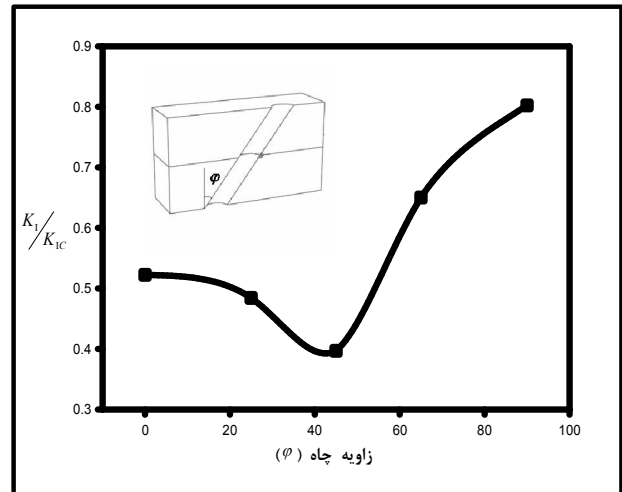
شکل ۹- بررسی اثر زاویه چاه، بر تنش T

در شکل ۹ ملاحظه می شود که با افزایش زاویه چاه، تنش T روندی رو به کاهش دارد. به طوریکه در زوایای بیشتر از حدود ۲۵ درجه تنش T منفی می شود. همانطور که در این شکل دیده می شود، هر چقدر که چاه به حالت افقی نزدیک می شود، تنش T منفی تر شده و از اینرو مسیر رشد ترک پایدارتر می شود.

بحث و نتیجه گیری

در بررسی اثر زاویه چاه بر نسبت K_{I1}/K_{IC} ، از حالت چاه عمودی تا زاویه چاه ۴۵ درجه، با افزایش زاویه چاه، مقدار K_{I1}/K_{IC} با کاهش روبرو می شود. این امر به دلیل تغییر توزیع تنش روی وجوه ترک قابل توجه است. اما با ادامه این روند، از زاویه ۴۵ درجه تا زاویه ۹۰ درجه نسبت K_{I1}/K_{IC} افزایش می یابد. در این محدوده نیز، توزیع تنش در اطراف چاه تغییر می کند. بدین ترتیب که تنش افقی بیشینه و تنش عمودی با هم جایجا می شوند. لذا تنش افقی بیشینه افزایش یافته و از این رو ضریب شدت تنش مود I افزایش می یابد.

اما نکته مهم در این بررسی ها، تأثیرات تغییرات زاویه چاه بر علامت تنش T است. ملاحظه می شود که با افزایش زاویه چاه، تنش T روندی رو به کاهش دارد. به طوریکه در زوایای بیشتر از حدود ۲۵ درجه تنش T منفی می شود. این امر باعث می شود که در صورت لزوم بتوان زاویه چاه را به گونه ای در نظر گرفت که مسیر



شکل ۷- تغییرات K_{I1}/K_{IC} نسبت به زاویه چاه (φ)

همانطور که در شکل ۷ ملاحظه می شود، در بررسی اثر زاویه چاه بر نسبت K_{I1}/K_{IC} ، از حالت چاه عمودی تا زاویه چاه ۴۵ درجه، با افزایش زاویه چاه، مقدار K_{I1}/K_{IC} با کاهش روبرو می شود. اما با ادامه این روند، از زاویه ۴۵ درجه تا زاویه ۹۰ درجه، نسبت K_{I1}/K_{IC} افزایش می یابد.

Ritchie و همکارانش چقرمگی شکست را به عنوان معیار آغاز رشد شکاف هیدرولیکی در مود I خالص، ارائه کرده اند. آنها بیان می کنند که اگر $K_{I1} \geq K_{IC}$ باشد، رشد شکاف آغاز می شود. در بررسی های انجام شده، مطلوب این است که در شرایط مختلف، بتوان حداقل فشار لازم برای آغاز رشد شکاف را تخمین زد. این بررسی از این نظر اهمیت دارد که اگر حداقل فشار لازم جهت آغاز رشد شکاف مشخص باشد، می توان در انتخاب ابزار پمپاژ مورد نیاز، با دقت بیشتری عمل نموده و از هزینه های غیر لازم خودداری نمود. این کار صرفه اقتصادی و زمانی مطلوبی را برای شرکت های مجری عملیات شکست هیدرولیکی در پی خواهد داشت. از این رو در این بخش نمودار مربوط به حداقل فشار لازم برای آغاز رشد شکاف، نسبت به تغییرات زاویه چاه، ارائه شده است. جهت به دست آوردن این فشار، در نرم افزار Abaqus، برای شرایط مختلف، به تدریج فشار سیال تغییر داده شد تا مقدار K_{I1} به مرز K_{IC} (برابر با $5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ در مخازن زغالی) برسد. در شکل ۸ نمودار تغییرات فشار آغاز رشد شکاف بر حسب زاویه چاه ارائه شده است.

در نمودار شکل ۸ ملاحظه می شود که از زاویه صفر درجه تا زاویه ۴۵ درجه، با افزایش زاویه چاه مقدار فشار لازم برای آغاز رشد ترک افزایش می یابد. با ادامه این روند از زاویه ۴۵ درجه تا زاویه ۹۰ درجه با افزایش زاویه چاه، فشار لازم برای آغاز رشد ترک با کاهش روبرو می شود. این امر از تغییر توزیع تنش در اطراف ترک، به دلیل تغییر زاویه چاه ناشی می شود.

Cotterell, B. and Rice, J.R., 1980, Slightly curved or kinked cracks: *International Journal of Fracture*, Vol. 16, 159–69.

Economides, M., 2004, Evaluation of Impacts to Underground Sources of Drinking Water by Hydraulic Fracturing of Coalbed Methane Reservoirs: Department of Energy, 2-24.

Ingraffea, A.R. and Saouma, V., 1985, Numerical modeling of discrete crack propagation in reinforced and plain concrete, Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers, 171-225.

Queipo, V., Verde, J., Canelo, J and Pintos, S., 2002, Efficient global optimization for hydraulic fracturing treatment design: *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 45, 1-2.

Thompson, P.M. and Chandler, N.A., 2004, In situ rock stress determinations in deep boreholes at the Underground Research Laboratory: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, v. 41, 1-5.

Wilkinson, J.R., Teletzke, G.F. and King, K.C., 2006, Opportunities and Challenges for Enhanced Recovery in Middle East: *SPE Monograph*, v. 22, 15-20.

رشد ترک در کنترل طراح بوده و به مخزن مورد نظر دسترسی پیدا نمود. برای این کار زاویه چاه باید بیشتر از ۲۵ درجه در نظر گرفته شود. هر چقدر که چاه به حالت افقی نزدیک می شود، تنش T منفی تر شده و از اینرو مسیر رشد ترک پایدارتر می شود.

بنابراین با افزایش زاویه چاه بیشتر از ۴۵ درجه، هم K_I/K_{IC} افزایش می یابد، که باعث آغاز رشد شکاف در فشار تزریق کمتری می شود و هم پایداری مسیر رشد شکاف، با توجه به منفی تر شدن تنش T، بیشتر می شود. پس ایجاد چاه افقی اثرات مثبتی بر آغاز رشد شکاف و پایداری مسیر رشد شکاف دارد.

مراجع

Adam, T. and Millheim, K., 1991, *Applied Drilling Engineering*: Society of Petroleum Engineers, 351-355.

Bareer, R.D., Fisher, M.K. and Woodroof, R.A., 2002, *A practical guide to hydraulic fracturing diagnostic technologies*: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Texas, 10-15.

Cornet, F.H., Doan, M.L. and Fontbonne, F., 2003, Electrical imaging and hydraulic testing for a complete stress determination: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, v. 40, 2-6.