

بررسی رشد شکاف هیدرولیکی در یکی از مخازن شکاف دار میدان پارس جنوبی

سید احمد حسینی  دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

چهار طاهری شکیب*، ازاهیم آخوریان  دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده

عملیات شکست هیدرولیکی یکی از فن آوری های کلیدی به منظور توسعه مخازن شکاف دار است. مدل سازی فرآیندهای شکست هیدرولیکی به عواملی مانند وضعیت تنش های برجا، مقاومت برشی و جهت گیری شکاف های طبیعی در واکنش (به ویژه پتانسیل باز شدن ترک ها در ناحیه هایی که در امتداد مسیر یک شکاف هیدرولیکی در حال رشد می باشند) و هم چنین طول و ارتفاع شکاف هیدرولیکی بستگی دارد. در این مقاله مدل شکاف هیدرولیکی با توجه به وضعیت تنش های برجا، روی واکنش بین شکاف هیدرولیکی و شکاف طبیعی مایل (۴۵ درجه) و هم چنین اثر طول و ارتفاع شکاف هیدرولیکی، توسعه یافته و روش عنصر محدود توسعه یافته^۱ و روش عنصر مجزا^۲ به منظور حل عددی مورد استفاده قرار می گیرند. هدف این مدل ها بررسی واکنش بین شکاف هیدرولیکی و شکاف های طبیعی است. نتایج روش عنصر مجزا نشان می دهد که در حضور شکاف های طبیعی با چگالی زیاد، افزایش ارتفاع شکاف هیدرولیکی مهم خواهد بود. نتایج عددی اولیه روش عنصر محدود توسعه یافته نشان می دهد که در باز شدگی کششی و برشی اختلافات اساسی وجود دارد. آنالیزها نشان می دهند که شکاف هیدرولیکی در حال رشد، تنش های کششی و برشی کافی روی شکاف طبیعی اعمال می کند.

واژگان کلیدی شکاف هیدرولیکی، مخازن شکاف دار، باز شدگی، کشش، برش

مقدمه

چاه را نمی دهند و چاه بهره وری اقتصادی ندارد؛ چرا که نفت یا گاز به مقدار لازم از چاه تولید نمی شود و به همین دلیل نیاز به ایجاد شکاف ها و کانال های مصنوعی در داخل سنگ مخزن احساس می شود. در واقع این کانال ها که معمولاً توسط عملیات شکاف هیدرولیکی ایجاد می گردند توان سنگ مخزن را برای هدایت سیال به داخل چاه افزایش می دهند. بدین ترتیب عملیات شکست

در صورت اتصال خلل و فرج های سنگ مخزن با یکدیگر و حرکت آسانی سیال به درون چاه، نفوذ پذیری سنگ مخزن را زیاد می دانیم. ولی در مورد نفوذ پذیری های کم، سیال به راحتی قادر به حرکت از داخل سنگ مخزن به درون چاه نیست. در این گونه موارد کانال های درون سنگ، آن گونه که باید اجازه حرکت سیال به درون

* نویسنده عهده دار مکاتبات (taherishakib_uk@yahoo.com)

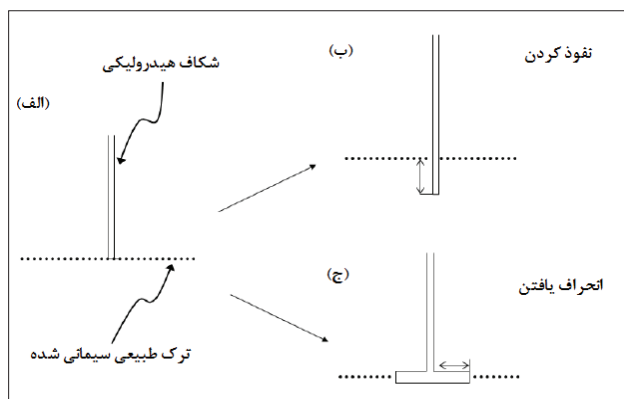
شکاف‌های طبیعی هیچ نقشی ایفا نمی‌کنند و شکاف هیدرولیکی به‌طور موازی با جهت تنش افقی حداکثر رشد را خواهد داشت. این حالت ممکن است نتیجه مقاوت سیمانی زیاد در شکاف‌های طبیعی (در مقایسه با مقاومت ماتریکس)، جهت‌گیری نامساعد شکاف‌های طبیعی یا ناکافی بودن فشار شکست جهت فائق شدن بر تنش نرمال قائم شکاف طبیعی باشد. در سناریوی دوم شکاف هیدرولیکی، شکاف طبیعی را قطع کرده، توسط شکاف طبیعی به دام می‌افتد و سیال به‌طور کامل به داخل شکاف هیدرولیکی منحرف می‌شود. اگر انرژی رشد شکاف هیدرولیکی به اندازه کافی بزرگ‌تر از مقاوت باز شدن سیمان‌های شکاف طبیعی باشد یا اگر تنش‌های برشی شکاف هیدرولیکی تا آن اندازه زیاد باشد که بر سختی بین سطوح شکاف طبیعی غلبه کند، شکاف‌های طبیعی باز خواهند شد. در آخرین سناریو، شکاف‌های طبیعی در وضعیتی که پیچیدگی خاصی دارد توسط شکاف هیدرولیکی قطع یا با آنها وارد واکنش می‌شوند. با کردن^۳ شکاف طبیعی در حرکت روبه جلوی شکاف هیدرولیکی (قبل از قطع شدن توسط آن) نیز از جمله پدیده‌های حائز اهمیت در واکنش بین شکاف القائی و طبیعی می‌باشد. در دیگر حالات، شکاف طبیعی قبل از آنکه شکاف هیدرولیکی با آن برخورد کند شروع به باز شدن، برش یا رشد می‌کند. دلیل این پدیده را می‌توان تمرکز تنش‌ها در نزدیکی نوک شکاف دانست [۷]. اگر چنین پدیده‌ای اتفاق بیافتد ممکن است حتی زمانی که شکاف هیدرولیکی

هیدرولیکی در مخازن شکاف‌دار می‌تواند بسیار حائز اهمیت باشد؛ چراکه در مواردی که سنگ مخزن تا حدودی شکاف‌ها و ترک‌هایی داشته باشد، از این روش به‌منظور اتصال این شکاف‌ها به یکدیگر و در نتیجه افزایش قدرت تولید استفاده می‌شود [۱].

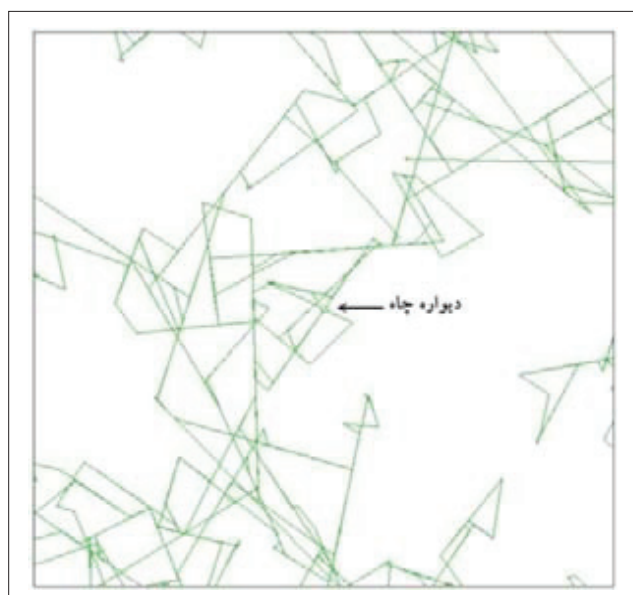
شبه‌سازی عملیات شکاف هیدرولیکی در مخازن شکاف‌دار که به‌صورت عددی [۲] و تحلیلی [۳] مطالعه شده، به‌دلیل وجود شکاف‌های طبیعی با خصوصیات مختلف، از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است [۴]. واکنش‌هایی که طی عملیات شکاف هیدرولیکی و در حضور شکاف‌های طبیعی به‌وجود می‌آید در تعیین بازدهی عملیات بسیار حائز اهمیت می‌باشد [۵]. در این نوشتار به بررسی واکنش بین شکاف هیدرولیکی و شکاف‌های طبیعی در مخازن شکاف‌دار پرداخته خواهد شد. بدین منظور از دو روش عددی عنصر مجزا و عنصر محدود توسعه یافته استفاده می‌شود [۶]. با استفاده از داده‌های موجود، عملیات شکست هیدرولیکی در یکی از چاه‌های میدان پارس جنوبی شبه‌سازی شده است. لازم به‌ذکر است که از روش عنصر مجزا جهت شبه‌سازی پیشرفت و توسعه شکاف هیدرولیکی در مخزن و آنالیز طول و ارتفاع شکاف هیدرولیکی روی عملکرد عملیات شکاف هیدرولیکی و از روش عنصر محدود توسعه یافته به‌منظور واکنش بین شکاف القاء شده با شکاف‌های طبیعی استفاده می‌شود.

۱- واکنش بین شکاف هیدرولیکی و شکاف‌های طبیعی

طی توسعه شکاف هیدرولیکی در مخازن شکاف‌دار، امکان رخدادن سه حالت وجود دارد (شکل-۱). در نخستین حالت



سناریوهای مختلفی که پس از برخورد بین شکاف طبیعی و شکاف هیدرولیکی ممکن است به‌وجود آید



شکل ۲ | وضعیت و موقعیت شکاف‌های طبیعی اطراف چاه

(مثل سنگ تکتونیزه و به شدت درزه دار) را در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی شبیه سازی کرد. این روش محیط سنگی را به عنوان مجموعه ای از بلوک های مجزا تعریف می کند که در آنها ناپیوستگی ها (مثل درزه ها) به عنوان شرایط مرزی بین بلوکی عمل می کنند و جابجایی های برشی می توانند در امتداد این ناپیوستگی ها و نیز چرخش بلوک ها انجام گیرند. در این روش امکان تعریف بلوک ها به صورت صلب و تغییر شکل پذیر وجود دارد. بلوک های تغییر شکل پذیر به شبکه ای از عناصر با تفاوت محدود تقسیم بندی شده و هر عنصر با رفتار تنش- کرنش خطی یا غیرخطی از پیش تعیین شده ای عمل می کند [۹].

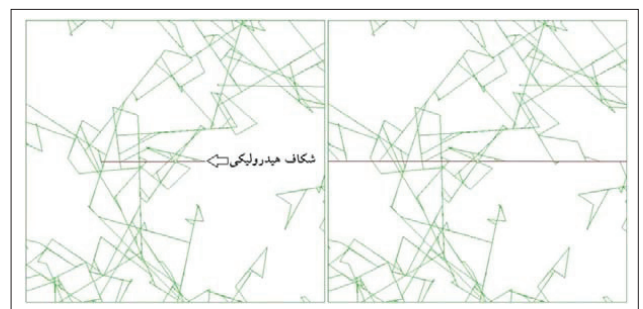
مدل ارائه شده دو بُعدی بوده و شامل یک بلوک 20×20 متر در دو راستای X و Y است که چاه درست در وسط بلوک قرار دارد. فرض می شود شکاف هیدرولیکی فقط در لایه بهره دهه اعمال شود، همه عوامل ثابت باشند و تنها عامل قابل تغییر طول شکاف هیدرولیکی، جهت و باز شدگی آن باشد. بر اساس توزیع تنش های موجود در اطراف چاه، شکاف هیدرولیکی در راستای 90° درجه تشکیل می شود. با دقت به شکل ۳- متوجه خواهیم شد که نیمی از شکاف هیدرولیکی از ناحیه ای می گذرد که تجمع شکاف های طبیعی زیاد است. اما نیم دیگر شکاف هیدرولیکی از قسمتی عبور می کند که شکاف های طبیعی کمی حضور دارند. نمودار تولیدی نیز نشان می دهد که با افزایش طول و ارتفاع شکاف هیدرولیکی، تولید تغییر قابل قبولی خواهد داشت. در شکل ۴- بخشی از شکاف هیدرولیکی که در تماس با شکاف های طبیعی بیشتری قرار دارد نشان داده شده است. از شکل چنین استنباط می شود که جریان زیادی از شکاف های طبیعی وارد شکاف هیدرولیکی می شود که ممکن است به دلیل قطع این شکاف ها توسط شکاف هیدرولیکی باشد. اما در نیمه دیگر شکاف هیدرولیکی وضعیت این گونه نیست؛ یعنی قطع شکاف های طبیعی عامل افزایش تولید نیست بلکه پدیده القاء شدگی شکاف ها^۴ نقش محسوس تری دارد. همان طور که در شکل ۵- مشاهده می شود در این منطقه القاء شدگی سبب ارتباط شکاف های طبیعی با شکاف هیدرولیکی شده و منجر به افزایش تولید گردیده است. بر اساس نرخ های تولید در صورتی افزایش ارتفاع شکاف هیدرولیکی توجیه اقتصادی خواهد داشت که شکاف های طبیعی بیشتری در مسیر شکاف هیدرولیکی وجود داشته باشد [۱۰].

به درون شکاف طبیعی منحرف می شود، تغییر شکل شکاف طبیعی به صورت دو بل رخ دهد. در این سناریو اگر شکاف طبیعی از دیدگاه تنشی دارای ناهمگونی زیادی باشد ممکن است جلوی رشد شکاف هیدرولیکی را بگیرد.

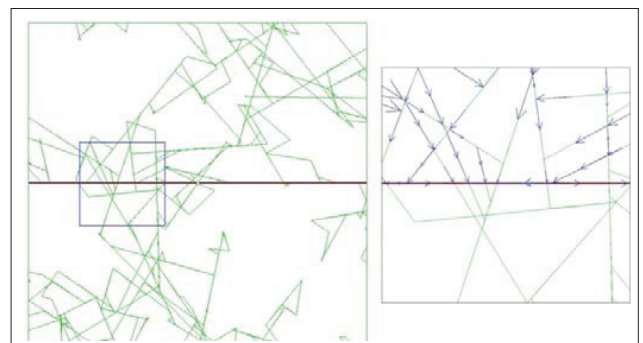
۲- نتایج عددی

۲-۱- روش عنصر مجزا

در شکل ۲- وضعیت شکاف های طبیعی اطراف چاه به کمک این روش شبیه سازی شده است. همان طور که مشاهده می شود در این شبیه سازی تنها شکاف های طبیعی اطراف چاه که به یکدیگر متصل هستند و یک دسته شکاف طبیعی را تشکیل می دهند نشان داده شده اند. به عبارت دیگر در ناحیه هایی که شکاف طبیعی مشاهده نمی شود امکان اینکه شکافی به صورت جدا افتاده و بدون اتصال به شکاف طبیعی دیگری وجود داشته باشد هست. روش عنصر مجزا یک روش تحلیل عددی دو بُعدی است که برای تحلیل مکانیک سنگی محیط های ناپوسته در نظر گرفته شده است. به کمک این روش می توان واکنش یک محیط ناپوسته



شکل ۳ | عملیات شکاف هیدرولیکی در راستای 90° درجه در دو اندازه مختلف

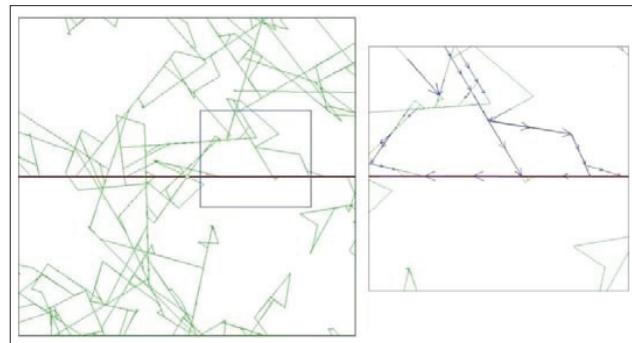


شکل ۴ | قسمتی از شکاف هیدرولیکی در ناحیه ای که قطع شکاف های طبیعی عامل اصلی افزایش تولید است

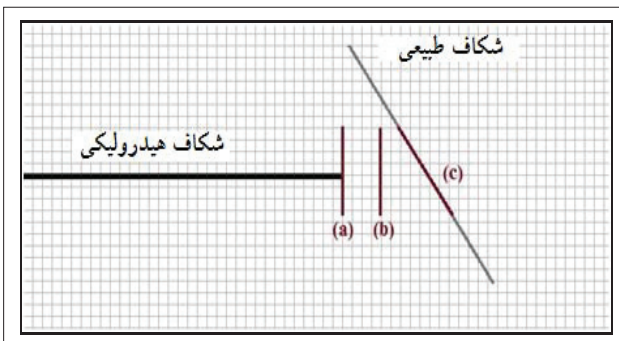
۲-۲- روش عنصر محدود توسعه یافته

در این قسمت به منظور بررسی واکنش بین شکاف هیدرولیکی و شکاف های طبیعی تنها شکاف هایی که نسبت به شکاف هیدرولیکی حالت مایل (حدود ۴۵ درجه) دارند بررسی می شوند؛ چراکه همان طور که از روش قبلی می توان دریافت اغلب شکاف های طبیعی که توسط شکاف هیدرولیکی قطع شده اند نسبت به شکاف هیدرولیکی زاویه ای در حدود ۴۵ درجه دارند. شکاف هیدرولیکی زمانی که به شکاف طبیعی با زاویه ۴۵ درجه نزدیک می شود، قبل از قطع شکاف طبیعی، باعث باد کردن آن می شود. در شکاف طبیعی دو نوع باد کردن کششی و برشی رخ می دهد که در نواحی مختلف از شکاف طبیعی متفاوت خواهد بود. در این قسمت گسیختگی ایجاد شده که توسط پیشرفت شکاف هیدرولیکی اتفاق می افتد را طبق شکل ۶- در سه ناحیه a و b و c بررسی می کنیم.

نمودار میزان بازشدگی کششی و نرمال نیز در شکل ۷- نشان داده شده است. زمانی که شکاف هیدرولیکی به ناحیه a می رسد گسیختگی کششی تقریباً حالت نرمالی دارد؛ بدین ترتیب که نقطه میانی شکاف طبیعی (نقطه تقاطع یا ناحیه ای از شکاف طبیعی که



شکل ۵ | قسمتی از شکاف هیدرولیکی در ناحیه ای که القاشدگی عامل اصلی تولید است

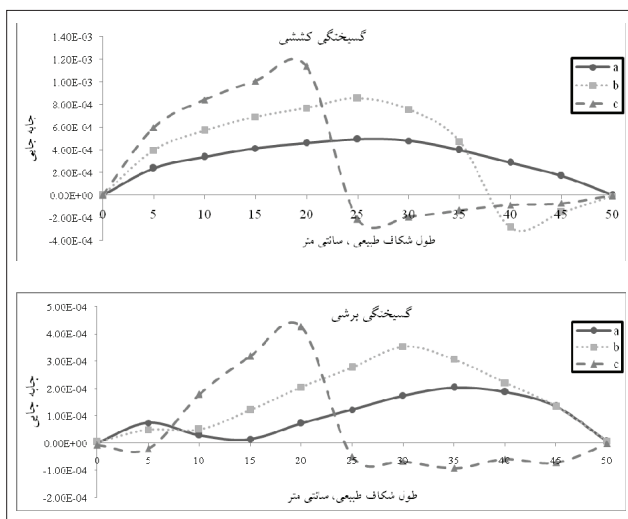


شکل ۶ | شماتیکی از موقعیت شکاف طبیعی نسبت به شکاف هیدرولیکی در سه ناحیه a و b و c

در امتداد شکاف هیدرولیکی پیش رونده واقع شده)، بیشترین میزان بازشدگی را به خود می گیرد. با رسیدن شکاف هیدرولیکی به ناحیه b، وضعیت اندکی متفاوت تر خواهد بود؛ چراکه با وجود بیشترین میزان بازشدگی در نقطه تقاطع دو شکاف، این بار قسمت بالایی شکاف طبیعی متراکم می گردد. این مهم با رسیدن شکاف هیدرولیکی به شکاف طبیعی (نقطه c) محسوس تر می شود. قسمت بالایی شکاف طبیعی متراکم و قسمت پایینی آن دچار بازشدگی می گردد.

در مورد گسیختگی برشی، با رسیدن شکاف هیدرولیکی به ناحیه a، دیگر بازشدگی حالت متقارن ندارد؛ بلکه پیک جابجایی در دو ناحیه وجود دارد. در ناحیه b، این وضعیت محسوس تر است. با دقت به نمودار می توان چنین استنباط کرد که با نزدیک تر شدن شکاف هیدرولیکی، بیشینه میزان بازشدگی برشی از نواحی بالایی شکاف طبیعی به سمت نواحی پایین در حال تغییر می باشد. با رسیدن شکاف هیدرولیکی به شکاف طبیعی (ناحیه c)، به نظر می رسد این استنباط تا حدودی درست بوده؛ چراکه پیک بازشدگی برشی در قسمت پایینی شکاف طبیعی اتفاق می افتد. در واقع جهت حرکت دو صفحه شکاف طبیعی در قسمت های بالایی هم جهت و در قسمت پایینی مختلف الجهد است.

در هر دو نوع بازشدگی کششی و برشی، کمترین میزان بازشدگی مربوط به نوک های شکاف طبیعی یا نواحی نزدیک به آن است؛ چراکه بیشترین میزان تمرکز تنش ها در یک شکاف در نوک



شکل ۷ | جابجایی های کششی و برشی در نواحی مشخص شده شکل ۶

نسبت به افزایش ارتفاع تأثیر محسوس تری روی میزان تولید دارد و برعکس زمانی که شکاف هیدرولیکی در مناطقی با شکاف‌های طبیعی زیاد قرار می‌گیرد، افزایش ارتفاع شکاف هیدرولیکی بیشتر روی تولید اثرگذار خواهد بود. ملاک نتیجه‌گیری در این مورد، میزان تولید است.

■ در روش عددی تفاضل محدود توسعه‌یافته، واکنش شکاف هیدرولیکی با شکاف طبیعی به صورت مایل (۴۵ درجه) شبیه‌سازی شد. شکاف هیدرولیکی در حال رشد فشار کافی بر شکاف‌های طبیعی اعمال کرده و سبب می‌شود که قبل از رسیدن شکاف هیدرولیکی به شکاف‌های طبیعی، آنها را قطع کرده، تحت‌الشعاع خود قرار داده و منجر به ایجاد ناحیه باز شده در شکاف‌های طبیعی گردد. بدین ترتیب انحرافی که شکاف هیدرولیکی بعد از رسیدن به این ناحیه باز شده درون شکاف پیدا می‌کند دوچندان خواهد بود. بازشدگی‌های کششی و برشی قبل و بعد از رسیدن شکاف هیدرولیکی به شکاف طبیعی مورد ارزیابی قرار گرفت و مشاهده شد که بر اساس فاصله میان شکاف‌های القاء شده و شکاف طبیعی، وضعیت و میزان بازشدگی متفاوت خواهد بود. ■

آن می‌باشد. در مورد پدیده‌های بازشدگی کششی و برشی القاء شده توسط شکاف هیدرولیکی در شکاف طبیعی که در بالا بحث شد، وضعیت تنش‌ها ایزوتروپیک فرض شد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله عملیات شکاف هیدرولیکی در یکی از مخازن شکاف‌دار میدان پارس جنوبی بررسی شد. بدین منظور دو روش عددی عنصر مجزا و تفاضل محدود توسعه‌یافته، مورد استفاده قرار گرفت. در روش عنصر مجزا، پیشرفت و توسعه شکاف هیدرولیکی در محیط شکاف‌دار شبیه‌سازی شد. نتایج کسب‌شده در این نوشتار را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

■ بر اساس تغییرات طول و ارتفاع شکاف هیدرولیکی در این روش، در مواردی که چگالی شکاف‌های طبیعی کم است افزایش طول قابل قبول می‌باشد و در مواردی که چگالی شکاف‌های طبیعی در مسیر شکاف طبیعی زیاد است افزایش ارتفاع منطقی به نظر می‌رسد؛ چراکه زمانی که شکاف هیدرولیکی با شکاف‌های طبیعی کمی در ارتباط است، افزایش طول شکاف هیدرولیکی

پانویس‌ها

¹Extended Finite Element Method

²Distinct Element Method

³debonding

⁴fractures coalescence

منابع

- [1] Michael J., Economides A., Daniel Hill., Christiane Ehlig-Economides., petroleum production system., 1993.
- [2] Taheri Shakib J., Ghaderi A., Abbaszadeh shahri A., Analysis of hydraulic fracturing length and aperture on the production rate in fractured reservoir, Life Science Journal., Vol. 9, no. 4, pp. 1769-1777, 2012.
- [3] Olson J., Dahi-Taleghani A., Modeling Simultaneous Growth of Multiple Hydraulic Fractures and Their Interaction With Natural Fractures, SPE 119739, 2009.
- [4] Taheri Shakib J., Akhgarian E., Jalalifar H., Ghaderi A., Numerical Analysis of Hydraulic Fracture Operation in Oil Reservoir Using ABAQUS Software, The First International Conference of Oil, Gas, Petrochemical and Power Plant, Iran, 17 Jun 2012.
- [5] Warpinski N.R., Lorenz J.C., Branagan P.T., Myal F.R., Gall B.L., Examination of a cored hydraulic fracture in a deep gas well. SPE Prod and Fac. pp.150-158, 1993.
- [6] Gale J.F.W., Reed R.M., Holder J., Natural fractures in the Barnett Shale and their Importance for Hydraulic Fracture Treatments, AAPG Bulletin., Vol. 91, pp. 603-622, 2007.
- [7] Fisher M.K., Wright C.A., Davidson B.M., Goodwin A.K., Fielder E.O., Buckler W.S., Steinsberger N.P., Interaction Fracture-mapping Technologies To Improve stimulations in the Barnett Shale., SPE Prod and Fac, pp. 85-93, 2005.
- [8] Szabo, B.A., Babuska I., Finite Element Analysis, John Wiley and Sons., New York, 1991.
- [9] Taheri Shakib, J. Ghaderi, A. Jalalifar, H., 2012. Analysis of Hydraulic Fracture Propagation in Fractured Reservoirs, Book chapter, p.270.
- [10] Taheri Shakib, J. 2013. Hydraulic Fracturing Growth in Fracture Reservoirs Using Analytical and Numerical Simulation: T-Type Intersections. Journal of Petroleum Geosciences.