

توصیف و مدل سازی مخزن کربناته‌ی شکاف‌دار با استفاده از شبکه‌ی ناپیوسته‌ی شکاف‌ها

سیما رحیمی، دانشگاه شهید چمران ■ روح انگیز محمدیان، رضا صالحی مورکانی*، شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب

چکیده

سازند آسماری مخزن اصلی نفت در ایران است که به‌طور عمده از واحدهای کربناته تشکیل شده و اعتقاد بر اینست که در زمان زمین‌شناسی نئوژن، سیستم شکستگی مناسبی پیدا کرده است. یکی از دلایل اصلی پیچیدگی رفتار مخازن کربناته، وجود تخلخل دوگانه‌ی حاصل از شکستگی صفحات است. یک روش مرسوم برای توضیح متغیرهای شکستگی استفاده از شبکه ناپیوسته‌ی شکاف^۱ است. با توجه به کمبود اطلاعات و نواقص موجود در مدل شبکه‌ی ناپیوسته‌ی شکاف، هدف این مقاله ارائه‌ی نتایج روش‌های مختلف برای توصیف شکستگی مخزن است. در این راستا اطلاعات نمودارهای تصویری به کار رفته، با استفاده از تحلیل‌های استریونتی، شکستگی‌های اصلی تقسیم‌بندی شده است با توجه به نقشه‌های هادی، شدت شکستگی در مخزن توزیع شده و با استفاده از روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی، روش‌های زمین‌آمار و پیاده‌سازی یک گردش کار در نرم‌افزار پترل^۲ مدل گسسته‌ی شکستگی‌ها ساخته شد. پس از آن مدل‌سازی متغیرهای مخزنی (تخلخل و تراوایی) در مدل مخزن درشت‌نمایی شده است. در نتیجه در ناحیه‌هایی از مخزن که از لحاظ ساختاری شکستگی بیشتری دارند داده‌های دینامیکی نیز تطابق خوبی نشان می‌دهند.

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۷/۰۲/۱۱

تاریخ ارسال به داور: ۹۷/۰۲/۲۴

تاریخ پذیرش داور: ۹۷/۰۴/۱۸

واژگان کلیدی:

سازند آسماری، شکستگی، تخلخل دوگانه، مدل‌سازی شبکه‌ی گسسته مخزن، شبکه‌ی عصبی

مقدمه

آرایه‌های گسلی و توزیع شکستگی‌های طبیعی تأثیر مهمی در مهاجرت سیال زیرزمینی، به‌تله افتادن و مکانیسم تولید دارند. همچنین می‌توانند نقشی کلیدی در تغییر خصوصیات پتروفیزیکی اصلی مانند تخلخل و نفوذپذیری سنگ مخزن داشته باشد [۱-۳]. شکستگی‌ها اغلب توسط چاه‌ها قطع می‌شوند. بنابراین به‌ندرت هندسه‌ی واقعی آنها قابل تشخیص است [۴]. شبکه‌های درزه معمولاً هندسه‌ی پیچیده‌ای دارند و از محلی به محل دیگر متفاوتند. هندسه‌ی درزه در تغییر شکل‌پذیری و قابلیت نفوذ توده‌های سنگی درزه‌دار تأثیر زیادی دارد [۵]. خصوصیات مجموعه‌ی شکستگی‌های طبیعی مربوط به رویدادهای زمین‌شناسی، فرآیندهای دیاژنزی [۴] و تغییرات سنگ‌شناسی [۹] است. در این مطالعه یکی از مخازن کربناته‌ی شکاف‌دار جنوب‌غربی ایران با هدف مدل‌سازی شبکه‌ی گسسته‌ی شکستگی ارزیابی شده است. روش شبکه‌ی ناپیوسته‌ی شکاف، شکستگی‌ها را به‌صورت شکل‌های مسطحی که خواص هندسی و فضایی خاص دارند نشان می‌دهد. این روش می‌تواند بر حسب اطلاعات زمین‌شناسی موجود به‌صورت قطعی یا به‌صورت الگوهای تصادفی، توزیع شبکه‌ی شکاف در مخزن را بازگو کند. در این روش شکاف‌ها به‌صورت گروهی از صفحات نشان داده می‌شوند که در ابتدا با استفاده از تحلیل‌های استریونتی شکستگی‌های اصلی تقسیم‌بندی شده و سپس با استفاده از شبکه‌های عصبی و روش‌های زمین‌آمار مدل‌سازی شکستگی و درشت مقیاس کردن مدل جهت کسب متغیرهای تخلخل و تراوایی انجام می‌شود.

مقیاس کردن و جنبه‌های محاسباتی در میداین بزرگ توجه شود [۱۰ و ۱۱].

۱- پیش‌زمینه‌ی زمین‌شناسی و بررسی ساختاری

میدان مدنظر که در دامنه‌ی شمالی فرفرافتادگی دزفول قرار دارد بخشی از پیش‌گودال زاگرس است که از شرق به گسل کازرون، از شمال‌غرب به ناحیه‌ی خمشی بالارود و از شمال به ناحیه‌ی خمشی جبیه‌ی کوهستانی محدود می‌شود.

۱-۱- مکانیسم چین‌خوردگی

این میدان از روند اصلی زاگرس تبعیت می‌کند (شکل-۱). با توجه به فرم نامتقارن یال‌های ساختمان، یال جنوب‌غربی نسبت به یال شمال‌شرقی فشردگی بیشتری دارد. این فشردگی در تعداد شکستگی‌های مخزن و عملکرد آنها نیز تأثیر گذاشته است. این تاقدیس، نامتقارن و دارای دو تراست در یال‌های جنوب‌غربی و شمال‌شرقی است [۱۳]. سکانس‌های رسوبی ضخیم در حوضه‌ی زاگرس شامل سنگ‌هایی با محدوده‌ی سنی کامبرین تا عهد حاضر است [۱۲].

۱-۲- نقش گسل‌ها در شکل‌گیری ساختمان مدنظر

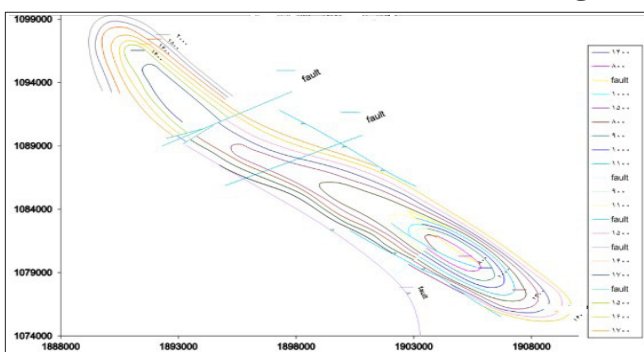
با توجه به وجود گسل تراستی و پی‌سنگی به موازات یال جنوبی ساختمان مدنظر (شکل-۱) و رفتار معکوس این گسل، نیروی اصلی وارده به میدان $(\sigma_{h_{max}})$ عمود بر امتداد گسل است. گسل‌های عرضی نشان داده شده روی نقشه‌ی زیرزمینی^۳ رفتار امتدادلغز-نرمال دارند (شکل-۱). در چین‌هایی که محور ساختمانی آنها انحراف داشته باشد (مانند تاقدیس مدنظر) می‌توان شاهد تغییرات جانبی توسعه‌ی شکستگی‌ها از محور به‌سمت یال‌ها بود.

با این حال باید به برخی مشکلات در اجرای شبکه‌ی ناپیوسته‌ی شکاف از جمله ارزیابی ویژگی‌های شکستگی (طول اصلی و دهانه)، مسائل مربوط به درشت

* نویسنده‌ی عهد‌دار مکاتبات (resa1360@gmail.com)

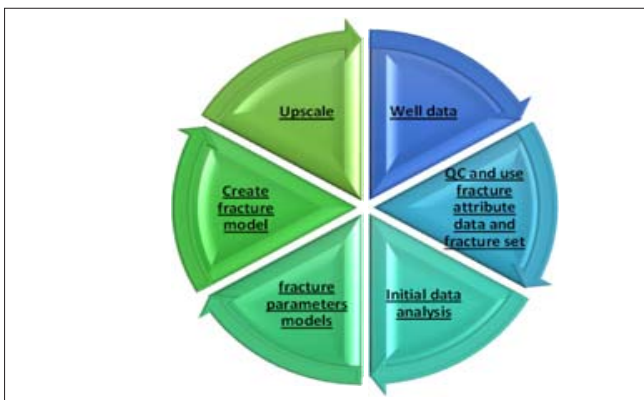
۳-۳- طول خط اثر و هندسه‌ی شکستگی‌ها

شکل شکستگی‌ها به تعداد اضلاع آنها و یک نسبت طولی، ساده‌سازی می‌شود. برای طول خط اثر شکستگی‌ها معمولاً تابع توانی به کار می‌رود. طول خط اثر و امتداد فضایی شکستگی‌ها به‌طور تصادفی و با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو تولید می‌شوند [۱۹].



شکل ۱ | نقشه‌ی UGC سرسازند آسماری نشان‌دهنده‌ی عملکرد گسل‌های متعدد

است که باعث شکستگی سنگ مخزن آسماری شده‌اند



شکل ۲ | گردش کار برای خواص و مدل‌سازی مخزن شکستگی

شکل ۳ | اطلاعات نمودارهای تصویری چاه‌های موجود در

شماره چاه	عمق چاه (متر)	بازه‌ی نمودارگیری (متر)	عمق ورود به (آسماری (متر)	نوع نمودار
۴۲	۲۱۴۲	۱۹۷۰ - ۱۷۲۶	۱۷۴۰	OBMI-UBI
۴۳	۱۸۸۴	۱۸۶۲ - ۱۴۱۷	۱۴۵۳	STAR
۴۴	۲۶۳۸	۱۸۶۲ - ۱۴۸۷	۱۴۸۵	Star
۴۷	۱۸۶۷	۱۸۷۰ - ۱۵۴۵	۱۵۵۶	ORMI-CAST
۴۸	۲۶۶۵	۲۶۶۰ - ۱۳۳۵	۱۸۵۲	FMI

شکل ۴ | حداقل نمودارگیری و تعداد آنها در هر چاه

چاه	بازه‌ی نمودارگیری (متر)	تعداد شکستگی
۴۸	۳۵۵	۱۵
۴۴	۳۷۵	۶۰
۴۲	۲۸۶	۹۱
۴۳	۳۹۵	۱۵۵
۴۷	۳۰۰	۱۶۴

۲-۲- داده‌های موجود و مکانیسم مدل‌سازی

۱-۲- اطلاعات موجود در منطقه‌ی مورد مطالعه

■ شبکه‌ی سه‌بعدی استاتیکی زمین‌شناسی

مدل ساختمانی در واقع اسکلت زمین‌شناسی مخزن است که معمولاً آغاز مدل‌سازی یک مخزن محسوب می‌شود و نقش مهمی در توصیف آن دارد [۱۴]. با استفاده از مدل ساختمانی می‌توان مخزن را به‌صورت شبکه‌های تور مانند یکسانی تقسیم‌بندی کرد که تمامی خواص هر سلول در تمام سطح آن یکسان است [۱۵].

■ اطلاعات چاه

در این مقاله جهت و شدت شکستگی‌های پنج چاهی که نمودار تصویری دارند توسط متخصصان شرکت ملی نفت ایران به‌دست آمده است. مشاهده‌ی شکستگی‌های طبیعی در نمودارهای تصویری، معمولاً اطلاعات محدودی در خصوص جهت‌گیری، دهانه و شدت شکستگی ارائه می‌دهد [۱۶].

۲-۲- مراحل انجام شده در این مطالعه

■ جمع‌آوری داده‌های شکستگی برای محاسبه‌ی تراکم شکستگی

■ بسط یک مدل مفهومی

■ نرم‌افزار مدل‌سازی

■ ساخت مدل شبکه‌ی شکستگی مجزا

این گردش کار در شکل ۲- نشان داده شده است.

۳- مفاهیم ساخت شبکه‌ی درزه‌های مجزا

در ایجاد شبکه‌ی درزه‌های مجزا سیستم پیچیده‌ای از شکستگی‌ها بر مبنای تغییرات موقعیت فضایی، شکستگی‌های متقاطع با هم با طول‌های متفاوت و شبکه‌ی نامنظم به‌وجود می‌آید [۱۷]. مدل‌های شبکه‌ی درزه‌های مجزا می‌توانند هر کدام از متغیرهای شکستگی مانند: فاصله‌داری، مکان فضایی، جهت‌داری و اندازه را با توابع توزیع آماری مانند توزیع‌های نرمال، نمودار نرمال، یکنواخت، گوسی یا توابع توزیع دیگر بیان کنند [۱۸].

۱-۳- توزیع شکستگی‌ها

در محیط‌های همگن فرض می‌شود شکستگی‌ها به‌طور کاملاً تصادفی پخش شده‌اند. پراکندگی شکستگی‌ها یعنی تصمیم‌گیری در مورد اینکه شدت شکستگی وارده چقدر باید باشد؟ در این مقاله از پراکندگی مساحت به حجم شدت شکستگی استفاده می‌شود [۱۹].

۲-۳- جهت‌داری شکستگی‌ها

جهت‌داری شکستگی‌ها (شامل شیب و جهت آنها) با استفاده از داده‌های تحلیلی زمین‌شناسی و الگوریتم فیشر شبیه‌سازی می‌شوند [۱۹]. جهت فضایی شکستگی‌ها عمدتاً به نوع شکستگی بستگی دارد.

۳-۴- دهانه‌ی بازشدگی شکستگی‌ها

دهانه‌ی بازشدگی شکستگی‌ها که میانگین فاصله‌ی عمودی میان صفحات شکستگی است مهم‌ترین نقش را در عبور جریان دارد. در این مقاله دهانه‌ی بازشدگی شکستگی‌ها معمولاً به صورت توابع توزیع احتمال نرمال بیان می‌شود [۲۰].

۳-۵- نمودارهای شدت شکستگی

چگالی شکستگی نشان‌دهنده‌ی تعداد شکستگی در واحد طول در توده‌ی سنگ است [۲۱]. اگر تراکم شکاف با جنس سنگ ارتباط داشته باشد و ضخامت مفید لایه‌ها اختلاف قابل‌ملاحظه‌ای را نشان دهد شدت شکاف خوردگی (رابطه‌ی ۱-۲۱) مطرح می‌شود [۲۱].

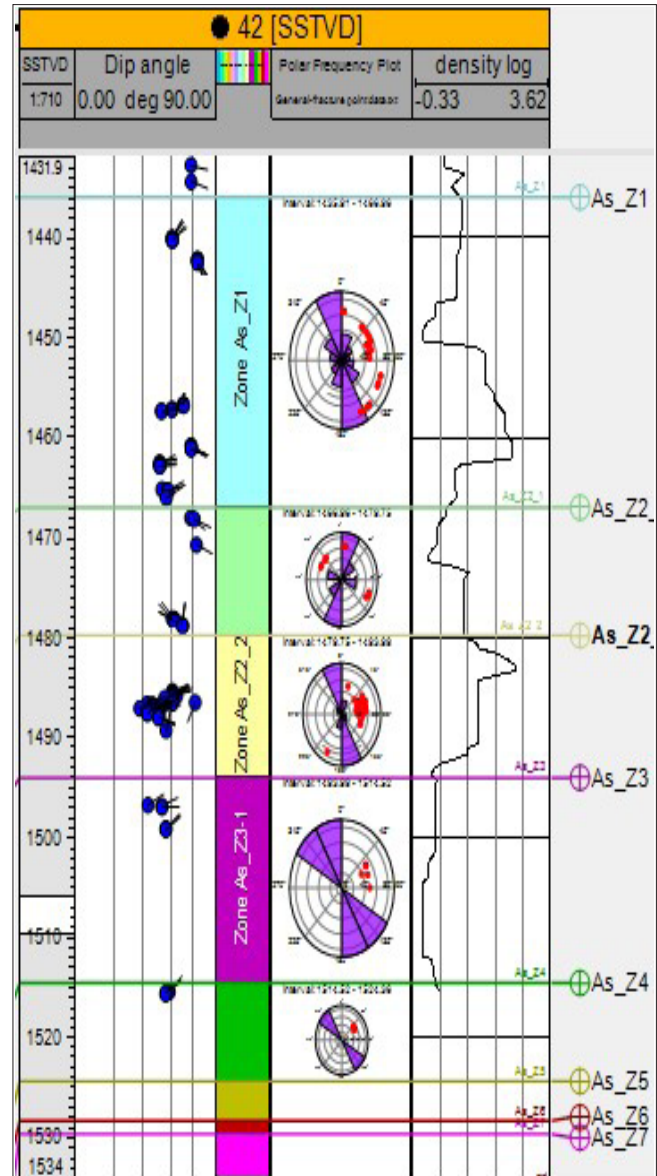
$$\frac{n_f}{\sum n_{ih_i}} = \text{شدت شکاف خوردگی} \quad (1)$$

۴- مدل شبکه‌ی ناپیوسته‌ی شکاف با استفاده از شبکه‌ی عصبی مصنوعی و تحلیل زمین‌آمار

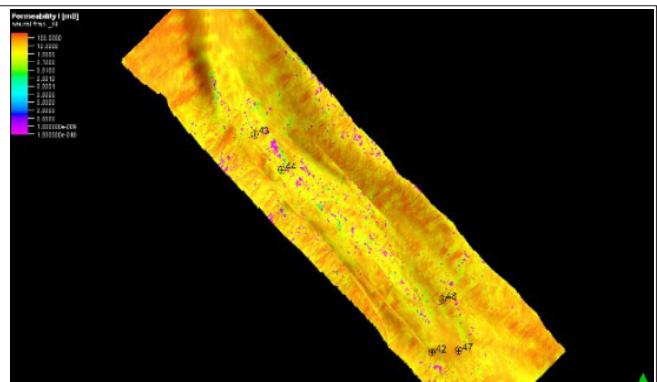
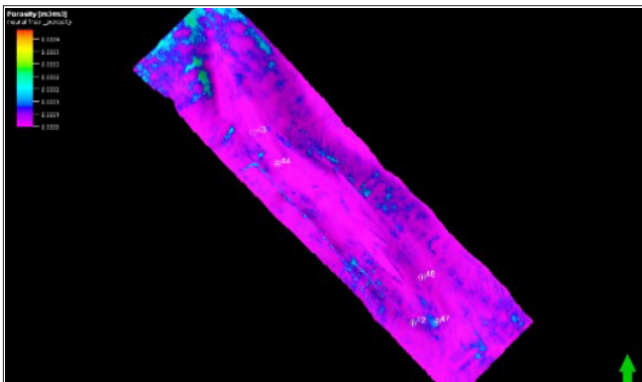
برای دسته‌بندی شکستگی‌ها در نرم‌افزار پترل از متغیری به نام ضریب فیشرف استفاده می‌شود که الگوریتمی است که با قانون توزیع نرمال هماهنگی دارد. هرچه این ضریب برای یک دسته بیشتر باشد نشانگر هم‌بستگی بهتر آن دسته خواهد بود. نتایج تفسیر نمودارهای تصویرگر برای شکستگی‌های باز به صورت شیب شکستگی و آزمون شیب شکستگی بیان می‌شود (شکل-۳).
بر اساس امتداد شکستگی‌های باز چهار دسته شکستگی تعیین گردید. اغلب شکستگی‌های یک دسته می‌توانند از نظر طول، هدایت‌پذیری و شیب خواص یکسانی داشته باشند [۱۹]. نمودار شدت شکاف خوردگی برای هر دسته شکستگی در هر چاه محاسبه و در مدل استفاده می‌شود:

دسته‌ی اول (E-W) (class0) دسته‌ی سوم (N140)(class2)
دسته‌ی دوم (E-W) (class1) دسته‌ی چهارم (N40)(class3)

در نرم‌افزار پترل این امکان فراهم شده تا با استفاده از شبکه‌ی عصبی تأثیر عوامل مختلف در ایجاد شکستگی مخزن بررسی و سپس با توجه به همه‌ی این متغیرها، تراکم شکستگی در نقاط مختلف محاسبه گردد. سپس نقشه‌هایی که ارتباط



شکل ۳ | نمایش اطلاعات شکستگی همراه ناحیه‌بندی؛ رز دیاگرام در نرم‌افزار پترل



شکل ۴ | مدل حاصل از درشت مقیاس کردن تخلخل و تراوایی

تخلخل (ϕ_p) و اندازه‌ی بلوک‌ها (S_p) مربوط به شکستگی مشخص شده و مدل برای محاسبه‌ی تخلخل دوگانه در نرم‌افزارهای شبیه‌ساز جریان سیال آماده می‌گردد. شکل ۴- مدل تراوایی مربوط به شکستگی‌ها را نشان می‌دهد [۲۱].

۶- نتیجه‌گیری

- نتایج تحلیل‌های آماری مدل‌سازی شکستگی گسسته در مطالعه‌ی میدان نفتی مدنظر به شرح زیر است:
- مدل شدت شکستگی نهایی نشان‌دهنده‌ی توزیع ناهمگون شکستگی در داخل ناحیه‌ی گسلی است.
- انعطاف‌پذیری و صرفه‌جویی زمان در محاسبات نرم‌افزاری از مزایای جریان کاری ارائه شده است.
- این مدل با داده‌های تولید و بهره‌برداری مخزن مقایسه شد که نشان‌دهنده‌ی تطابق معقولی با داده‌های تراوایی حاصل از مدل‌سازی شکستگی است.
- در ناحیه‌هایی از مخزن که از لحاظ ساختاری شکستگی بیشتری دارد، داده‌های دینامیکی نیز تطابق خوبی نشان می‌دهند.
- در امتدادهای نزدیک به قائم که جهت صفحات شکستگی هستند تراوایی افزایش یافته است. هیستوگرام فراوانی میانگین مقادیر تراوایی نشان‌دهنده‌ی تأثیر زیاد شکستگی‌ها در مکانیزم تولید چاه‌های این میدان است. ■

بیشتر و ضریب هم‌بستگی بزرگ‌تری با تراکم شکستگی‌ها دارند در ساخت نقشه‌ی هادی^۵ به‌عنوان متغیرهای هادی^۶ برای توزیع شکستگی و در نهایت نقشه‌ی تراکم شکستگی استفاده می‌شوند. قبل از انجام فرآیند افزایش مقیاس مدل شکستگی باید به هر صفحه‌ی شکستگی ساخته شده، مقادیری از باز شدگی دهانه و تراوایی نسبت داده شود. تراوایی با استفاده از قانون کوپیک محاسبه می‌گردد:

$$K_{in} = 1/12 * Aperture^2 * 10^{15} \quad (2)$$

اگرچه عملکرد رابطه‌ی دهانه با طول شکاف به خوبی درک نمی‌شود اما احتمالاً رابطه‌ای خطی وجود دارد. برای به‌روزرسانی این متغیر سناریوی زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$Aperture = fracture\ length * Normal\ (Mean.\ Std.\ dev)$$

در نهایت برای مدل‌سازی چگالی شکستگی از الگوریتم شبیه‌سازی تابع تصادفی گوسی^۷ استفاده گردید. در این مدل‌سازی، الگوریتم فیشر جهت توزیع پراکندگی شکستگی‌ها به کار می‌رود.

۵- درشت مقیاس کردن^۸

چنین مدل گسسته‌ای در نرم‌افزارهای شبیه‌ساز جریان سیال قابل استفاده نیست. بنابراین باید مدل شبکه‌ی شکاف در یک مدل سلولی مخزن درشت مقیاس گردد. پس از فرآیند درشت مقیاس کردن، در هر سلول تراوایی (k)،

پانویس‌ها

- | | |
|-----------------------------------|-----------------------|
| 1. DFN- Discrete fracture network | 5. Driver Map |
| 2. PETREL | 6. Driving Parameters |
| 3. UGC | 7. GRFS |
| 4. Fisher Coefficient | 8. Upscaling |

منابع

- [1] Agosta, F., Prasad, M., Aydin, A. Physical properties of carbonate fault rocks, Fucino basin (Central Italy): implications for fault seal in platform carbonates. *Geofluids* 7, 2007, (19-32).
- [2] Aydin, A. Fractures, faults, and hydrocarbon entrapment, migration and flow. *Mar. Pet. Geol.* 17.2000. (797714-).
- [3] Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology* 24, 1996, (1025-1028)
- [4] Laubach, S.E., Olson, J.E., Eichbul, P., Fomel, S., Marrett, R.A. Natural fractures from the perspective of diagenesis. *CSEG Rec.* 35 7, 2010, (27-31).
- [5] Nelson, R.A.; "Geological analysis of naturally fractured reservoirs". 2001, Second Edition. Gulf Professional Publishing.
- [6] Abul Khair, H., Cooke, D., Hand, M., Paleo stress contribution to fault and natural fracture distribution in the Cooper Basin. 2015, 79, 31-41.
- [7] Madritsch, H., Outcrop-scale fracture systems in the Alpine foreland of centralnorthern Switzerland: kinematics and tectonic context. 2015, *Swiss J. Geosci.* 108, 155-181.
- [8] Zazoun, R.S., The Fadnoun area, Tassili-n-Azdjer, Algeria: fracture network geometry analysis. 2008, *J. Afr. Earth Sci.* 50 (5), 273-285.
- [9] Rustichelli, A., Agosta, F., Tondi, E., Spina, V., Spacing and distribution of bed perpendicular joints throughout layered, shallow-marine carbonates (Granada Basin, southern Spain). 2013, *Tectonophysics* 582, 188-204.
- [10] Ahmed Elfeel, M., Geiger, S., Static and dynamic assessment of DFN permeability upscaling. 2012, *Soc. Petrol. Eng.*
- [11] Ahmed Elfeel, M., Jamal, S., Enemanna, C., Arnold, D., Geiger, S., Effect of DFN upscaling on history matching and prediction of naturally fractured reservoirs, 2013, *Soc. Petrol. Eng.*
- [12] Berberian, M., Active Faulting and Tectonics of Iran, 1981
- [13] Ozkaya, S. I., Fracture length estimation from borehole image logs: *Mathematical Geology*, 2003, v. 35, no. 6, p. 737753-.
- [14] Paul, P., Zoback, M.D., Hennings, P., Fluid flow in a fractured reservoir using a geomechanically constrained fault zone damage model for reservoir simulation, 2007, *SPE Reserv. Eval. Eng.* 12 (4), 562-575.
- [15] Soleimani B., Shabani F., Amiri Bakhtiar H., Haghparast G., "Fault effect at volumetric modeling in Shadegan Oil field using RMS software", *New York Science Journal*, 2008, Vol. 1, No. 4, p. 36..
- [16] Van Golf, T.D., "Fundamentals of Fractured Reservoir Engineering" Elsevier Scientific Publishing Company, 1982
- [17] Baghbanan A., Jing, L.; "Hydraulic properties of fractured rock masses with correlated fracture length and aperture". *Int. J. Mech. Min. Sci.* 2007, Vol. 44, No. 5, 704719-.
- [18] Baghbanan, A.; 2008, "Scale and stress effects on Hydro-Mechanical properties of fractured rock masses". PhD thesis. Royal Institute of Technology,
- [19] Schlumberger, Fracture modeling, 2010
- [20] Maryška J., Severy O. and Vohralik M.; "Application of discrete stochastic fracture networks for modelling of groundwater flow". Czech Republic, 2009,
- [21] Dershowitz, W. S., Rock joint systems: Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1984, Ph.D. Thesis.