



# محاسبه تراوایی در چاه‌های فاقد مغزه با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی

ریاض خراط<sup>۱</sup>، دانشگاه صنعت نفت

بیژاد ایزدی<sup>۲</sup>، دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات تهران

چکیده

یکی از روش‌های تخمین تراوایی استفاده از مفهوم واحدهای جریانی هیدرولیکی است. یک واحد جریانی، حجمی از سنگ مخزن است که به طور عمودی و جانبی پیوسته و قابل پیش‌بینی بوده و خصوصیات زمین‌شناسی و پتروفیزیکی تأثیرگذار روی جریان سیال درون آن ثابت است و به طور مشخص از سایر حجم‌های سنگ متفاوت می‌باشد. تعیین گروه‌های سنگی می‌تواند بر اساس انواع داده‌های لاگ و آنالیز مغزه در دسترس صورت گیرد. در این مطالعه از روش شاخص منطقه جریانی جهت تعیین تعداد گروه‌های سنگی استفاده شده است. پس از آن مدلی جهت تخمین تراوایی در چاه‌های فاقد مغزه به دست آمده و با استفاده از داده‌های تخلخل، میزان تراوایی در این چاه‌ها تخمین زده شده است. با توجه به نتایج مشخص شد که شش گروه سنگی در این مخزن وجود دارد. مدل مورد نظر با استفاده از داده‌های مغزه، میزان تراوایی در چاه‌های فاقد مغزه را با دقت مناسبی برای این مخزن محاسبه می‌کند. در این پروژه سعی شده روش‌های متعددی مانند آنالیز هیستوگرام و آنالیز مرتبه‌ای (خوشه‌ای) جهت تعیین تعداد گروه‌های سنگی استفاده شود.

واژگان کلیدی: گروه‌های سنگی، واحدهای جریانی هیدرولیکی، شاخص منطقه جریانی، تعیین تراوایی، مجموع مربع خطاها

مقدمه

جهت اکتشاف و تولید و اختصاصات پیشرفته مخزن شود [۴-۲].  
مبنای واحدهای جریانی هیدرولیکی بر پایه ارتباط بین تخلخل و تراوایی است که در اصل در سال ۱۹۲۷ توسط کارمن و کوزنی پیشنهاد شد. پس از آن در سال ۱۹۹۳ آموغوله معادله مربوط به شاخص منطقه جریانی را برای تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی بیان کرد. در سال‌های اخیر تعیین گروه‌های سنگی در چندین میدان کشورهای خارجی توسط دانشمندان انجام شده است. در ایران نیز در سال ۲۰۰۹ مطالعاتی توسط خراط و همکاران بر روی یکی از مخازن جنوب ایران انجام شده است. در این زمینه توسط کرامتی و آقازاده نیز مطالعاتی روی سازند داریان میدان پارس جنوبی و هم‌چنین سازند سروک صورت گرفته است. گروه دهرم افقی از لحاظ تجمع گاز بسیار مهم محسوب می‌شود؛ چرا که ذخایر عمده گاز زاگرس در این گروه قرار دارد. سنگ مخزن اصلی گروه دهرم را سازند کنگان و بخش بالایی سازند دالان تشکیل می‌دهند. بنابراین تعیین هرچه دقیق‌تر گروه‌های سنگی مخزنی و منطقه‌بندی این مخازن به منظور ارزیابی هر چه بهتر پارامترهای مخزنی ضروری به نظر می‌رسد. در این تحقیق، ۸۵ نمونه مغزه به دست آمده از یکی از چاه‌های میدان گازی، مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که اطلاعات آنها شامل تراوایی، تخلخل و هم‌چنین اطلاعات زمین‌شناسی و چاه‌پیمایی می‌باشد.

تراوایی یکی از مهم‌ترین پارامترهای مخازن نفتی است که در بسیاری از محاسبات و مدل‌سازی‌های مخزن نقش مؤثری ایفا می‌کند. تعیین تراوایی به روش‌های مختلفی نظیر آزمایش‌های چاه، استفاده از داده‌های چاه‌نگاری و آزمایش مغزه انجام می‌شود. دقیق‌ترین و البته پرهزینه‌ترین روش تعیین تراوایی انجام آزمایش مغزه است. به همین دلیل مطالعات زیادی با هدف یافتن روش‌های دیگری جهت تعیین تراوایی با استفاده از سایر عوامل توسط محققان انجام شده است [۱].  
روابط تخلخل-تراوایی می‌توانند در چارچوب واحدهای جریانی هیدرولیکی به منظور تعیین سنگ‌های مخزنی ناهمگن به کار گرفته شوند. بهره‌برداری صحیح از مخازن هیدروکربوی مستلزم بررسی دقیق رفتار مخزن و سیالات موجود در آن است. اولین مرحله پیش‌بینی رفتار مخزن طی تولید، تعیین گروه‌های سنگی مخزن است. با استفاده از گروه‌های سنگی مخزن می‌توان بخش‌های مخزنی را از بخش‌های غیرمخزنی تفکیک کرد. در روش سنتی تعیین گروه‌های سنگی مخزن سه عامل لیتولوژی، هندسه فضاهای خالی و میزان تخلخل و تراوایی مدنظر قرار می‌گرفت. در این روش زمان‌بر، مغزه‌ها داده‌های اصلی مورد نیاز هستند. تهیه مغزه‌ها بسیار پرهزینه بوده و لذا تنها معدودی از چاه‌های هر میدان را بدین روش می‌توان بررسی کرد. این در حالی است که نمودارهای پتروفیزیکی از همه چاه‌های یک میدان، تهیه شده و امکان بررسی جامع‌تری را فراهم می‌کنند.  
نمودارهای چاه‌پیمایی ثبت پیوسته‌ای از پارامترهای سازند نسبت به عمق را به دست می‌دهند که کاربرد زمین‌شناسی بسیار مفیدی دارند. ترکیب سازندها به کمک نمودارهای چاه‌پیمایی (نظیر چگالی، نوترون و اشعه گاما) می‌تواند به صورت کانی و یا عناصر شیمیایی بیان شود. بنابراین بین پارامترهای پتروفیزیکی و ترکیب سنگ رابطه‌ای وجود دارد. اطلاعات حاصل می‌تواند منجر به تفسیر بهتر

## ۱- رابطه تخلخل و تراوایی در واحدهای جریان هیدرولیکی

کوزنی (۱۹۲۷) یکی از بنیادی‌ترین و مشهورترین روابطی که تراوایی را به عنوان تابعی از تخلخل و سطح مخصوص بیان می‌کند استخراج کرده است [۷-۵].  
شکل تعمیم یافته رابطه کازنی-کارمن به صورت زیر است:

$$K = \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \left[ \frac{1}{F_s \tau^2 S_{vgr}^2} \right] \quad (1)$$



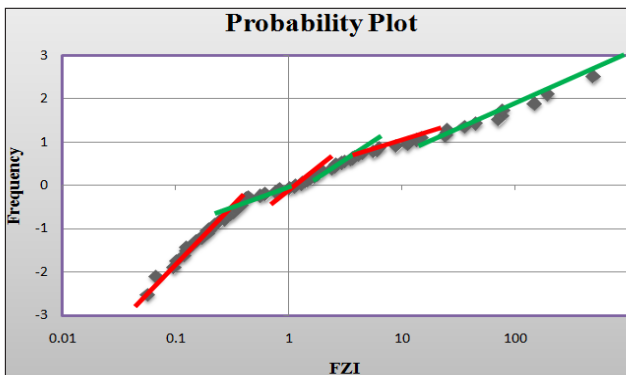
می‌کند. روش کار بدین صورت است که در این بخش با استفاده از نرم‌افزار Matlab، آنالیز هیستوگرام روی داده‌های لگاریتم شاخص منطقه جریانی انجام می‌شود (شکل-۱). حاصل این آنالیز، شش توزیع نرمال است که نشان‌دهنده شش واحد جریان هیدرولیکی است. براساس روش آنالیز هیستوگرام، برای داده‌های مورد استفاده در چاه مورد مطالعه، شش واحد جریان هیدرولیکی تشخیص داده شده است.

## ۲-۲- آنالیز احتمالات نرمال

طبق اصول واحدهای جریان هیدرولیکی، آنالیز احتمالات نرمال لگاریتم شاخص منطقه جریانی، در هر واحد جریان هیدرولیکی به صورت توزیع خطی است. این روش با استفاده از این اصل تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی را تعیین می‌کند. در این روش، آنالیز احتمالات نرمال بر روی داده‌های لگاریتم شاخص منطقه جریانی انجام شده و شش توزیع خطی به دست می‌آید که نشان‌دهنده شش واحد جریان هیدرولیکی است. لذا این روش نیز تعداد واحدهای هیدرولیکی که از مرحله قبل به دست آمد را تأیید می‌کند (شکل-۲). به دلیل سهولت شناسایی بصری خطوط مستقیم، این روش بسیار مفیدتر از روش هیستوگرام است. هر چند اثرات تلفیقی ممکن است تا حدودی خطوط مستقیم را کج کرده و سبب تغییر مکان آنها شود.

## ۲-۳- روش مجموع مربع خطا

در روش مجموع مربع خطا ابتدا تعداد دسته‌ها را برابر یک فرض کرده (HFU=1) و آنالیز خوشه‌ای K-means را توسط نرم‌افزار Matlab انجام می‌دهیم. آنالیز خوشه‌ای به روش K-means، داده‌ها را در گروه‌های مشخصی از هم جدا می‌کند؛ به طوری که داده‌های مربوط به هر گروه با سایر گروه‌ها متفاوت است. در این روش بعد از تعیین تعداد دسته‌ها که از آنالیز هیستوگرام به دست آمده، نرم‌افزار به تعداد دسته‌های تعیین شده، نقاطی را به عنوان نقاط مرکزی در نظر گرفته و فاصله سایر نقاط تا نقطه مرکزی را محاسبه کرده و بدین ترتیب داده‌ها را در گروه‌های مختلف دسته‌بندی می‌کند. نرم‌افزار Matlab این قابلیت را به کاربر می‌دهد که با کمتر شدن انحراف معیار داده‌ها از نقطه مرکزی، به هر تعداد مد نظر محل نقطه مرکزی را تا حصول نتیجه بهتر تغییر دهد. پس از آن آنالیز رگرسیون خطی روی داده‌ها انجام داده و مقدار مجموع مربع خطاها



شکل ۲ | روش آنالیز احتمالات نرمال و تعیین ۶ واحد هیدرولیکی در داده‌های مورد مطالعه

اگر تراوایی بر حسب میلی‌داری باشد، می‌توان پارامتر زیر را معرفی کرد:

$$RQI (\mu m) = \frac{\sqrt{K}}{\phi} \quad (2)$$

که RQI شاخص کیفیت مخزن است.

$\phi_z$  به صورت نسبت حجم حفره به حجم دانه تعریف می‌شود:

$$\phi_z = \left( \frac{\phi}{1-\phi} \right) \quad (3)$$

FZI به عنوان شاخص منطقه جریان در نظر گرفته می‌شود:

$$FZI (\mu m) = \frac{1}{\sqrt{F_s T S_{vgr}}} = \frac{RQI}{\phi_z} \quad (4)$$

با لگاریتم‌گیری از دو طرف خواهیم داشت:

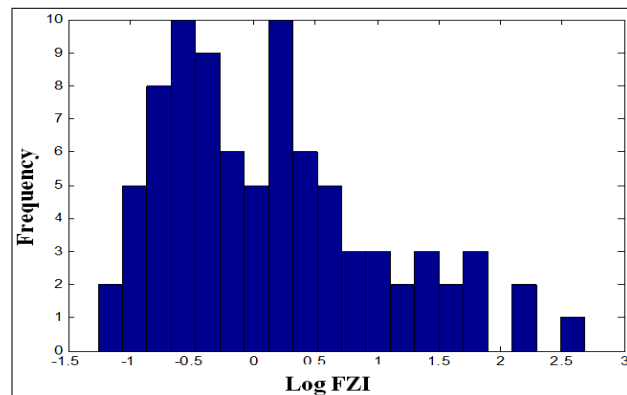
$$\log RQI = \log \phi_z + \log FZI \quad (5)$$

بنابراین برای نمونه‌هایی با FZI مشابه، ترسیم نمودار لگاریتمی RQI در مقابل  $\phi_z$ ، به صورت خطی مستقیم با شیب واحد خواهد بود. مقدار شاخص منطقه جریانی را می‌توان از عرض از مبدا این خط در  $\phi_z=1$  به دست آورد. نمونه‌هایی که دارای مقادیر مختلف شاخص منطقه جریانی هستند خطوط موازی دیگری می‌سازند. تمام نمونه‌های واقع شده در روی یک خط، دارای خواص گلوگاهی یکسان بوده و بنابراین یک واحد جریانی را تشکیل می‌دهند [۸-۱۲].

## ۲-۲- روش‌های محاسبه تعداد واحدهای جریانی هیدرولیکی

### ۲-۱- آنالیز هیستوگرام

بعد از به دست آوردن FZI هر نمونه نوبت به تعیین تعداد واحدهای جریانی هیدرولیکی می‌رسد که برای این کار از آنالیز هیستوگرام استفاده می‌کنیم. طبق اصول واحدهای جریان هیدرولیکی، توزیع هیستوگرام لگاریتم شاخص منطقه جریانی در هر واحد جریان هیدرولیکی به صورت توزیع نرمال است. این روش با استفاده از این اصل تعداد واحدهای جریانی هیدرولیکی را تعیین



شکل ۱ | آنالیز هیستوگرام روی داده‌های لگاریتمی شاخص منطقه جریانی

شاخص منطقه جریانی میانگین در آن واحد هیدرولیکی از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$k = 1014 \times FZI_{(mean)}^2 \frac{\phi_e^3}{(1 - \phi_e)^2} \quad (6)$$

برای بررسی دقت مدل در نظر گرفته شده جهت محاسبه تراوایی، در ابتدا مقدار تراوایی را با استفاده از داده‌های تخلخل به دست آمده از آنالیز مغزه، محاسبه کرده و با داده‌های تراوایی حاصل از آنالیز مغزه مقایسه می‌کنیم. نتایج مدنظر در شکل ۵ آورده شده‌اند. در این شکل نمودار تراوایی محاسبه شده با استفاده از تخلخل مغزه در مقابل تراوایی همان مغزه آورده شده است. شکل داده‌ها (قرار گرفتن آنها روی خطی با شیب ۴۵ درجه)، بیان گر دقت بالای مدل در تخمین تراوایی است ( $R^2 = 0.933$ ). علاوه بر این، دقت در نتایج به دست آمده نشان‌دهنده صحت در نظر گرفتن تعداد شش گروه سنگی شده برای این مخزن است.

### ۳-۱ تخمین تراوایی در چاه‌های فاقد مغزه

پس از بررسی صحت نتایج حاصل از مدل مورد نظر، می‌توان از این مدل جهت محاسبه تراوایی در چاه‌های فاقد مغزه در عمق‌های متناظر با عمقی که عملیات مغزه‌گیری صورت گرفته، استفاده کرد. در این قسمت با استفاده از داده‌های تخلخل به دست آمده از لاگ (در چاهی که داده‌های مغزه آن نیز در دسترس است)، میزان تراوایی را محاسبه می‌کنیم. برای این منظور ابتدا باید داده‌های تخلخل به دست آمده از لاگ را در عمق‌های متناظر با عمقی که عملیات مغزه‌گیری انجام شده، در نظر گرفت.

را محاسبه می‌کنیم. این کار را به همین صورت برای تعداد دسته‌های دیگر نیز انجام داده و در نهایت نموداری از مجموع مربع خطاها در مقابل تعداد دسته‌ها ترسیم می‌کنیم.

همان طور که در شکل ۳- مشاهده می‌شود با افزایش تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی، مقدار مجموع مربع خطاها کاهش یافته اما از یک مقدار به بعد، تغییرات در مجموع مربع خطاها محسوس نبوده و قابل صرف نظر کردن است. این مقدار همان تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی بهینه است.

مزیت این روش، استقلال آن از کاربر و دقت بالاتر در تعیین تعداد دسته‌ها است. بر اساس این روش، برای داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شش واحد جریان هیدرولیکی تشخیص داده می‌شود.

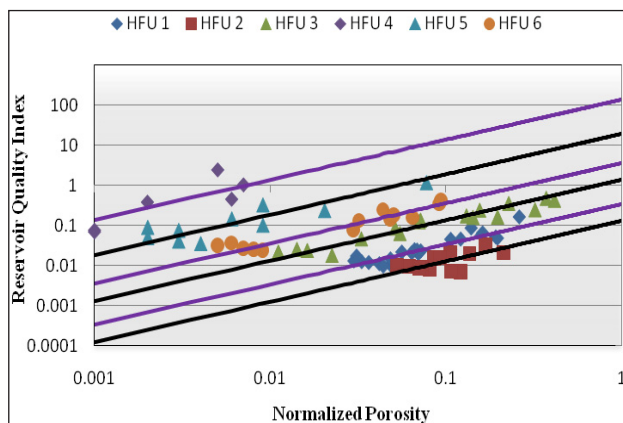
پس از تعیین تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی (شکل ۴-۴)، برای تعیین تراوایی، با استفاده از آنالیز خوشه‌ای K-means و نرم‌افزار Excel، آنالیز واحدهای جریان هیدرولیکی انجام می‌شود. روش کار بدین صورت است که با استفاده از آنالیز خوشه‌ای K-means، واحدهای جریان هیدرولیکی از یکدیگر متمایز شده و با استفاده از نرم‌افزار Excel مقدار شاخص منطقه جریانی متوسط هر واحد جریان هیدرولیکی محاسبه و آنالیز رگرسیون در هر واحد جریان هیدرولیکی انجام می‌شود (جدول ۲-).

### ۳-۲ تخمین تراوایی

مقدار تراوایی هر نمونه را می‌توان با توجه به واحد جریان هیدرولیکی آن و مقدار

مقدار  $FZI_{(mean)}$  برای هر واحد هیدرولیکی

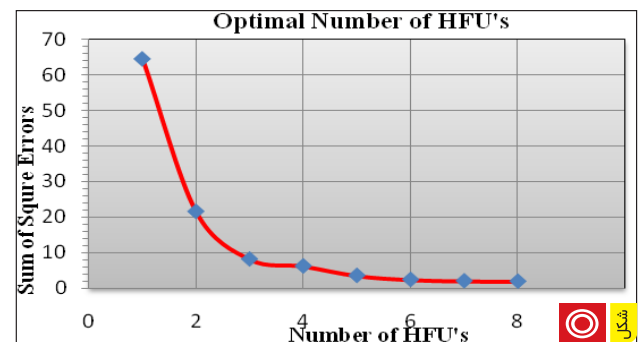
HFU	(FZI) mean
۱	۰/۳۴۳۷۷۱۶۰۴
۲	۰/۱۲۶۵۳۱۸۹۱
۳	۱/۳۳۲۴۷۷۸۵۵
۴	۱۳۳/۰۹۷۵۳۱۲
۵	۱۸/۶۳۷۴۲۸۹۱
۶	۳/۶۰۶۵۴۲۰۴۹



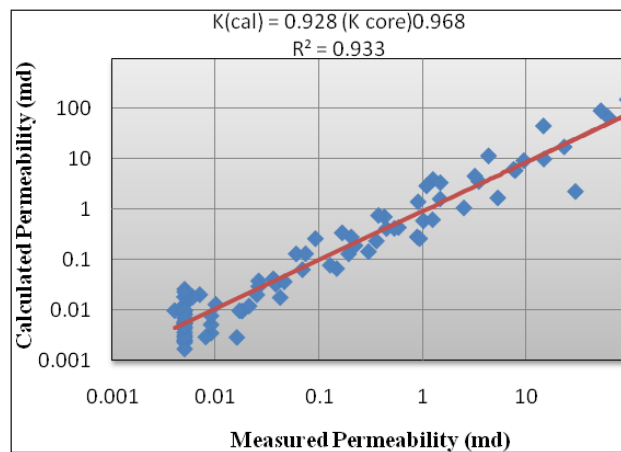
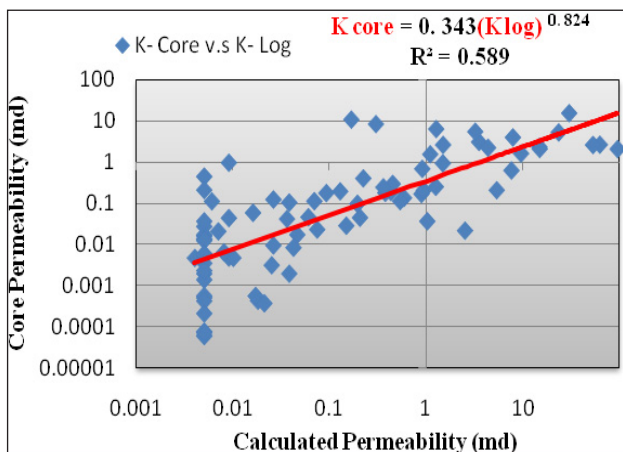
۴ | هر واحد جریانی FZI

مقادیر خطای محاسبه شده به ازای تعداد گروه‌های سنگی

No. of HFU	SSE
۱	۶۴/۶۳۴
۲	۲۱/۵۶
۳	۸/۱۱۳۴
۴	۶/۱۵۷
۵	۳/۴۷
۶	۲/۳۳۴۷
۷	۱/۹۶۰۵
۸	۱/۸۳۶۲



۳ | نمودار مجموع مربع خطاها در مقابل تعداد واحدهای جریان هیدرولیکی



شکل ۶ | تراوایی محاسبه شده با استفاده از تخلخل به دست آمده از لاگ در مقابل تراوایی مغزه همان چاه

می‌دهد. در این مطالعه، زمانی از این روش استفاده می‌شود که ضریب همبستگی حدود ۳۰٪ باشد.

شاخص منطقه جریانی عامل بسیار مناسبی جهت تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی است؛ زیرا این عامل به شدت وابسته به خصوصیات زمین‌شناسی محیط متخلخل و تغییرات هندسه حفرات است.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان گروه سنگی ۱- را به عنوان گروه سنگی قالب مخزن در نظر گرفت.

با توجه به اینکه گروه سنگی ۳- جزو گروه‌های سنگی قالب این مخزن بوده و هم‌چنین از میزان تخلخل و تراوایی نسبتاً خوبی نیز برخوردار است، می‌توان این گروه سنگی را از لحاظ کیفیت مخزنی بهترین گروه سنگی در نظر گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد میزان تراوایی محاسبه شده در چاه‌های فاقد مغزه، با دقت بسیار خوبی (ضریب همبستگی حدود ۵۸۹٪) محاسبه شده است.

شکل ۷ | نمودار تراوایی محاسبه شده با استفاده از تخلخل مغزه در مقابل تراوایی مغزه همان چاه

شکل ۶- نمودار تراوایی محاسبه شده از روش واحدهای جریان هیدرولیکی در یک چاه با استفاده از داده‌های تخلخل لاگ را در مقابل تراوایی مغزه همان چاه با در نظر گرفتن FZI(mean) برای هر واحد جریان هیدرولیکی نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود با این روش می‌توان تراوایی را در چاه‌های فاقد مغزه با دقت بسیار خوبی (ضریب همبستگی حدود ۹۳۳٪) محاسبه کرد.

### نتیجه‌گیری

- تعداد واحدهای جریانی هیدرولیکی به دست آمده در مخزن مورد مطالعه براساس روش‌های مورد استفاده در این تحقیق، ۶ نوع است.
- برای محاسبه تعداد بهینه واحدهای جریانی هیدرولیکی در روش SSE، به دلیل افزایش همبستگی بین داده‌ها با افزایش تعداد گروه‌های سنگی، میزان خطا کاهش می‌یابد.
- روش سنتی تعیین تراوایی با استفاده از تخلخل، نتایج بسیار ضعیفی به دست

### پانویس‌ها

<sup>1</sup>. mi1383@gmail.com

<sup>2</sup>. kharrat@put.ac.ir

### منابع

- [1] Kharrat R, Nazari M, "Permeability Prediction of Un-Cored Intervals: A Case Study of Bangestan Field, Iran", SPE 141122, 2010.
- [2] Chekani M, Kharrat R, "Reservoir Rock Typing In A Carbonate Reservoir-Cooperation Of Core And Log Data: Case Study" SPE 123703, 2009.
- [3] Amaefule J.O., Altunbay D., Tiab D., Kersey D.G., Keelan D.K., "Enhanced reservoir Description: Using Core and Log Data to Identify Hydraulic (Flow) Units and Predict Permeability in Uncored Intervals/Wells", SPE 26436, 1993.
- [4] Saboorian, H., Mowazi, G.H., and Jaber, S.R., "A New Approach for Rock Typing Used in One of the Iranian Carbonate Reservoir (A Case Study)", SPE 131915, 2010.
- [5] Kozeny J., "Über Kapillare Leitung des Wassers im Boden", Sitzungsberichte, Royal Academy of Science, Vienna, Proc. Class I, Vol. 136, 1927.
- [6] Wyllie M.R.J., Gardner G.H.F., "The Generalized Kozeny-Carmen Equation", World Oil, March and April, 1958.
- [7] Carmen P.C., "Fluid Flow through Granular Beds", Trans. AIChE V 15, 150-166, 1937.
- [8] Lacentre P. E., "A Method To Estimate Permeability on Uncored Wells Based on Well Logs and Core Data", University of Iowa, SPE 81058, 2003.
- [9] Abbaszadeh M. D., Fujimoto F., "Permeability Prediction by Hydraulic Flow Units-Theory and Applications", SPE 263-271, 1996.
- [10] Desouky S.E.D.M., "Predicting Permeability in Un-Cored Intervals/Wells Using Hydraulic Flow Unit Approach", PET-SOC-05-07-04, 2005.
- [11] Elarouci F., Mokrani N., "How to Integrate Wire line Formation Tester, Logs, Core and Well Test Data to Get Hydraulic Flow Unit Permeability's: Application to Algeria Gas Field", SPE 134001, 2010.
- [12] Rushing J.A., Newsham K.E., Blasingame T.A., "Rock Typing-Keys to Understanding Productivity in Tight Gas Sands", SPE 114164, 2008.