

## مطالعه تاثیر فشار بر روی ضریب سیمان شدگی سنگ های کربناته در واحدهای جریان هیدرولیکی

حبيب اله صديقي<sup>۱\*</sup>، كاظم سعادت<sup>۲</sup>، محمدرضا اصفهانی<sup>۳</sup> و عزت اله كاظم زاده<sup>۴</sup>

پژوهشگاه صنعت نفت تهران

\*seddighih@ripi.ir

دریافت شهریور ۱۳۹۳، پذیرش اردیبهشت ۱۳۹۴

### چکیده

بررسی عوامل موثر بر خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن جهت شبیه سازی مدل دینامیکی مخازن هیدروکربوری امری ضروری می باشد. اهمیت این مطالعه به این علت است که ضریب سیمان شدگی وابسته به تغییرات فشار مخزن است و موثرترین پارامتر در میزان اشباع شدگی آب در مدل های مذکور می باشد. در این راستا ابتدا نمونه های یکی از مخازن هیدروکربوری واقع در جنوب غرب ایران به روش واحدهای جریان هیدرولیکی طبقه بندی و سپس برای هر واحد جریانی، ضریب سیمان شدگی در مدل های آرچی و بهترین برآزش در فشارهای محیط ، ۸۰۰ ، ۳۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ پام تعیین و تغییرات آن در برابر فشارهای مختلف به صورت روابط تجربی ارائه گردید. (محدوده ضریب همبستگی R2 در این ارتباط بین ۰/۹۶ و ۰/۹۹ می باشد). همچنین در این مطالعه ارتباطی بین شاخص منطقه ای جریان در هر واحد جریانی و بازه تغییرات ضریب سیمان شدگی حاصل از فشارهای مختلف ارائه شد. نتایج حاصل از این ارتباط نشان داد که با افزایش شاخص منطقه ای جریان، بازه تغییرات ضریب سیمان شدگی کاهش یافته است.

**واژه های کلیدی:** ضریب سیمان شدگی، واحدهای جریان هیدرولیکی، اشباع شدگی، فشار همه جانبه.

## ۱. مقدمه

یکی از پارامترهای مهم در محاسبه حجم مخزن، میزان اشباع هیدروکربوری باشد. در ارزیابی اشباع شدگی آب و نفت معادلات مختلفی ارائه گردیده است که بر مبنای معادله آرچی پایه گذاری شده اند. دسترسی به مقادیر واقعی اشباع شدگی آب، وابسته به ارزیابی دقیق ضرایب آرچی می باشد. آرچی این ضرایب را برای مخازن ماسه سنگی معرفی و برای آن مقادیر ثابتی در نظر گرفت. تاثیرگذارترین ضریب بر اشباع شدگی آب، ضریب سیمان شدگی است. در سنگ های کربناته برخلاف ماسه سنگ ها به دلیل ناهمگونی، دارای تنوع زیاد در لیتولوژی، بافت، شکل و هندسه منافذ می باشد. ضریب سیمان شدگی نیز تحت تاثیر این عوامل خصوصا "عوامل تغییرات دیاژنتیکی، نوع تخلخل و هندسه منافذ است. در نتیجه این ضریب در سنگ های کربناته ثابت نبوده و با تغییر فشار مخزن تغییر خواهد کرد. لذا لازم است تاثیر تغییرات فشار مخزن بر تغییرات این ضریب مورد مطالعه و در پیش بینی رفتار مخزن لحاظ گردد.

حسینی نیا و رضایی (۱۳۸۰) در آنالیز حساسیت پارامترها و ضرایب در معادله اشباع شدگی نشان دادند که ضریب سیمان-شدگی و نمای اشباعی می توانند بیشترین عدم قطعیت را در محاسبه اشباع شدگی سبب شوند [۲]. همچنین بررسی انجام شده توسط اسدالهی و همکاران (۲۰۰۸) در سنگ های کربناته بیانگر اهمیت ضریب سیمان شدگی و تاثیر بسزای آن در عدم قطعیت اشباع شدگی، نسبت به نمای اشباعی است [۸]. تنادر ثابتی و همکاران (۱۳۹۱) نمودار ضریب سیمان شدگی بر حسب تخلخل را برای بازه های مختلفی از تخلخل ارائه دادند [۱]. نمودار فوق اهمیت مطالعه ضریب سیمان شدگی را آشکار می سازد. این نمودار نشان می دهد که تغییرات جزئی ضریب سیمان شدگی می تواند سبب تغییر قابل توجهی در اشباع شدگی آب گردد.

فت و وایلی (۱۹۵۸) جزو اولین محققینی هستند که در زمینه تاثیر فشار همه جانبه بر روی سیمان شدگی مطالعاتی انجام دادند [۱۰]. محققینی همچون فهد و همکاران در سال ۲۰۰۰ میلادی به منظور تخمین تراوایی سنگ مخزن نفتی و اسویرسی و همکاران در سال ۲۰۰۴ به منظور تحلیل چالش ها در توصیف میدان نفتی از روش واحدهای جریان هیدرولیکی استفاده نمودند [۹ و ۱۴].

در این مطالعه تاثیر فشار همه جانبه بر تغییرات ضریب سیمان شدگی در واحدهای جریان هیدرولیکی در یک حلقه چاه از مخازن کربناته گازی در جنوب ایران متعلق به سازند دالان و کنگان مورد بررسی قرار گرفته است. سازند دالان و کنگان در بردارنده مهمترین مخازن گازی در جنوب ایران بوده و به لحاظ نوع تخلخل بسیار متنوع می باشند. محدوده پوشش عمقی نمونه های مخزن مورد مطالعه ۳۱۵ متر می باشد. مطالعه در عدد دانسیته و توصیف مختصر زمین شناسی نشان داد که جنس نمونه های مورد مطالعه آهک و اغلب دولومیت می باشند. همچنین تخلخل غالب نمونه ها، قالبی و در اغلب نمونه ها تخلخل حفره ای نیز دیده شد. اندازه گیری تخلخل و نفوذپذیری نشان می دهد که تغییرات تخلخل هلیم و تراوایی نمونه های سنگ مخزن به ترتیب بین ۳/۰۰ تا ۳۱/۶۹ و ۰/۰۱۱ تا ۱۷۰/۹۶ می باشند.

## ۲. گروه بندی نمونه های سنگ مخزن در واحدهای جریان هیدرولیکی

در نظریه واحدهای جریان هیدرولیکی هر واحد جریانی، به عنوان حجمی از کل سنگ مخزن تعریف می شود بطوریکه خواص زمین شناسی کنترل کننده جریان، به صورت درونی ثابت و به صورت قابل پیش بینی شدنی متفاوت از مشخصات سایر سنگ ها می باشد. بنابراین واحد جریان هیدرولیکی منطقه ای از مخزن با لایه بندی خاص است که به طور جانبی و قائم ممتد بوده، و جریان مشابهی دارد [۶]. واحدهای جریان هیدرولیکی مرتبط با توزیع رخساره های زمین شناسی و به

خصوص رسوبی بوده ولی الزاما" مرزهایش با مرزهای رخساره های سنگی منطبق نیست [۴]. تلفیق های متنوع از عوامل تاثیرگذار زمین شناسی می توانند واحدهای جریان هیدرولیکی مجزا را به وجود آورند که هر کدام خواص انتقال سیال مشابهی دارند. واحدهای جریان هیدرولیکی تحت تاثیر زمین شناسی مخزن شامل بافت، نوع کانی و محل قرار گرفتن و فراوانی آن، اندازه گلوگاه های تخلخل و ژئومتری منافذ می باشد. البته فیزیک سیال و تاثیر آن روی واحدهای جریان هیدرولیکی هم جای خود را دارد که می توان به تعداد فاز سیال موجود در منافذ، ویسکوزیته و چگالی اشاره کرد. با داشتن تعاریف شاخص منطقه ای جریان (FZI) از رابطه ۲ و شاخص کیفیت مخزنی (RQI) از رابطه ۱ و تخلخل نرمال شده ( $\phi_z$ ) از رابطه ۳، رابطه ۴ حاصل خواهد شد که در واقع مفهوم ریاضی واحدهای جریان هیدرولیکی می باشد.

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{k}{\phi_e}} \quad (1)$$

$$FZI = \frac{1}{\sqrt{F_s \tau^2 S_{gv}^2}} \quad (2)$$

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

$$RQI = \phi_z \times FZI \quad (4)$$

در این روابط  $F_s$  عامل شکل،  $k$  تراوایی بر حسب میکرومتر مربع،  $\phi_e$  تخلخل موثر (به صورت کسری)،  $S_{gv}$  مساحت سطح واحد حجم، ضریب  $0.314$  جهت تبدیل میلی متر مربع به میلی داری و  $F_s \tau^2$  ثابت کوزنی می باشد که مقدار آن متغیر بوده و در حقیقت  $F_s \tau^2 S_{gv}^2$  تابعی از خصوصیات زمین شناسی محیط متخلخل و تغییرات هندسه حفرات است و به همین علت می توان از آن به عنوان معیاری جهت تمایز واحدهای جریان هیدرولیکی از یکدیگر استفاده کرد.

در شرایط ایده آل نمودار لگاریتمی RQI در مقابل  $\phi_z$  یک نمودار خطی با شیب یک خواهد بود و مقدار متوسط FZI محل تلاقی خط با  $\phi_z=1$  خواهد بود. مبنای طبقه بندی واحدهای جریان هیدرولیکی مشخص کردن گروه داده ها از خطوط راست با شیب یک روی نمودار لگاریتمی RQI بر حسب  $\phi_z$  است [۴].

بعد از محاسبه پارامترهای مرتبط با گلوگاه های تخلخل یعنی RQI و FZI قادر خواهیم بود واحدهای جریان هیدرولیکی را براساس FZI های مختلف مقایسه نماییم. هر چند که برای هر واحد هیدرولیکی می بایستی یک مقدار FZI در محدوده مقدار متوسط واقعی وجود داشته باشد. لیکن این در تئوری صادق بوده و در عمل به دلیل اندازه گیری خطاهای تصادفی در آنالیز مغزه یک توزیع از FZI در محدوده مقدار متوسط واقعی وجود دارد. تابع توزیع کلی FZI ها یک انطباق از توابع توزیع جداگانه اطراف متوسط FZI مربوط به هر واحد جریان هیدرولیکی است. شناسایی هر متوسط FZI یا واحد جریان هیدرولیکی نیازمند تجزیه کلی توزیع FZI به عناصر سازنده اش می باشد. برای رسیدن به این مهم می توان از روش های نمودار احتمال، الگوریتم آنالیز دسته بندی تحلیلی و آنالیز هیستوگرام جهت گروه بندی مناسب واحدهای جریان هیدرولیکی بهره گرفت [۳].

## ۱-۲ روش تحقیق

مطالعات بر روی ۲۱۳ نمونه پلاگ استوانه ای شکل به قطر ۱/۵ اینچ مربوط به یک حلقه چاه از میدین کربناته گازی جنوب غرب ایران صورت گرفت. در قدم نخست آماده سازی نمونه ها، شامل پلاگ گیری، شستشو توسط حلال تولوئن و متانول و خشک نمودن آنها در آون های حرارتی انجام و سپس خواص معمولی مغزه شامل تخلخل و تراوایی اندازه گیری شد. با گروه بندی نمونه ها به روش واحدهای جریان هیدرولیکی، چهار واحد هیدرولیکی برای مخزن فوق تشخیص داده شد. در مرحله بعد به منظور آزمایشات مقاومت الکتریکی در هر چهار واحد جریانی ۵۷ نمونه از واحدهای جریانی مختلف انتخاب و با آب نمک با شوری معادل سازند اشباع گردید و سپس نمونه ها داخل سیستم مغزه نگهدار هیدرواستاتیک دستگاه Overburden Rig قرار گرفت و با اعمال فشار همه جانبه توسط پمپ، چند برابر حجم فضای متخلخل نمونه به آن آب نمک معادل شوری سازند تزریق شد و بعد از ایجاد شرایط تعادل مقدار مقاومت نمونه بر حسب اهم اندازه گیری و ثبت گردید.

با پایان یافتن آزمایش در شرایط فشار محیط، به منظور بررسی تاثیر افزایش فشار همه جانبه بر مقاومت الکتریکی نمونه پلاگ، فشارهای همه جانبه به میزان ۸۰۰، ۲۰۰۰، ۳۵۰۰ و ۵۰۰۰ پام افزایش یافت و در هر مرحله فشاری مقاومت الکتریکی اندازه گیری و ثبت شد. با توجه به تاثیر دما بر روی هدایت الکتریکی تصحیح دمایی برای مقامت الکتریکی از رابطه ۵ صورت گرفته است. در این رابطه  $R_1$  و  $T_1$  به ترتیب مقاومت الکتریکی و دما درحین آزمایش بوده و  $R_2$  و  $T_2$  به ترتیب مقاومت الکتریکی و دما در شرایط دمایی مورد نظری باشد [۷].

$$R_2 = \frac{R_1(T_1 + 21.5)}{(T_2 + 21.5)} \quad (5)$$

مقاومت ویژه الکتریکی نمونه و مقاومت ویژه آب سازندی با استفاده از روابط ۶ و ۷ تعیین شده اند [۱۳].

$$R_0 = R \frac{A}{L} \quad (6)$$

$$R_w = \left[ (400000/T_f) P_w \right]^{0.88} \quad (7)$$

در روابط فوق  $A$  سطح مقطع و  $L$  طول نمونه بر حسب متر،  $p_w$  شوری آب سازند بر حسب ppm و  $T_f$  دمای سازند بر حسب درجه فارنهایت می باشد. اندازه گیری ها با دقت ۰/۲ درصد بوده و در فرکانس یک کیلو هرتز انجام شده است. در نهایت مقدار فاکتور مقاومت سازندی برای هر نمونه از رابطه ۸ محاسبه گردید.

$$F = \frac{R_0}{R_w} = \frac{a}{\phi^m} \quad (8)$$

در این رابطه  $R_0$  مقاومت سنگ صددرد صد اشباع با آب،  $R_w$  مقاومت آب سازندی،  $a$  ضریب پیچاپچی،  $\phi$  تخلخل و  $m$  ضریب سیمان شدگی می باشد.

## ۳. بحث و نتایج:

## ۳-۱ تغییرات مقادیر ضرایب آرچی در واحدهای جریان هیدرولیکی

در این مطالعه، با بکارگیری هیستوگرام توزیع فراوانی و روش آنالیز خوشه ای مقادیر FZI، چهار واحد جریان هیدرولیکی تشخیص داده شد. در شکل ۲ مقادیر متوسط FZI که از ارتباط شاخص کیفیت مخزنی برحسب تخلخل نرمال شده بدست می آید برای نمونه های مخزنی مورد مطالعه تعیین شده است. نمودار تخلخل برحسب تراوایی در هر واحد جریان هیدرولیکی در شکل ۳ نشان داده شده است. توابع به شکل  $Y=aX^b$  بهترین برازش را در این ارتباط نشان می دهد. ضریب همبستگی ۰/۸۲، ۰/۹۴، ۰/۹۶ و ۰/۹۸ به ترتیب برای واحدهای جریان هیدرولیکی ۱ و ۲ و ۳ و ۴ مناسب بودن روش طبقه بندی داده ها را تایید می کند.

در روش عمومی از رسم نمودار لگاریتمی F بر حسب  $\phi$ ، خطی حاصل خواهد شد که شیب آن m و عرض از مبدا آن a خواهد بود. در توجیه مقادیر متفاوت a و m می توان گفت که افزایش درجه سیمانی شدن، تاثیر بیشتری بر روی فاکتور مقاومت سازندی نسبت به مقدار تخلخل دارد. لذا در این حالت مقدار m بالا و مقدار a کمتر می باشد، در حالی که کاهش جوردگی دانه های کروی تاثیر کمتری بر روی فاکتور مقاومت سازندی نسبت به تخلخل دارد. بنابراین m حاصل کمتر و مقدار a خیلی بیشتر است. این دو پارامتر تا حدود زیادی تحت تاثیر فضای منافذ و خصوصیات کلی خلل و فرج نظیر شکل جوردگی، اندازه و تغییر شکل منفذ، فاکتور پیچایی، نوع سیستم تخلخل (بین دانه ای، بین بلوری، شکستگی) فشرده گی و محتویات رسی می باشند [۱۵]. نمودارهای لگاریتمی ۴ و ۵ ارتباط فاکتور مقاومت سازندی با تخلخل را، در هر واحد جریان هیدرولیکی نشان می دهد. شکل ۴ حاصل از رابطه آرچی و شکل ۵ حاصل بهترین برازش می باشد. بهترین انطباق در این نمودارها به صورت  $F=a/\phi^m$  می باشد. در جدول ۱ روابط تجربی حاصله به همراه ضریب همبستگی آنها ارائه گردیده است. نتایج حاصل نشان می دهد که با افزایش شاخص منطقه ای جریان، ضریب سیمان شدگی به تدریج کاهش یافته است. شیب این تغییرات کاهشی به نحوی است که با افزایش شاخص منطقه ای جریان کمتر شده و در واحدهای با شاخص جریان بالاتر به حداقل میزان خود رسیده است.

## ۳-۲ ارتباط ضریب سیمان شدگی با فشار همه جانبه

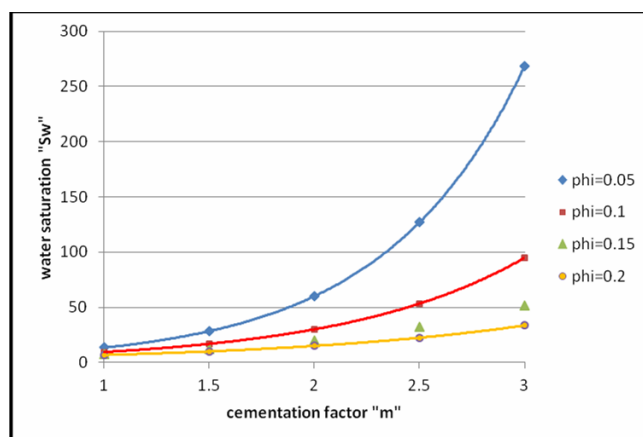
پارامتر سیمان شدگی در سنگ ها بستگی به نوع سیستم تخلخل (بین دانه ای، بین بلوری، شکستگی یا حفره ای) دارد. هر چند که تاثیر منافذ حفره ای و نحوه توزیع آنها در سنگ ها بر پارامتر سیمان شدگی ناشناخته می باشد ولی در این زمینه لوسیا در سال ۱۹۸۳ به این نتیجه رسید که افزایش تخلخل از نوع حفره ای مقدار پارامتر سیمان شدگی را افزایش می دهد [۱۱]. همچنین ارتباط منافذ حفره ای سبب کاهش این پارامتر می شود. آگولرا نیز در سال ۱۹۷۶ افزایش تخلخل از نوع شکستگی را عامل کاهش فاکتور سیمان شدگی دانست [۵].

در اثر فشرده شدن سنگ تغییر شدیدی در منافذ و شکل دانه ها ایجاد می شود. هر چه این فشرده گی بیشتر شود، دانه ها بیشتر از حالت اولیه خود خارج شده، پهن تر شده و در نتیجه باعث افزایش زاویه دار شدن دانه، مقدار فشرده گی منافذ، مقدار انبساط گرمایی و نیز توان سیمان شدگی می شود. همچنین این فشرده گی یک کاهش چشم گیر در تخلخل سنگ ایجاد می کند به همین دلیل مقدار فاکتور پیچایی و ضریب سیمان شدگی در سنگ با افزایش فشار، افزایش پیدا می کند [۱۲]. در

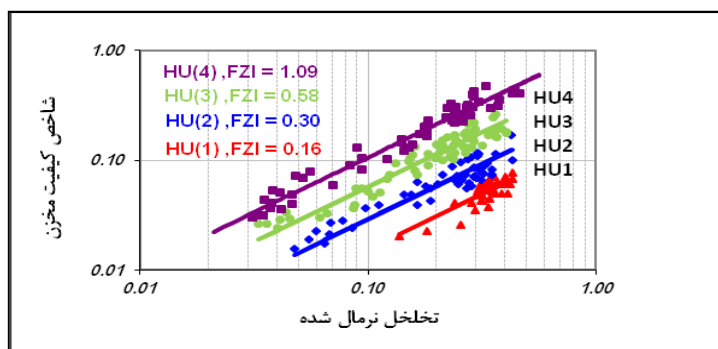
شکل (۶) تاثیر فشار همه جانبه بر روی نمونه های سنگ مخزن مورد مطالعه در واحدهای جریانی مختلف به نمایش در آمده است. بررسی در این شکل نشان می دهد که با افزایش فشار، مقادیر ضریب سیمان شدگی در هر واحد جریانی افزایش یافته است به نحوی که تاثیر فشار بر تغییرات ضریب سیمان شدگی برای واحدهای جریانی که شاخص منطقه ای جریان بیشتری دارند کمتر بوده و برای واحدهایی که شاخص منطقه ای جریان پایین تری دارند بیشتر بوده است. بهترین برازش برای نمودارهای شکل ۶ به صورت رابطه چند جمله ای می باشد. در جدول شماره ۲ می توان روابط تجربی حاصله و ارتباط مناسبی که بین این دو متغیر به وجود آمده را مشاهده نمود.

فاکتور پیچاپیچی تاثیر محسوسی بر روی مقادیر مختلفی همچون، تخلخل و تراوایی و فاکتور مقاومت سازندی دارد. بر اثر افزایش فاکتور پیچاپیچی مقادیر تخلخل و تراوایی کاهش یافته و فاکتور مقاومت سازندی و ضریب سیمان شدگی افزایش می یابد. نسبت بالای فاکتور پیچاپیچی به ضریب سیمان شدگی، فراوانی رس ها، وجود انواع تخلخل های پیچیده و یا بالا بودن درجه بی قاعدگی دانه ها را نشان می دهد. نسبت پایین فاکتور پیچاپیچی به ضریب سیمان شدگی ممکن است به علت، تخلخل بالاتر، تراوایی بالاتر و وجود دانه های کروی و ریز شکست ها باشد. در شکل ۷ ارتباط ضریب سیمان شدگی حاصل از رابطه آرچی با فشار همه جانبه برای سنگ مخزن مورد مطالعه به نمایش گذاشته شده است و شکل ۸ همین نوع ارتباط را در حالت بهترین برازش نشان می دهد. منحنی های حاصل در شکل ۷ نشان می دهد که تاثیر افزایش فشار بر روی  $m$ ، در واحدهای جریانی با FZI پایین تر بیشتر از واحدهای با FZI بالاتر می باشد. منحنی های حاصل از شکل ۸ که بهترین برازش در این ارتباط را نشان می دهد نه تنها نتایج حاصله از شکل ۷ را نیز تایید می نماید بلکه نشان می دهد که افزایش فشار در واحدهای جریانی با FZI بالاتر، باعث کاهش ضریب سیمان شدگی شده است. در شکل ۹ به وضوح می توان دید که میزان بازه تغییرات ضریب سیمان شدگی (اختلاف مقدار ضریب سیمان شدگی در فشار ۸۰۰ و ۵۰۰۰ پام) نسبت به شاخص منطقه ای جریان، در هر واحد جریانی یکسان نبوده و از واحد ۱ به سمت واحد ۴ در حال کاهش است. به عبارت دیگر با در نظر گرفتن شکل ۱۰ می توان گفت که با افزایش شاخص منطقه ای جریان، تغییرات ضریب سیمان شدگی حاصل از فشارهای مختلف کاهش یافته است. در شکل ۱۱ نحوه تغییرات ضریب سیمان شدگی نسبت به ضریب سیمان شدگی حاصل از فشار ۸۰۰ پام نشان داده شده است. با تلفیق شکل های ۹ و ۱۰ و ۱۱، می توان عنوان نمود که با افزایش شاخص منطقه ای جریان که همراه با کاهش ضریب سیمان شدگی است به تدریج از تاثیر میزان فشار بر ضریب سیمان شدگی کاسته شده است.

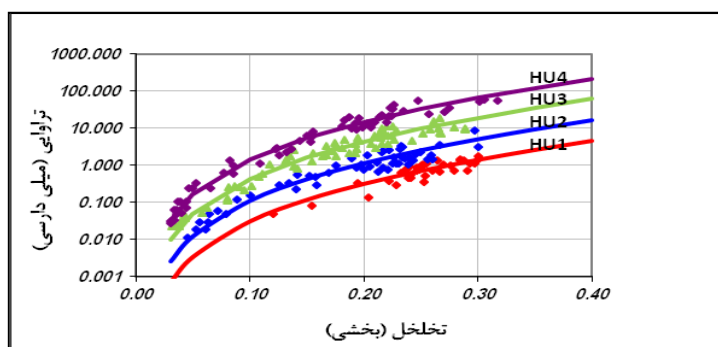
در توجیه نتیجه فوق می توان گفت که ضریب سیمان شدگی عاملی از شکل هندسه حفرات است به نحوی که مقدار آن در تخلخل های غیر مرتبط بیشتر و در تخلخل های مرتبط کمتر می باشد. احتمالاً تاثیر فشار بر بسته شدن فضا های غیر مرتبط در نمونه هایی که FZI پایین دارند نسبت به نمونه هایی که FZI بالاتری دارند بیشتر بوده و در نتیجه افزایش ضریب سیمان شدگی را به دنبال داشته است.



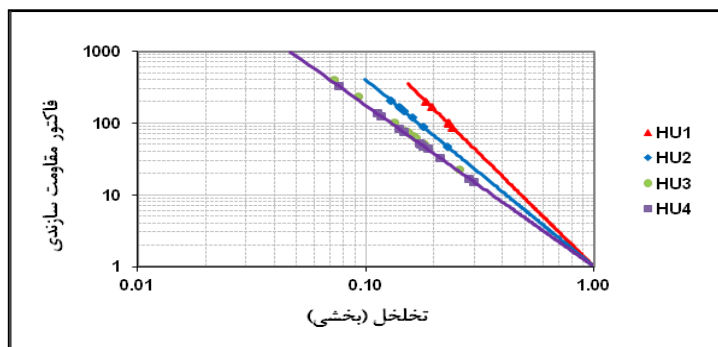
شکل ۱- تغییرات اشباع شدگی بر حسب تغییرات تخلخل و ضریب سیمان شدگی (تندر ثابتی و همکاران ۱۳۹۱) [۱]



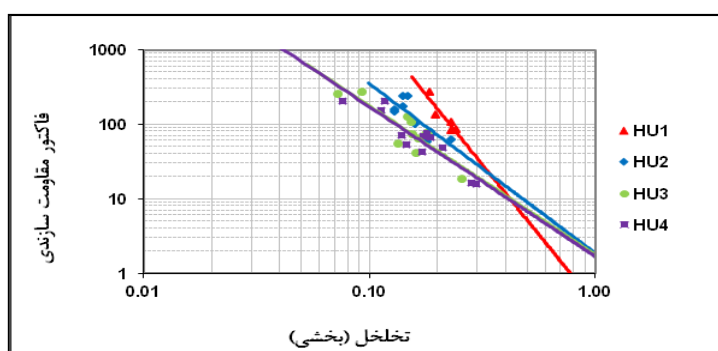
شکل ۲- شاخص کیفیت مخزنی بر حسب تخلخل نرمال شده



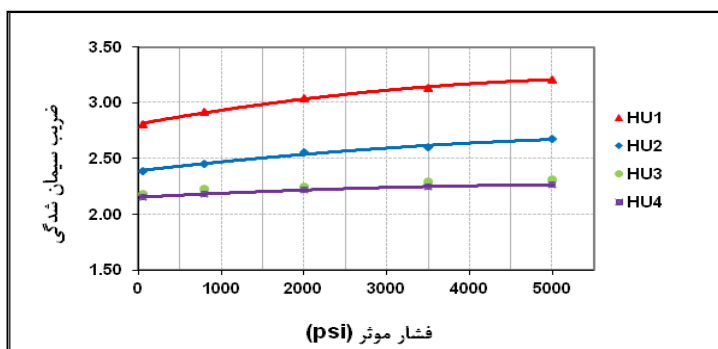
شکل ۳- ارتباط بین تخلخل و تراوایی در واحدهای جریان هیدرولیکی



شکل ۴- ارتباط فاکتور مقاومت سازندی و تخلخل در فشار ۳۵۰۰ پام (حاصل از رابطه آرچی) برای واحدهای جریان هیدرولیکی

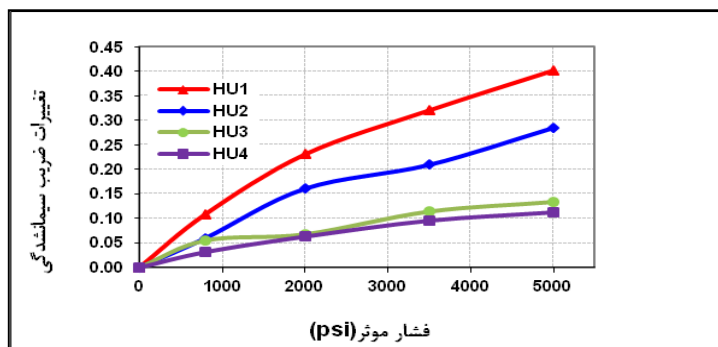


شکل ۵- ارتباط فاکتور مقاومت سازندی و تخلخل در فشار ۳۵۰۰ پام (حاصل از بهترین برازش) برای واحدهای جریان هیدرولیکی

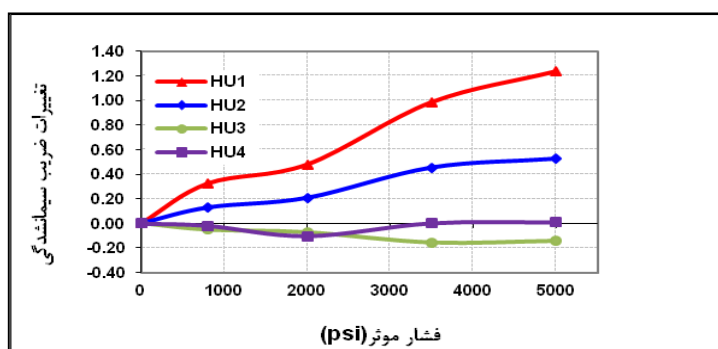


شکل ۶- ارتباط ضریب سیمان شدگی و فشار موثر برای واحدهای جریان هیدرولیکی

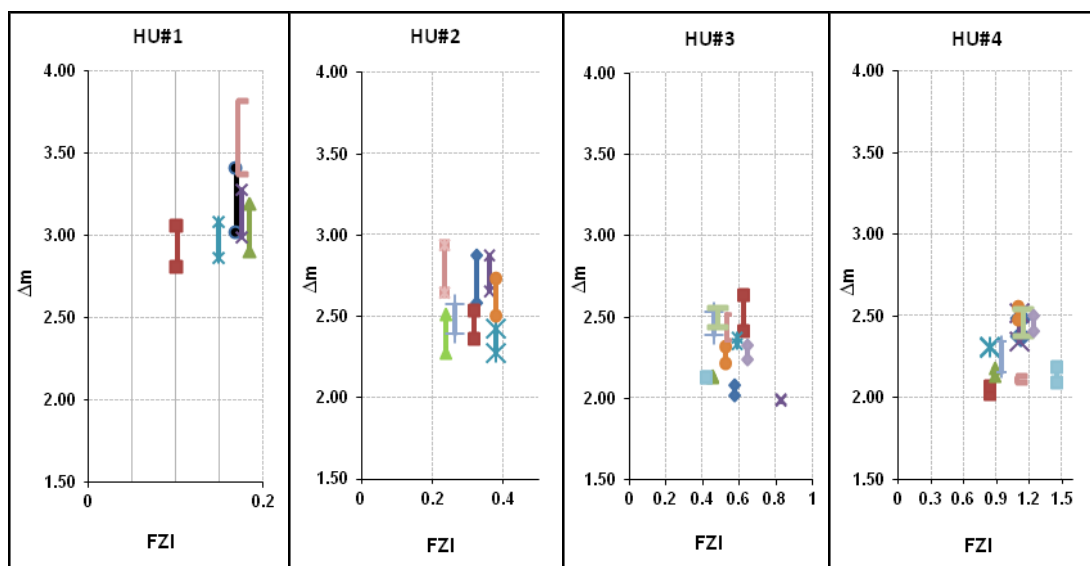




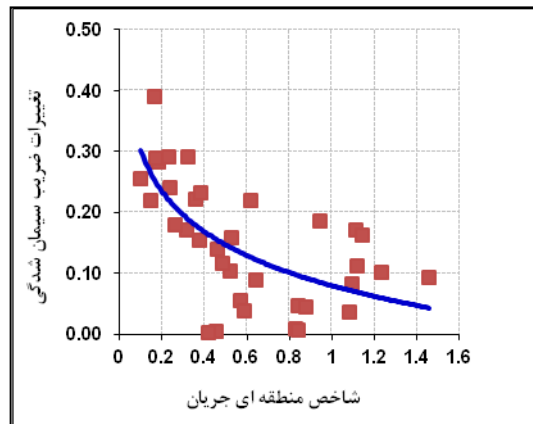
شکل ۷- ارتباط تغییرات ضریب سیمان شدگی (حاصل از رابطه آرچی)، و فشار موثر برای واحدهای جریان هیدرولیکی



شکل ۸- ارتباط تغییرات ضریب سیمان شدگی (حاصل از بهترین برازش) و فشار موثر، برای واحدهای جریان هیدرولیکی



شکل ۹- ارتباط تغییرات ضریب سیمان شدگی و شاخص منطقه ای جریان برای واحدهای جریان هیدرولیکی



شکل ۱۰- ارتباط تغییرات ضریب سیمان شدگی و شاخص منطقه ای جریان برای تمامی نمونه ها

جدول ۱- معادلات تجربی حاصل از ارتباط فاکتور مقاومت ویژه و تخلخل در هر واحد جریان هیدرولیکی

واحد جریانی	رابطه m و P	R <sup>2</sup>
۱	$m = -1 * 10^{-8} P^2 + 0.0001 P + 2/811$	۰/۹۹
۲	$m = -6 * 10^{-9} P^2 + 9 * 10^{-5} P + 2/391$	۰/۹۹
۳	$m = -3 * 10^{-9} P^2 + 4 * 10^{-5} P + 2/185$	۰/۹۶
۴	$m = -3 * 10^{-9} P^2 + 4 * 10^{-5} P + 2/153$	۰/۹۹

جدول ۲- معادلات تجربی حاصل از ارتباط ضریب سیمان شدگی و فشار موثر در هر واحد جریان هیدرولیکی

واحد جریانی	حاصل از بهترین برازش	حاصل از معادله آرچی	m بهترین برازش	a بهترین برازش	R <sup>2</sup>
۱	$FF = 0.386 \phi^{-3/244}$	$FF = \phi^{-3/131}$	۳/۷۴۶	۰/۳۸۶	۰/۸۵
۲	$FF = 1/872 \phi^{-2/270}$	$FF = \phi^{-2/602}$	۲/۶۰۲	۱/۸۷۲	۰/۶۲
۳	$FF = 1/784 \phi^{-1/999}$	$FF = \phi^{-2/292}$	۲/۲۹۲	۱/۷۸۴	۰/۷۶
۴	$FF = 1/690 \phi^{-2/101}$	$FF = \phi^{-2/249}$	۲/۲۴۹	۱/۶۹	۰/۸۶

## ۴. نتیجه گیری

- ۱- با بکارگیری روش واحدهای جریان هیدرولیکی به منظور طبقه بندی نمونه های مخزنی ۴ واحد جریانی تشخیص داده شد. مقادیر شاخص منطقه ای جریان برای واحدهای ۱ تا ۴ به ترتیب برابر ۰/۱۶، ۰/۳، ۰/۵۸ و ۱/۰۹ تعیین شد.
- ۲- در هر واحد جریانی نحوه تغییرات ضریب سیمان شدگی نسبت به فشارهای موثر مختلف، به صورت نمودار و روابط تجربی ارائه گردید. محدوده ضریب همبستگی R2 در این نوع ارتباط بین ۰/۹۶ تا ۰/۹۹ بوده است. نمودارها نشان می دهد که بیشترین مقدار ضریب سیمان شدگی متعلق به واحد ۱ و کمترین آن متعلق به واحد جریانی ۴ می باشد (شکل ۶).
- ۳- مطالعات در نمودارهای تغییرات ضریب سیمان شدگی و فشار موثر در واحدهای جریان هیدرولیکی نشان می دهد که روند شیب تغییرات ضریب سیمان شدگی از فشار ۲۰۰۰ پام تغییر کرده است (شکل ۶ و ۷) که علت آن را می توان در چند گانه بودن تخلخل نمونه ها جستجو کرد.
- ۴- مطالعه ارتباط تغییرات ضریب سیمان شدگی حاصل از فشارهای مختلف (اختلاف ضریب سیمان شدگی در فشارهای ۵۰۰۰ و ۸۰۰ پام) و شاخص منطقه ای جریان نشان می دهد که بازه تغییرات ضریب سیمان شدگی در واحدهای جریانی مختلف یکسان نبوده و از واحد جریانی ۱ به سمت واحد جریانی ۴ به تدریج کاهش یافته است (شکل ۹). به عبارت دیگر با اندکی افت در فشار مخزن تغییرات زیادی برای مقدار ضریب سیمان شدگی در واحدهای ۱ و ۲ رخ خواهد داد در صورتی که این تغییرات در واحدهای ۳ و ۴ بسیار کمتر خواهد بود.

## ۵. پیشنهادات

هرچند که در صورت نداشتن اطلاعات کافی ولی به شرط داشتن واحدهای جریانی یکسان (مشابه FZI) در یک میدان می توان از نتایج یک چاه برای چاه دیگری در همان میدان استفاده نمود لیکن چنانچه تعداد نمونه های مورد مطالعه افزایش و مطالعه فوق بر روی مخازن بیشتری از یک میدان انجام گیرد آگاهی ما از نحوه تغییرات ضریب سیمان شدگی نسبت به فشار در واحدهای جریانی کامل تر و نتیجه شبیه سازی مدل دینامیکی نیز واقعی تر خواهد بود.

## ۶. علائم اختصاری:

RQI: شاخص کیفیت مخزنی، FZI: شاخص منطقه ای جریان، z: تخلخل نرمال شده، F: فاکتور مقاومت سازندی: تخلخل، a: ضریب پیچاپیچی، m: ضریب سیمان شدگی.

## تشکر و قدردانی

از آقایان مهندس سلیمانی و مهندس سلطانیان بخاطر داوری مقاله سپاسگزاری می گردد.

## ۶. منابع

- [۱]- ثابتی، ت.، مسیحی، م.، موحد، ب.، و زرگر، ق.، ۱۳۹۱، تخمین ضریب سیمان شدگی از نمودارهای تصویرگر الکتریکی در مخازن کربناته سی و یکمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- [۲]- حسینی نیا، ط.، رضایی، م. ر.، ۱۳۸۱، بررسی حساسیت عوامل مختلف پتروفیزیکی بر محاسبه اشباع شدگی آب در مخازن کربناته مجله علوم دانشگاه تهران، جلد بیست و هشتم، شماره ۱، صفحات ۹۱-۶۹.
- [۳]- کاظم زاده، ع.ا.، نبی بید هندی، م.، رضایی، م. ر.، ۱۳۸۵، مطالعه مقاومت ویژه سازندی با استفاده از واحدهای جریان هیدرولیکی در مخازن کربناته ۱۳۸۷، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد سی و چهارم، شماره ۱، صفحات ۲۱-۱۳.
- [4]- Abbaszadeh M., H. Fujii, F. Fujimoto, 1996, Permeability Prediction by Hydraulic Flow Units - Theory and Applications, SPE Formation Evaluation Journal, p. 263-271.
- [5]- Aguilera R., 1976, Analysis of naturally fractured reservoirs from conventional well, Journal of Petroleum Technology, v. XXVIII, no. 7, p. 764 772.
- [6]- Amaefule J.O., M. Altunbay, D. Tiab, D.G. Kersey, D.K. Kedan, 1993, Enhanced reservoir description, Using core and log data to identify hydraulic (flow) unites and predict permeability in uncored intervals / wells, SPE 26436, Presented at 68th Ann. Tech. Conf, and Exhibit. Houston, Tx.
- [7]- Arps j.j., 1953, The effect of temperature on the density and electrical resistivity of sodium chloride solutions. Journal Petroleum Technology, v.195, p.17-20.
- [8]- Asadollahi, M., A.M. Bagheri, M. Haghi and M. Namani, 2008, Investigation of cementation exponent in Iranian carbonate reservoir, The 14 formation symposium of Japan. APWLA
- [9]- Fahad, A., Al-Agmi, S., Holditch A., 2000, Permeability estimation using hydraulic flow units in a Central Arabia Reservoir, SPE. 63254: 787-799.
- [10]- Fatt I., 1957, Effect of Overburden and Reservoir Pressure On Electrical Logging Formation Exponent, AAPG Bull., 41, 2456. and Wyble, D.O., 1958, Effect of Applied Pressure on Conductivity, Porosity and Permeability, Trans., AIME (1958), v. 213, p.386-388.
- [11]- Lucia F.J., 1983, Petrophysical parameters estimated from visual description of carbonate rocks a field classification of carbonate pore space, JPT, v. 35, 629p.
- [12]- Salem H.S. and G.V. Chilingarian, 1999, The cementation exponent of Archie's equation for shaly sandstone reservoirs, Journal of Petroleum Science and Engineering, v. 23, p. 83-93.
- [13]- Schlumberger, 1972, Inc, Log interpretation-principle, schlumberger Educational services, Houston.
- [14]- Svirsky D., A. Ryazanov, M. Pankov, A. Posysoev, 2004, Hydraulic flow units resolve reservoir description challenges in a Siberian oil field, SPE. 87056, p. 1-15.
- [15]- Tiab D. and E.C. Donalson, 1996, Petrophysics : Theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties, Gulf publishing company, Houston, Texas.