

## بررسی حساسیت عوامل مختلف پتروفیزیکی بر محاسبه اشباع شدگی آب در مخازن هیدروکربوری

طاهره حسینی نیا و محمدرضا رضایی\*

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران

(دریافت: ۸۰/۱۲/۱۸؛ پذیرش: ۸۱/۴/۸)

### چکیده

تخمین صحیح اشباع شدگی آب در مخازن هیدروکربوری از اهمیت زیادی برخوردار است. محاسبه اشباع شدگی آب با لگهای ژئوفیزیکی و با استفاده از فرمول‌های مناسب صورت می‌گیرد. در تمامی فرمول‌های اشباع شدگی آب عوامل مختلفی به صورت مشترک وجود دارند که خطا در به کارگیری صحیح آن‌ها سبب خطا در محاسبه اشباع شدگی آب می‌شود. این مطالعه به منظور بررسی تأثیر خطا در پارامترهای معادلات بر مقدار اشباع شدگی آب محاسبه شده انجام شده است. کلیه محاسبات مربوطه بوسیله نرم افزارهای اکسل (Excel) و ممتیکا (Mathematica) انجام پذیرفته است.

برای نیل به این هدف، ابتدا ۱۴ فرمول متداول اشباع شدگی آب انتخاب شد. سپس عوامل موجود در آن و محدوده تغییرات مقدار هر عامل تعیین گردید. در مرحله بعد مقدار تغییر هر عامل به میزان یک در صد (باتوجه به محدوده هر عامل) محاسبه شد. با داشتن مقدار متغیر، ستون متغیر (مقادیر متوالی هر عامل در محدوده تغییرات آن) تشکیل گردید. سپس با استفاده از ستون متغیر، مقادیر اشباع شدگی آب (ستون  $S_w$ ) محاسبه شد. آنگاه مقادیر متوالی  $S_w$  از یکدیگر کم شد و قدر مطلق اختلاف آنها بدست آمد (ستون تغییرات  $S_w$ ). سپس با مقادیر هر کدام از عوامل و تغییرات اشباع شدگی آب مربوط به آن (با استفاده از ستون متغیر و ستون تغییرات  $S_w$ )، نمودار خطا ترسیم گردید. در خاتمه نیز میانگین حداکثر و حداقل مقادیر خطاها (تغییرات) در تمام معادلات محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفت. این مقایسه نشان داد که عامل تخلخل در بین عوامل اصلی و فاکتور سیمانی شدن در بین ضرایب آرچی، بیشترین خطا را می‌تواند در محاسبه اشباع شدگی آب ایجاد کنند.

**واژه‌های کلیدی:** اشباع شدگی آب، ضرایب آرچی، حساسیت به خطا، مخازن هیدروکربوری،

پتروفیزیک

## ۱- مقدمه

یکی از پارامترهای بسیار مهم مخزنی که باید با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی به دقت محاسبه شود، میزان اشباع‌شدگی مخزن از آب است. هر گونه اشتباه در محاسبه این پارامتر می‌تواند منجر به از دست دادن لایه‌های تولیدکننده نفت شود. اگر در محاسبه اشباع‌شدگی آب خطای قابل توجهی رخ دهد، ممکن است تخمین زیاد (overestimation) اشباع‌شدگی در مورد مخزنی با اشباع‌شدگی آب کم سبب شود تا آن مخزن بلا استفاده رها شود. عکس این پدیده نیز ممکن است به وقوع بپیوندد بدین صورت که مخزنی دارای اشباع‌شدگی آب زیاد باشد و به دلیل خطای محاسبه، مقدار آن کمتر تخمین زده شود (underestimation) و در نتیجه هزینه‌های هنگفت صرف مخزنی شود که تولیدکننده نیست.

در این مطالعه سعی شده است تا با تغییر مقادیر فاکتورهای مختلفی که در فرمولهای اشباع‌شدگی آب وجود دارند، تغییرات مقدار اشباع‌شدگی آب محاسبه گردد. به این ترتیب مهم ترین عوامل مؤثر در محاسبه اشباع‌شدگی آب، مشخص شده‌اند. این امر سبب می‌گردد که نهایتاً در بکار بردن آن عوامل دقت بیشتری مبذول شود.

## ۲- روش مطالعه

برای انجام این مطالعه، فرمول‌های موجود برای محاسبه اشباع‌شدگی آب به دو دسته تقسیم گردیده است:

دسته اول شامل فرمولهایی است که اشباع‌شدگی آب ( $S_w$ ) در آنها دارای توان یکسان است. در این فرمولها، اشباع‌شدگی آب برحمتی قابل استخراج و محاسبه است. نظیر فرمول Poupon & Leveaux (1971):

$$\sqrt{C_t} = \sqrt{\frac{C_w}{F} S_w^{n/2} + V_{sh}^{1-V_{sh}/2} \sqrt{C_{sh}} S_w^{n/2}}$$

دسته دوم فرمولهایی هستند که  $S_w$  در آنها دارای توانهای مختلف است. در این فرمولها، استخراج و محاسبه اشباع‌شدگی آب به راحتی امکان پذیر نیست، نظیر فرمول Waxman & Smits (1968):

$$C_t = \frac{C_w}{F^*} S_w^n + \frac{BQ_v}{F^*} S_w^{n-1}$$

در معادلات دسته اول،  $S_w$  از معادله استخراج شده و برای محاسبات بعدی از نرم افزار اکسل (Excel) استفاده شده است. در معادلات دسته دوم از نرم افزار متمتیکا (Mathematica)

استفاده شده است که می‌توان کل فرمول را در آن قرار داد. تفاوت این دو روش در این است که در بررسی‌هایی انجام شده توسط نرم افزار متمتیکا، گروه بندی سازندها (بعداً توضیح داده می‌شود) انجام نشده است، چون این کار در نرم افزار مذکور بسیار مشکل و عملاً غیرممکن می‌باشد. علاوه بر آن در مورد n (توان اشباع)، خطای ده در صد محاسبه گردید، چون خطای یک در صد آن توسط نرم افزار مذکور قابل محاسبه نمی‌باشد.

برای تعیین خطای عوامل، ابتدا ستون متغیر با توجه به محدوده عددی عامل تشکیل شد. نظریه اینکه محدوده تغییرات اعداد وسیع است، متداول‌ترین مقادیر عامل در نظر گرفته شد. عدد ابتدای محدوده، a و عدد انتهای محدوده، b نامیده شد. سپس تفاضل a و b و c منظور گردید و معادل عدد صد مفروض شد. سپس با یک تناسب مقدار متغیر یک‌درصد محاسبه گردید. این مقدار x در نظر گرفته شد. به عنوان مثال فاکتور سیمانی شدن (m) را در نظر می‌گیریم که محدوده عددی آن بین ۱/۲ تا ۲/۸ است. برای بدست آوردن x روش زیر اعمال شد:

$$a-b=c$$

$$1/8 - 1/2 = 1/6 \rightarrow x = 0.16$$

سپس x به مقدار a (عدد ابتدای محدوده)، اضافه شد و  $a_1$  بدست آمد. به  $a_1$  نیز x اضافه شد و  $a_2$  بدست آمد. با ادامه این روش نهایتاً b (عدد انتهای محدوده) بدست آمد. البته برای اینکه بتوان اختلاف اشباع‌شدگی آب به ازاء مقدار آخر محدوده را بدست آورد، لازم است که این کار تا بعد از عدد انتهای محدوده نیز ادامه یابد. به این ترتیب ستون متغیر تشکیل شد. به ازاء تمام مقادیر این ستون که ۱۰۲ عدد هستند، اشباع‌شدگی آب در ستون دیگری بدست آمد (ستون  $S_w$ ) و در ستون مجاور آن، اختلاف مقادیر اشباع‌شدگی آب محاسبه شد. تغییر در  $S_w$  (variation in  $S_w$ ) در ستون تغییرات  $S_w$  قرار می‌گیرد. از این تغییر در متن به عنوان خطا (error) نیز یاد شده است چون در واقع خطایی است که در محاسبه  $S_w$  بوجود آمده است. مثلاً اگر به ازاء  $a_1$  مقدار اشباع‌شدگی آب  $S_{w1}$  بدست آید و به ازاء  $a_2$  مقدار اشباع‌شدگی آب معادل  $S_{w2}$  باشد، قدر مطلق اختلاف  $S_{w1} - S_{w2}$ ، مقدار تغییر اشباع‌شدگی آب به ازاء یک در صد تغییر در عامل متغیر است. به ترتیب یاد شده قدر مطلق اختلاف تمام مقادیر  $S_w$  متوالیاً اندازه‌گیری شد. اگر این اختلاف، خطا نامیده شود می‌توان گفت با یک در صد خطا در بکاربردن آن عامل، چند در صد خطا در محاسبه اشباع‌شدگی آب بوجود آمده است.

در مرحله بعد، برای هر ستون متغیر و اختلاف‌های  $S_w$ ، نمودارهای خطا ترسیم گردید، بدین صورت که در محور افقی مقدار متغیر و در محور عمودی مقادیر اختلاف‌های  $S_w$  قرار گرفت. این نمودارها اصطلاحاً "نمودار خطا نامیده شد.

بررسی خطاهای عوامل را می‌توان به دو دسته بررسی خطاهای عوامل اصلی و بررسی خطاهای ضرایب آرچی تقسیم نمود:

## ۲-۱- بررسی خطاهای عوامل اصلی

عوامل اصلی عبارتند از:  $C_t$  (قابلیت هدایت واقعی سازند)،  $C_w$  (قابلیت هدایت آب)،  $\phi$  (تخلخل)،  $F$  (فاکتور سازندی)،  $C_{sh}$  (قابلیت هدایت شیل)،  $V_{sh}$  (حجم شیل)،  $R_t$  (مقاومت واقعی سازند)،  $R_w$  (مقاومت آب)،  $R_{sh}$  (مقاومت شیل)، CEC (ظرفیت تعویض کاتیون)،  $Q_v$  (ظرفیت تعویض کاتیون در حجم) و  $B$  (قابلیت هدایت یونهای خنثی کننده بار). برای بررسی خطاهای عوامل اصلی، ابتدا ستون متغیر تشکیل و بقیه عوامل ثابت فرض گردید و برای آن، اشباع‌شدگی آب و اختلاف آنها با یکدیگر بدست آمد. از آنجاییکه سه رابطه معمول آرچی، هامبل و تیکسیس برای فاکتور سازندی وجود دارند که دارای مقادیر مختلف  $a$  و  $m$  هستند، ستون متغیر در مورد هر سه رابطه استفاده شده است. برای هر رابطه نمودار خطا نیز ترسیم گردید.

## ۲-۲- بررسی خطاهای ضرایب آرچی:

برای بررسی خطاهای ضرایب آرچی ( $a, m$  و  $n$ )، ابتدا ستون متغیر تشکیل شد، بقیه عوامل ثابت فرض گردید و برای آن، اشباع‌شدگی آب و اختلاف آنها با یکدیگر بدست آمد. در این تحقیق، سازندها نیز گروه‌بندی شدند. این کار بدان سبب انجام شد که شرایط خطای یک در صد ضرایب آرچی مشخص گردد. از آنجاییکه عوامل اصلی در یک مخزن مهم هستند در مورد آنها می‌توان گروه‌بندی انجام داد، لیکن این طبقه‌بندی در مورد ضرایب آرچی الزامی نبوده و به همین دلیل در بررسی خطاهای عوامل اصلی، سازندها بر حسب ضرایب آرچی طبقه‌بندی نشده‌اند.

جهت گروه‌بندی، سازندها بر اساس هر یک از عوامل اصلی به شش گروه تقسیم شدند. این تقسیم بندی‌ها بر اساس قابلیت هدایت الکتریکی واقعی سازند، قابلیت هدایت الکتریکی آب، تخلخل، فاکتور سازندی، قابلیت هدایت الکتریکی شیل و حجم شیل صورت گرفت. برای مثال، در تقسیم بندی‌ها بر اساس قابلیت هدایت الکتریکی واقعی، سازندها در شش گروه سازندهای

با قابلیت هدایت واقعی خیلی زیاد (۱۰۰-۱۰۰۰ mmho/m)، سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی واقعی زیاد (۲۰-۱۰۰ mmho/m)، سازندهای با قابلیت هدایت واقعی متوسط (۲۰-۱۰ mmho/m)، سازندهای با قابلیت هدایت واقعی کم (۲-۱۰ mmho/m)، سازندهای با قابلیت هدایت واقعی خیلی کم (۲-۱ mmho/m)، سازندهای با قابلیت هدایت واقعی بی‌نهایت کم ( $1 \text{ mmho/m} <$ ) تقسیم‌بندی شدند.

### ۳- معادلات مطالعه شده :

در این مطالعه، معادلات زیر مورد بررسی قرار گرفته اند:

$$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^n \quad (\text{Archie, 1942})$$

$$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^n + V_{sh}^2 C_{sh} \quad (\text{Hossin, 1960})$$

$$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^n + V_{sh} C_{sh} \quad (\text{Simandoux, 1963})$$

$$\sqrt{C_t} = \sqrt{\frac{C_w}{F} S_w^{n/2} + V_{sh} \sqrt{C_{sh}}} \quad (\text{Doll, unpublished})$$

$$\sqrt{C_t} = \sqrt{\frac{C_w}{F} S_w^{n/2} + V_{sh}^{1-V_{sh}/2} \sqrt{C_{sh} S_w^{n/2}}} \quad (\text{Poupon \& Leveaux, 1971})$$

$$C_t = \frac{(1 - V_{sh}) C_w S_w^2}{F} + V_{sh} C_{sh} \quad (\text{Poupon et al., 1954})$$

$$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^2 + 2 \sqrt{\frac{C_w V_{sh} C_{sh}}{F} S_w^2} + V_{sh}^2 C_{sh} S_w^2 \quad (\text{Poupon \& Leveaux, 1971})$$

$$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^2 + 2 \sqrt{\frac{C_w V_{sh}^{2-2V_{sh}} C_{sh}}{F} S_w^2} + V_{sh}^{2-2V_{sh}} C_{sh} S_w^2 \quad (\text{Woodhouse, 1976})$$

$$\frac{1}{R_t^{1/2}} = \left[ \frac{V_{sh}^{(1-V_{sh})/2}}{R_{sh}^{1/2}} + \frac{\phi^{m/2}}{(aR_w)^{1/2}} \right] S_w^{n/2} \quad (\text{Dewan, 1983})$$

$$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^n + V_{sh} C_{sh} S_w \quad (\text{Bardon \& Pied, 1969})$$

$$C_t = \frac{C_w}{F^*} S_w^n + \frac{BQ_v}{F^*} S_w^{n-1} \quad (\text{Waxman \& Smits, 1968})$$

$$C_t = \frac{C_w}{F(1-V_{sh})} S_w^2 + V_{sh} C_{sh} S_w \quad (\text{Schlumberger, 1972})$$

$$C_t = \frac{C_w}{F} S_w^2 + \left\{ \frac{C_{sh}}{F_{sh}} - C_w \right\} \frac{V_{sh} \phi_{sh} S_w}{\phi} \quad (\text{Juhasz, 1981})$$

$$C_t = \frac{(1-V_{sh})C_w}{F} S_w^2 + \frac{(1-V_{sh})}{F} BQ_v S_w + V_{sh} C_{sh} \quad (\text{Patchett \& Herrick, 1983})$$

۴- تفسیر خطاهای اجزاء معادلات

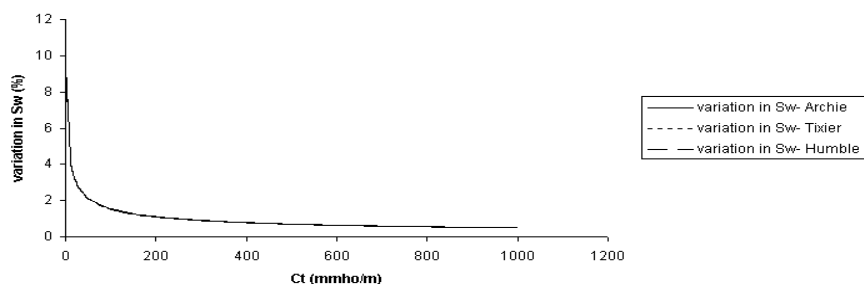
در این بخش مقادیر اشباع‌شدگی آب به ازاء مقادیر مختلف اجزاء فرمولها و تغییرات آنها محاسبه گردیده است. در این مقاله، به عنوان نمونه صرفاً یک فرمول مورد بررسی قرار می‌گیرد.

#### ۴-۱- بررسی معادله Simandoux (1963)

این معادله به صورت  $C_t = \frac{C_w}{F} S_w^n + V_{sh} C_{sh}$  است. بررسی‌هایی که در معادله مذکور صورت گرفته است عبارتند از:

#### ۴-۱-۱- قابلیت هدایت الکتریکی واقعی سازند ( $C_t$ )

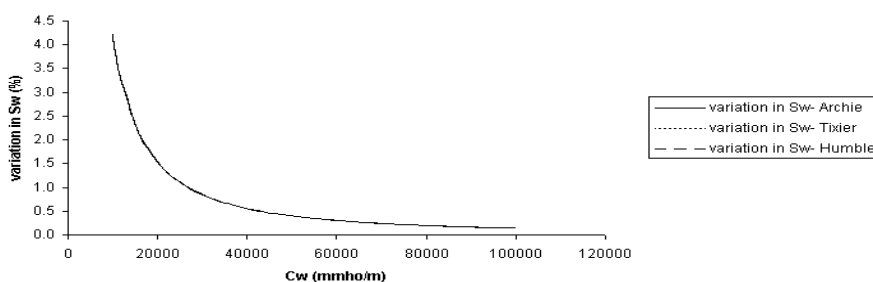
در اینجا خطای بوجود آمده در  $S_w$  بواسطه خطای  $C_t$  بررسی می‌شود. این موضوع با استفاده از روابط آرچی، تیکسیر و هامبل (برای فاکتور سازندی) مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش  $C_t$  مقدار خطا در محاسبه  $S_w$  کاهش می‌یابد. بنابراین هنگامی که  $C_t$  برابر با  $mmho/m$  باشد، مقدار خطا در محاسبه  $S_w$  ۹/۹۹ درصد است و این بیشترین مقدار خطایی است که در این بررسی موجود است. کمترین خطا هنگامی است که  $C_t$  برابر  $1000 mmho/m$  باشد که میزان خطای آن ۰/۵۰ درصد است. این مقادیر مربوط به رابطه آرچی است. البته مقادیر خطا در روابط آرچی، تیکسیر و هامبل یکسان هستند (شکل ۱).



شکل ۱- نمودارهای خطای  $C_t$  (مربوط به روابط فاکتور سازندی). نمودارها بر یکدیگر منطبق هستند.

#### ۴-۱-۲- قابلیت هدایت الکتریکی آب ( $C_w$ )

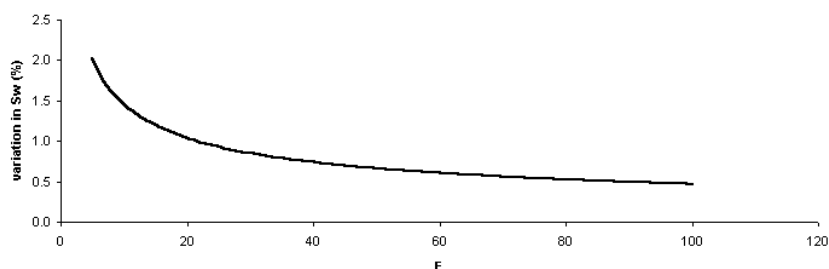
در اینجا خطای  $S_w$  بواسطه خطا در بکاربردن  $C_w$  مطالعه می‌شود. این مطالعه با استفاده از روابط آرچی، تیکسیر و هامبل (برای فاکتور سازندی) بررسی می‌شود. بیشترین مقدار خطا، ۴/۲۱ درصد، در این بررسی مربوط به حالتی است که  $C_w$  برابر ۱۰۰۰۰ mmho/m باشد. با افزایش  $C_w$  مقدار خطای ایجاد شده در  $S_w$  کم شده و زمانی که  $C_w$  مساوی ۱۰۰۰۰۰ mmho/m در نظر گرفته شود، مقدار خطای ایجاد شده در  $S_w$  به ۰/۱۴ درصد می‌رسد که کمترین مقدار خطا در این بررسی است. اعدادی که با استفاده از روابط آرچی، تیکسیر و هامبل بدست می‌آیند، تقریباً یکسان هستند. همانند بقیه موارد، اعدادی که ذکر می‌شوند مربوط به رابطه آرچی هستند (شکل ۲).



شکل ۲- نمودارهای خطای  $C_w$  (مربوط به روابط فاکتور سازندی) و انطباق آنها.

#### ۴-۱-۳- فاکتور سازندی (F)

در این بررسی خطای  $S_w$  بواسطه خطا در بکاربردن F مطالعه می‌شود. در اینجا نیز اگر F دارای مقادیر کمتری باشد، اشتباه در آن باعث ایجاد خطای بیشتر در محاسبه  $S_w$  می‌گردد و با افزایش F از مقدار خطا کاسته می‌شود. بنابراین بیشترین مقدار خطا هنگامی رخ می‌دهد که F در کمترین حد خود باشد. در این بررسی که کمترین مقدار F، پنج در نظر گرفته شده است، مقدار خطا در محاسبه  $S_w$ ، ۲/۰۲ در صد می‌شود. کمترین خطا هنگامی رخ می‌دهد که F برابر ۱۰۰ باشد که مقدار خطای ایجاد شده در این حالت به ۰/۴۷ در صد می‌رسد (شکل ۳). لازم به ذکر است که چون F در فرمول خود دارای a و m می‌باشد، با تغییر F عملاً a و m نیز تغییر می‌کنند، بنابراین نیازی به در نظر گرفتن سه رابطه نمی‌باشد.

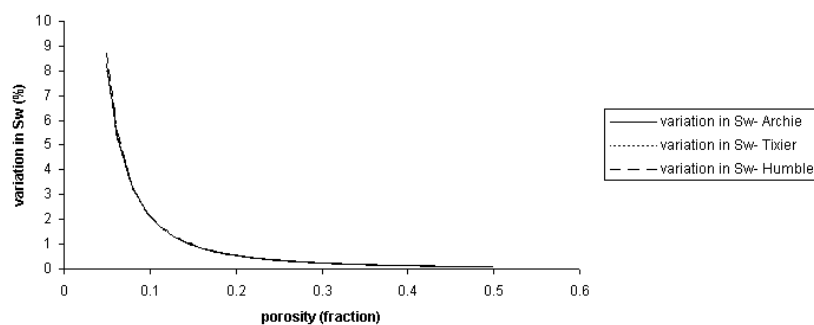


شکل ۳- نمودار خطای فاکتور سازندی.

#### ۴-۱-۴- تخلخل ( $\phi$ )

در این بررسی خطای  $S_w$  در اثر خطای  $\phi$  مطالعه می‌شود. این مطالعه با استفاده از روابط آرچی، تیکسیر و هامبل (برای فاکتور سازندی) بررسی می‌گردد. بیشترین خطای ایجاد شده در این بررسی ۸/۲۶ در صد است که مربوط به وجود یک در صد خطا در تخلخل برابر ۰/۰۵ (۵ در صد) می‌باشد. این مقدار خطا با افزایش تخلخل، کاهش می‌یابد. کمترین خطا به ۰/۰۹ در صد می‌رسد که در تخلخل ۰/۵ یا ۵۰ در صد ایجاد می‌شود. در اینجا نیز مانند سایر موارد، مقادیری که با استفاده از a و m هایی که از روابط آرچی، تیکسیر و هامبل بدست می‌آیند، تقریباً یکسان هستند (شکل ۴).

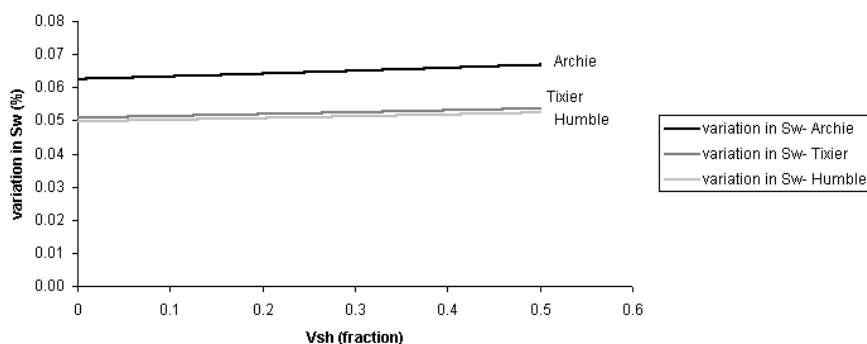




شکل ۴- نمودارهای خطای تخلخل (مربوط به روابط فاکتور سازندی) و انطباق آنها.

#### ۴-۱-۵- حجم شیل ( $V_{sh}$ )

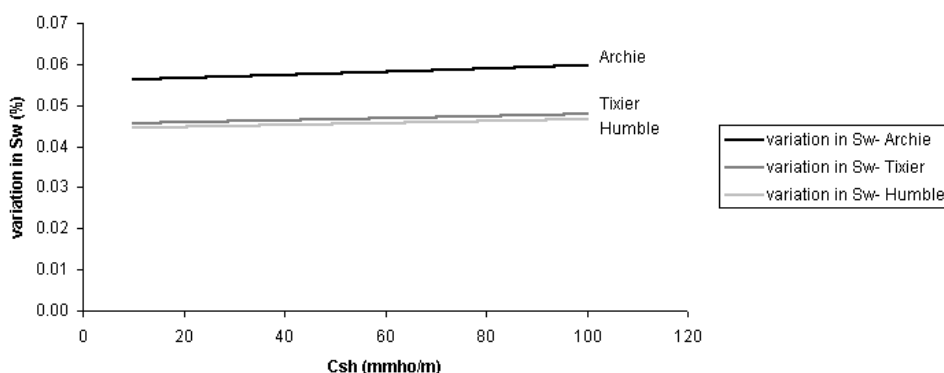
این بررسی خطای  $S_w$  را در اثر خطای  $V_{sh}$  با استفاده از روابط آرچی، تیکسیر و هامبل (برای فاکتور سازندی) مورد مطالعه قرار می‌دهد. در این مطالعه مشخص شد که با تغییر  $V_{sh}$ ، مقدار خطا ارتباط چندانی با حجم شیل ندارد و نمودار آن تقریباً به موازات محور x است. این مسئله در سه رابطه آرچی، تیکسیر و هامبل صدق می‌کند. خطاهای بدست آمده در روابط تیکسیر و هامبل به هم نزدیک ولی در رابطه آرچی از این دو بیشتراند. بنابراین می‌توان گفت که بیشترین مقدار خطا، ۰/۰۷ در صد، مربوط به هنگامی است که از رابطه آرچی برای فاکتور سازندی استفاده شده و حجم شیل ۰/۵ یا ۵۰ در صد در نظر گرفته شود. در استفاده از رابطه تیکسیر و هامبل وقتی مقدار حجم شیل برابر صفر باشد، ۰/۰۵ در صد خطا در محاسبه  $S_w$  ایجاد می‌گردد که این مقدار، حد اقل خطا در این بررسی است (شکل ۵).



شکل ۵- نمودارهای خطای حجم شیل (مربوط به روابط فاکتور سازندی).

#### ۴-۱-۶- قابلیت هدایت الکتریکی شیل ( $C_{sh}$ )

در اینجا خطای  $S_w$  بواسطه خطای  $C_{sh}$  مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این موضوع با استفاده از روابط آرچی، تیکسیر و هامبل (برای فاکتور سازندی) بررسی می‌شود. در این مورد نیز با افزایش قابلیت هدایت الکتریکی شیل، مقدار خطا در محاسبه  $S_w$  افزایش پیدا می‌کند. ولی در حقیقت تفاوت بین مقادیر خطا در قابلیت هدایت الکتریکی شیل کم یا زیاد، ناچیز است. نمودارها در این حالت تقریباً به موازات محور  $x$  هستند. مقادیر خطا با استفاده از رابطه آرچی بیشتر از روابط تیکسیر و هامبل است. اعدادی از روابط تیکسیر و هامبل بدست می‌آیند بسیار نزدیک به هم هستند. بیشترین خطا مربوط به استفاده از  $a$  و  $m$  رابطه آرچی بوده و در این حالت  $0/06$  در صد خطا ایجاد می‌شود. کمترین خطا در رابطه هامبل دیده می‌شود که معادل  $0/04$  در صد است و این در صورتی است که  $C_{sh}$  برابر  $10 \text{ mmho/m}$  باشد (شکل ۶).

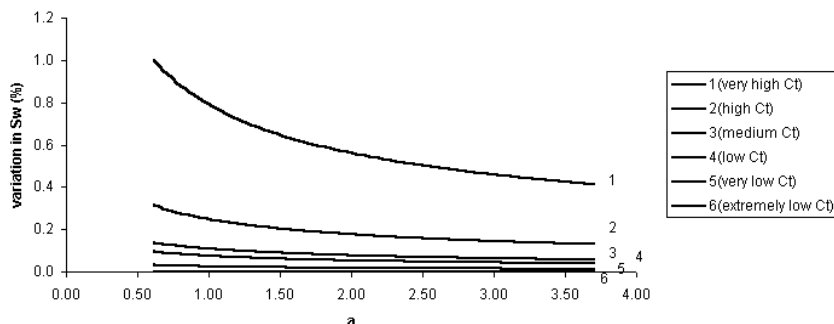


شکل ۶- نمودارهای خطای هدایت الکتریکی شیل (مربوط به روابط فاکتور سازندی).

#### ۴-۱-۷- $aC_t$

در اینجا خطای  $S_w$  بواسطه خطا در بکاربردن  $a$  مطالعه می‌شود. این مطالعه در سازندهای با  $C_t$  متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش  $a$  مقدار خطا کم می‌شود. مقادیر خطا در سازندهای گروه اول (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی واقعی خیلی زیاد) از همه بیشتر است و از سازندهای گروه اول به طرف ششم مقدار خطا کاهش یافته تا اینکه به صورت موازی با محور  $x$  درآیند. بیشترین مقدار خطا در این بررسی متعلق به سازندهای گروه اول است که معادل یک در صد خطا در محاسبه  $S_w$  بوجود می‌آورد (هنگامی که  $a$  مساوی  $0/62$  باشد). کمترین مقدار خطا در سازندهای گروه ششم (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی

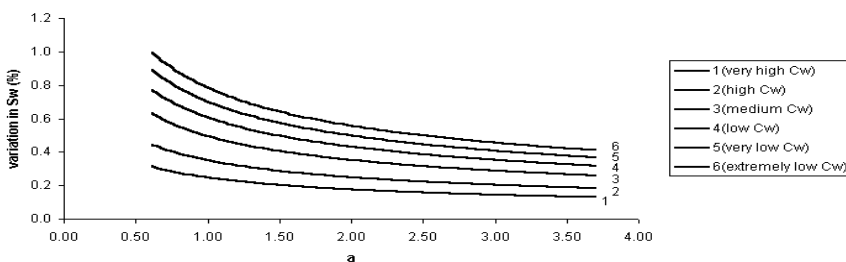
واقعی بی نهایت کم) مشاهده می گردد که برابر صفر است و در تمام مقادیر  $a$ ، ثابت می ماند (شکل ۷).



شکل ۷- نمودارهای خطی  $a$  در گروههای ششگانه سازندی از نظر  $C_t$ .

#### ۴-۱-۸- $aC_w$

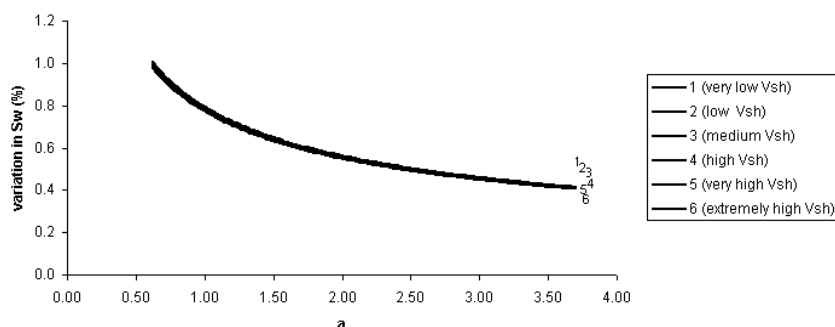
خطای بوجود آمده در  $S_w$  بواسطه خطای  $a$  در سازندهای دارای  $C_w$  مختلف بررسی می گردد. با افزایش  $a$ ، مقدار خطا کاهش می یابد. مقادیر خطا در سازندهای گروه ششم (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی آب بی نهایت کم) از همه بیشتر و در سازندهای گروه اول از همه کمتر است. بقیه گروههای سازندی بین این دو حد قرار می گیرند. بیشترین خطا در این بررسی مربوط به سازندهای گروه ششم است. در این حالت هنگامی که  $a$  برابر  $0/62$  باشد، مقدار خطا در محاسبه  $S_w$  برابر  $0/99$  در صد خواهد شد. کمترین خطا در سازندهای گروه اول (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی آب خیلی زیاد) مشاهده می گردد. در این حالت وقتی که  $a$  برابر  $3/7$  است، مقدار خطا  $0/13$  در صد می شود (شکل ۸).



شکل ۸- نمودارهای خطی  $a$  در گروههای مختلف سازندی از نظر  $C_w$ .

**aV<sub>sh</sub> - ۹-۱-۴**

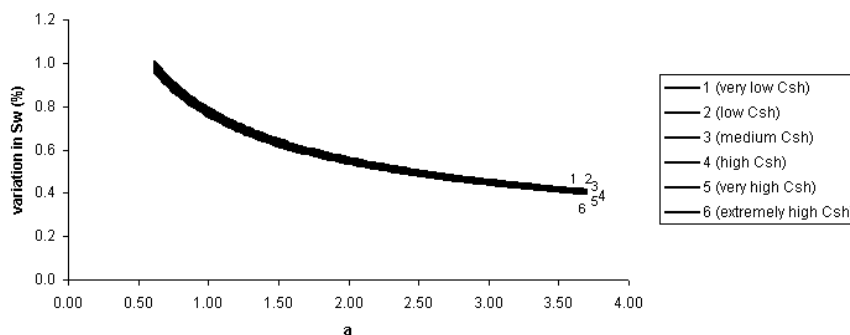
در این بررسی خطای  $S_w$  بواسطه خطای  $a$  در سازندهای دارای  $V_{sh}$  مختلف بررسی می‌گردد. با افزایش  $a$ ، مقدار خطا کم می‌شود. مقدار خطا به ازاء تمام مقادیر  $a$  در گروههای سازندی با حجم شیل مختلف، تفاوت زیادی ندارند. با این وجود می‌توان گفت که بیشترین خطا در سازندهای گروه اول (سازندهای با حجم شیل خیلی کم) دیده می‌شود که مقدار آن معادل یک درصد است (وقتی که  $a$  مساوی ۰/۶۲ باشد). کمترین خطا به مقدار ۰/۴۱ درصد در سازندهای گروه ششم (سازندهای با حجم شیل بی نهایت زیاد) وجود دارد (وقتی که  $a$  برابر ۳/۷ باشد) (شکل ۹).



شکل ۹- نمودارهای خطای  $a$  در گروههای ششگانه سازندی از نظر  $V_{sh}$ . نمودارها تقریباً منطبق‌اند.

**aC<sub>sh</sub> - ۱۰-۱-۴**

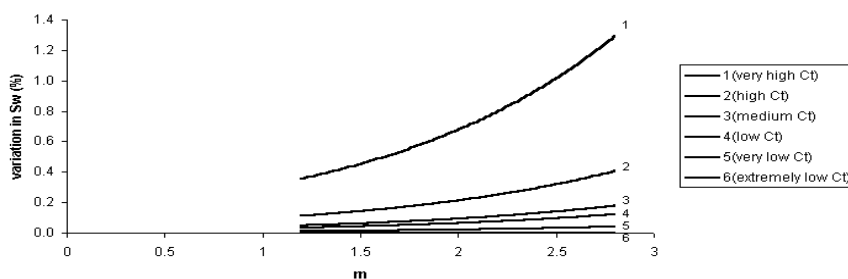
در این قسمت خطای  $S_w$  بواسطه خطای  $a$  در سازندهای دارای  $C_{sh}$  مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. در این مورد با افزایش  $a$ ، مقدار خطا کاهش می‌یابد و در تمام اعداد  $a$ ، در بین گروههای مختلف سازندی تقریباً یکسان است. با این وجود، بیشترین میزان خطا یک درصد است که در سازندهای گروه اول (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی شیل خیلی کم) وجود دارد ( $a=0/62$ ). کمترین خطا در سازندهای گروه ششم دیده می‌شود. زمانی که  $a$  مساوی ۳/۷ باشد، مقدار کمترین خطا در محاسبه  $S_w$  برابر ۰/۴ درصد است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- نمودارهای خطی  $a$  در گروههای ششگانه سازندی از نظر  $C_{sh}$ . نمودارها تقریباً منطبق‌اند.

#### ۴-۱-۱۱- $mC_t$

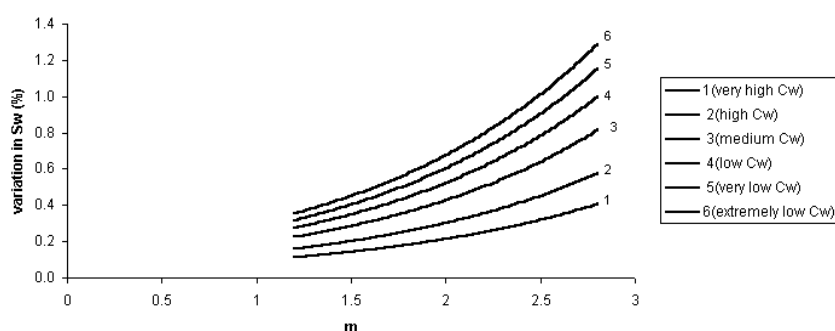
این مطالعه خطای  $S_w$  بواسطه خطای  $m$  را در سازندهای با  $C_t$  مختلف نشان می‌دهد. با افزایش  $m$  مقدار خطای  $S_w$  افزایش یافته و این موضوع در همه گروهها صادق است. مقادیر خطا به ازاء تمام مقادیر  $m$  در سازندهای گروه اول از بقیه بیشتر و در سازندهای گروه ششم از همه کمتر است. بقیه گروهها بین این دو حد قرار دارند. بیشترین خطا در این بررسی معادل  $1/29$  در صد است و در سازندهای گروه اول (سازندهای با قابلیت هدایت خیلی زیاد) وجود دارد ( $m=2/8$ ). کمترین مقدار خطا به ازاء همه مقادیر  $m$  برابر صفر است که این مقدار در سازندهای گروه ششم (سازندهای با قابلیت هدایت بی نهایت کم) مشاهده می‌گردد. قابل ذکر است که نمودارهای خطا از سازندهای گروه اول به طرف گروه ششم به موازات محور  $x$  ها متمایل شده بطوریکه نمودار خطا در گروه ششم بر محور  $x$  منطبق می‌گردد (شکل ۱۱).



شکل ۱۱- نمودارهای خطی  $m$  در سازندهای دارای  $C_t$  مختلف.

#### ۴-۱-۱۲- $mC_w$

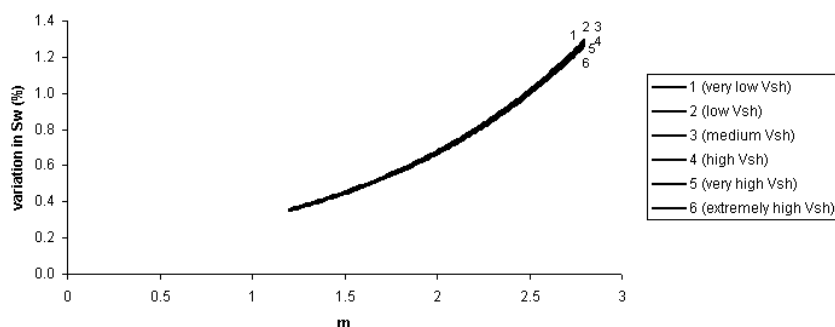
در اینجا خطای  $S_w$  بواسطه خطای  $m$  در سازندهای با  $C_w$  مختلف بررسی می‌گردد. در این مورد با افزایش  $m$ ، مقدار خطا نیز افزایش می‌یابد. در بین گروههای سازندی مختلف از نظر قابلیت هدایت الکتریکی آب به ازاء تمام مقادیر  $m$ ، گروه ششم دارای بیشترین و گروه اول دارای کمترین خطا بوده و بقیه گروهها بین این دو حد قرار می‌گیرند. بیشترین مقدار خطا در این بررسی متعلق به سازندهای گروه ششم (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی آب بی نهایت کم) است. در این حالت وقتی که  $m$  برابر  $2/8$  است، مقدار خطا معادل  $1/29$  در صد خواهد شد. کمترین میزان خطا مساوی  $0/11$  در صد است که در سازندهای گروه اول (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی آب خیلی زیاد) مشاهده می‌گردد ( $m = 1/2$ ) (شکل ۱۲).



شکل ۱۲- نمودارهای خطای  $m$  در سازندهای دارای  $C_w$  مختلف.

#### ۴-۱-۱۳- $mV_{sh}$

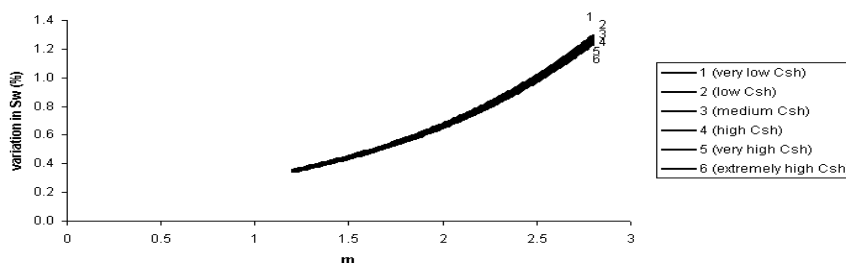
در اینجا خطای  $S_w$  بواسطه خطای  $m$  در سازندهای با مقادیر متفاوتی از حجم شیل مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانند سایر موارد، با ازدیاد  $m$ ، تغییرات  $S_w$  (خطا) نیز زیاد می‌شود. خطاها به ازاء تمام مقادیر  $m$  در گروههای مختلف سازندی تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته و بسیار نزدیک به هم هستند. بیشترین مقدار خطا در سازندهای گروه اول (سازندهای با حجم شیل خیلی کم) وجود دارد که معادل  $1/29$  در صد است ( $m = 2/8$ ) و کمترین مقدار خطا معادل  $0/35$  در صد است که در سازندهای گروه ششم (سازندهای با حجم شیل بی نهایت کم) دیده می‌شود و این به شرطی صادق است که  $m = 1/2$  باشد (شکل ۱۳).



شکل ۱۳- نمودارهای خطی  $m$  در گروههای ششگانه سازندی از نظر  $V_{sh}$ . نمودارها تقریباً منطبق اند.

#### ۴-۱-۱۴- $mC_{sh}$

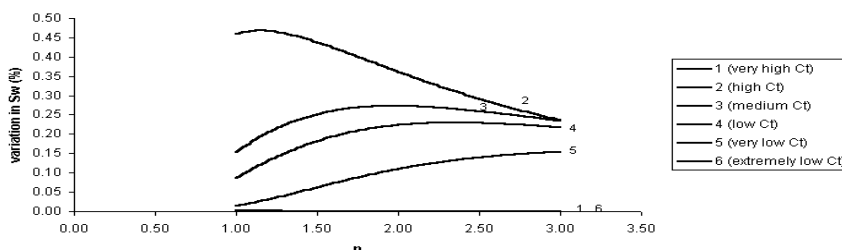
در اینجا خطای  $S_w$  بواسطه خطای  $m$  در سازندهای با  $C_{sh}$  مختلف بررسی می‌گردد. با افزایش  $m$  مقدار خطا افزوده می‌شود. مقادیر خطا در همه گروهها بسیار نزدیک به هم هستند. با تفاوت اندکی می‌توان گفت که بیشترین مقدار خطا در گروه اول (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی شیل خیلی کم) برابر  $1/29$  در صد است (هنگامی که  $m$  مساوی  $2/8$  باشد). کمترین خطا در گروه ششم (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی شیل بی نهایت زیاد) وجود دارد که معادل  $0/34$  در صد است (هنگامی که  $m$  مساوی  $1/2$  باشد) (شکل ۱۴).



شکل ۱۴- نمودارهای خطی  $m$  در سازندهای دارای  $C_{sh}$  مختلف. نمودارها تقریباً منطبق اند.

nC<sub>t</sub> - ۱۵-۱-۴

در اینجا خطای  $S_w$  بواسطه خطای  $n$  در سازندهای با  $C_t$  مختلف بررسی می‌گردد. در بررسی خطای  $n$ ، همه گروهها، نظم یکسانی ندارند. در این بررسی نمودار خطای گروههای سازندی سوم، چهارم و پنجم (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی واقعی متوسط، کم و خیلی کم) مشابه یکدیگر هستند. در این سازندها وقتی  $n$  برابر یک باشد، مقدار خطا کم بوده و با افزایش  $n$  میزان خطا نیز افزایش می‌یابد، سپس مدتی ثابت مانده و بعد کاهش پیدا می‌کند. البته در سازندهای گروه پنجم، بخش آخر (کاهش نمودار) مشاهده نمی‌گردد. در سازندهای گروه دوم ابتدا با افزایش  $n$  مقدار خطا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. نمودار خطا در سازندهای گروه ششم، منطبق بر محور  $x$  هاست. بیشترین مقدار خطای این بررسی در سازندهای گروه دوم به مقدار ۰/۴۷ در صد وجود دارد و این در صورتی است که  $n$  در محدوده ۱/۰۶ تا ۱/۲۴ قرار داشته باشد. کمترین مقدار خطا معادل صفر است که به ازاء تمام مقادیر  $n$  در گروه ششم (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی واقعی بی نهایت کم) وجود دارد (شکل ۱۵).



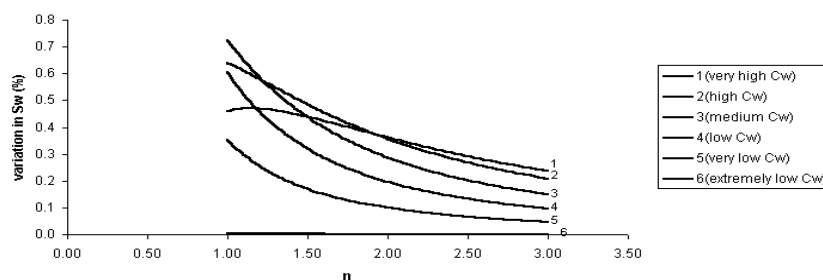
شکل ۱۵- نمودارهای خطای  $n$  در گروههای ششگانه سازندی از نظر  $C_t$ .

nC<sub>w</sub> - ۱۶-۱-۴

در این حالت خطای  $S_w$  بواسطه خطای  $n$  در سازندهای با  $C_w$  مختلف بررسی می‌گردد. نمودار خطای گروههای سازندی دوم، سوم، چهارم، پنجم و ششم نشان می‌دهد که هنگامی که  $n$  برابر یک است، خطا بیشتر بوده و با افزایش  $n$  از مقدار آن کاسته می‌شود. در سازندهای گروه اول، ابتدا با افزایش  $n$  مقدار خطا افزایش می‌یابد، سپس مدتی ثابت مانده و بعد کاهش می‌یابد. در این بررسی بیشترین خطا در سازندهای گروه سوم (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی آب متوسط) معادل ۰/۷۳ در صد است (وقتی  $n$  مساوی یک باشد). کمترین خطا معادل صفر است



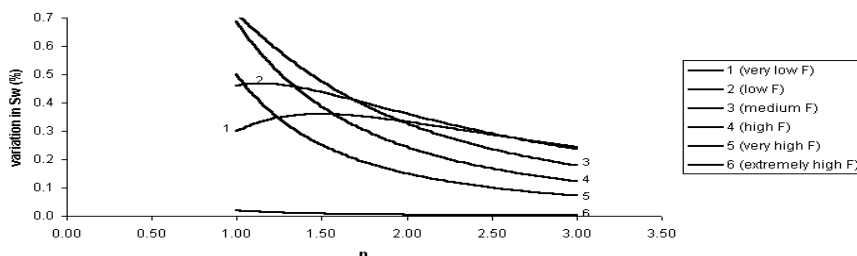
که در سازندهای گروه ششم (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی آب بی نهایت کم) وجود دارد (وقتی  $n$  مساوی سه باشد) (شکل ۱۶).



شکل ۱۶- نمودارهای خطی  $n$  در سازندهای دارای  $C_w$  مختلف.

#### ۴-۱-۱۷- $nF$

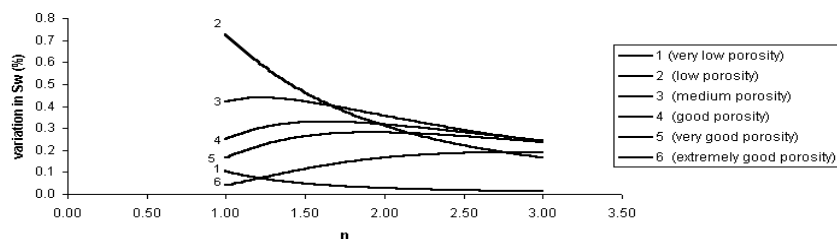
در این حالت خطای  $S_w$  بواسطه خطای  $n$  در سازندهای با  $F$  مختلف بررسی می گردد. در این نمودار، خطا مربوط به سازندهای گروه اول و دوم، ابتدا با افزایش  $n$  مقدار خطا افزایش یافته، سپس مدتی ثابت مانده و بالاخره در انتها کاهش می یابد بطوریکه کمتر از مقدار اولیه می شود. نمودار خطا در گروههای سازندی اول، سوم، چهارم و پنجم به این صورت است که در  $n=1$ ، مقدار خطا بیشتر و با افزایش  $n$ ، کاهش پیدا می کند. بیشترین مقدار خطا در این بررسی،  $0.72$  در صد است، هنگامی که  $n$  مساوی یک باشد و در سازندهای گروه سوم (سازندهای با فاکتور سازندی متوسط) قرار دارد. کمترین مقدار خطا صفر است که در گروه ششم (سازندهای با فاکتور سازندی بی نهایت زیاد) و در  $n=3$ ، وجود دارد (شکل ۱۷).



شکل ۱۷- نمودارهای خطی  $n$  در گروههای مختلف سازندی از نظر  $F$ .

#### ۴-۱-۱۸- $n\phi$

در این بررسی خطای  $S_w$  بواسطه خطای  $n$  در سازندهای با تخلخل مختلف نشان داده شده است. نمودار خطا در گروه‌های اول و دوم دارای روند یکسانی است و گروه‌های سازندی سوم، چهارم، پنجم و ششم نیز تقریباً روند یکسانی با یکدیگر دارند. در گروه‌های سوم و چهارم ابتدا با افزایش  $n$  مقدار خطا افزایش یافته، مدتی ثابت مانده و سپس کاهش می‌یابد بطوریکه از مقدار اولیه کمتر می‌شود. در گروه پنجم با افزایش  $n$  مقدار خطا افزایش می‌یابد، مدتی ثابت مانده و سپس کاهش پیدا می‌کند ولی در انتها ( $n = 3$ ) نیز مقدار خطا از مقدار اولیه ( $n = 1$ ) بیشتر است. در گروه ششم با افزایش  $n$  مقدار خطا افزایش می‌یابد. در گروه اول و دوم در این مساوی یک بیشترین خطا وجود دارد و با افزایش  $n$  خطا کاهش می‌یابد. بیشترین خطا در این بررسی در سازندهای گروه دوم بوده (سازندهای با تخلخل کم) و معادل  $0.73\%$  در صد است (وقتی که  $n$  مساوی یک باشد). کمترین خطا معادل  $0.1\%$  در صد است و در سازندهای گروه اول (سازندهای با تخلخل خیلی کم) دیده می‌شود (وقتی  $n$  مساوی سه باشد) (شکل ۱۸).

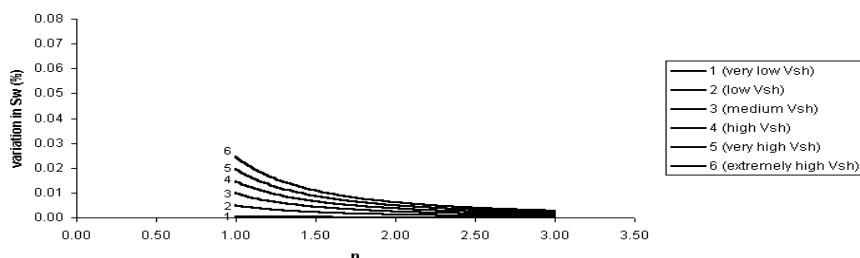


شکل ۱۸- نمودارهای خطای  $n$  در گروه‌های ششگانه سازندی از نظر  $\phi$

#### ۴-۱-۱۹- $nV_{sh}$

این بررسی خطای  $S_w$  بواسطه خطای  $n$  در سازندهای با  $V_{sh}$  مختلف را نشان می‌دهد. در تمام گروه‌های مختلف سازندی با حجم شیل مختلف، وقتی  $n$  برابر یک باشد، خطا بیشتر است و با افزایش  $n$  مقدار خطا کاهش می‌یابد و در  $n$  مساوی سه به حداقل خود می‌رسد. سازندهای گروه ششم در تمام مقادیر  $n$  بیشترین و سازندهای گروه اول کمترین مقدار خطا را نسبت به بقیه گروه‌ها دارند. بقیه گروه‌ها بین این دو حد قرار می‌گیرند. بیشترین خطای این بررسی در سازندهای گروه ششم (سازندهای با حجم شیل بی نهایت زیاد) مساوی  $0.2\%$  در صد ( $n$

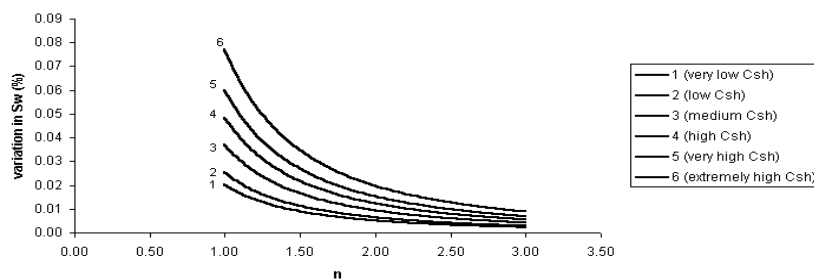
مساوی یک) و کمترین خطا در سازندهای گروه اول (سازندهای با حجم شیل خیلی کم مساوی صفر است (در  $n$  مساوی سه) (شکل ۱۹).



شکل ۱۹- نمودارهای خطای  $n$  در گروههای ششگانه سازندی از نظر  $V_{sh}$ .

#### ۴-۱-۲۰- $nC_{sh}$

این بررسی خطای  $S_w$  بواسطه خطای  $n$  در سازندهای با  $C_{sh}$  مختلف را نشان می‌دهد. مشابه حالت قبل با افزایش  $n$ ، خطا در همه گروهها کاهش می‌یابد. حداکثر خطای این بررسی در سازندهای گروه ششم (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی شیل بی نهایت زیاد) قرار دارد که معادل ۰/۰۸ در صد است (در  $n=1$ ). حداقل خطا در سازندهای گروه اول (سازندهای با قابلیت هدایت الکتریکی شیل خیلی کم) تقریباً صفر است (در  $n=3$ ) (شکل ۲۰).



شکل ۲۰- نمودارهای خطای  $n$  در سازندهای دارای  $C_{sh}$  مختلف.

## ۵- بحث و نتیجه

دقت عمل و صحت نتایج حاصل از ارزیابی مخازن هیدروکربنی با استفاده از نمودار چاه‌ها بستگی کامل به کاربرد پارامترهای صحیح در معادلات موجود است. برای تخمین اشباع‌شدگی آب و نفت در مخازن هیدروکربنی معادلات متعددی وجود دارد که بنا به شرایط پتروفیزیکی مخزن هر کدام کاربرد محلی خود را دارند. اگرچه این معادلات بسیار متنوعند، ولی همگی آن‌ها در داشتن بسیاری از عوامل نظیر ضرایب آرچی، تخلخل و غیرو مشترکند. مسلماً وجود خطا در هر کدام از عوامل سبب محاسبه غیرصحیح اشباع‌شدگی آب در مخزن می‌شود. به منظور بدست آوردن نتیجه کلی از این مطالعه، میانگین حداکثر و حداقل خطاها در تمام معادلات محاسبه شده است.

از آنجاییکه در رابطه با ضرایب آرچی، مقادیر خطاهای هر فرمول در سازندهای مختلف بررسی شده اند (علی رغم نزدیک بودن مقادیر خطاها) برای دقت بیشتر، ابتدا در هر فرمول و برای هر ضریب، مقدار میانگین محاسبه و در نهایت با مقادیر میانگین سایر فرمولها، میانگین کل بدست آمد. به عنوان مثال در مورد  $m$ ، ابتدا در هر معادله برای مقادیر خطا در حالت‌های  $mC_t$ ،  $mC_w$ ،  $mV_{sh}$  و  $mC_{sh}$  میانگین حداکثر و حداقل بدست آمد و سپس برای اعداد مشابه بدست آمده از تمامی معادلات، میانگین کل آن محاسبه شد.

از مطالعه حاضر نتایج زیر بدست آمده است:

۱- بطور کلی در بررسی عواملی از قبیل  $C_t$ ،  $C_w$ ،  $F$ ،  $\phi$ ،  $R_t$ ،  $R_w$  و  $R_{sh}$  با افزایش

مقدار آنها، مقدار خطا کاهش می‌یابد.

۲- در بعضی از فرمولها در مورد  $V_{sh}$  حالتی مشابه مورد چهارم مشاهده

می‌گردد (مانند معادلات Dewan, 1983 و Poupon & Leveaux, 1971). در

برخی دیگر با افزایش مقدار حجم شیل، مقدار خطا نیز افزایش می‌یابد (از قبیل

معادلات Hossin, 1960، Poupon *et al.*, 1954، Schlumberger, 1972،

Juhasz, 1981 و Patchett & Herrick, 1982). در تعداد دیگری از فرمولها، ابتدا

با افزایش حجم شیل، مقدار خطا افزایش یافته، سپس مدتی ثابت مانده و بعداً

کاهش پیدا می‌کند و بیشترین مقدار خطا متعلق به محدوده ای از حجم شیل

است که تقریباً در اواسط آن قرار دارد (نظیر معادلات Poupon &

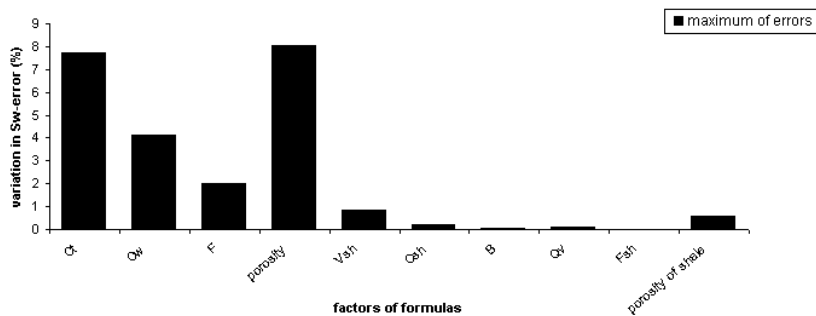
Leveaux, 1971-Indonesia formula و Woodhouse, 1976). بالاخره در گروه

دیگری از معادلات با افزایش حجم شیل تقریباً مقدار خطا ثابت می‌ماند (مانند

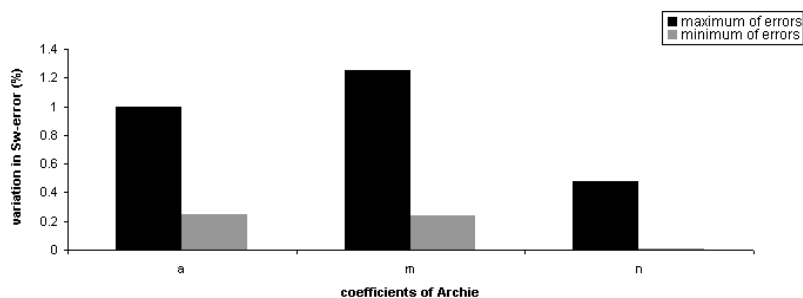
معادلات Doll & Simandoux, 1963 و Bardon & Pied, 1969).

- ۳- در بعضی از معادلات همراه با افزایش  $C_{sh}$ ، مقدار خطای  $S_w$  کاهش می‌یابد (مانند معادلات Doll و Leveaux, 1971- & Leveaux, 1971 و Poupon & Leveaux, 1971 و Woodhouse, 1976 و Bardon & Pied, 1969). در برخی دیگر از فرمولها با افزایش مقدار  $C_{sh}$ ، مقدار خطا افزایش می‌یابد (نظیر فرمولهای Poupon et al., 1954 و Patchett & Herrick, 1982) و بالاخره در دسته دیگری از معادلات با افزایش  $C_{sh}$ ، مقدار خطا تقریباً ثابت می‌ماند (از قبیل معادلات Hossin, 1960 و Simandoux, 1963 و Shlumberger, 1972 و Juhasz, 1981).
- ۴- با تغییر مقدار عواملی نظیر  $B$ ،  $Q_v$  و  $F_{sh}$  مقدار خطای  $S_w$  تقریباً ثابت می‌ماند. بنابر این مقدار آنها تأثیری بر خطای ایجاد شده در  $S_w$  ندارد.
- ۵- در بررسی عوامل اصلی، مقدار خطا با استفاده از روابط آرچی، تیکسیس و هامبل (توسط مقادیر مختلف  $a$  و  $m$  موجود در این روابط) محاسبه شده است. مقادیر خطای سه گانه در مورد  $C_t$ ،  $C_w$  و  $\phi$  در تمام فرمولها انطباق کامل دارند. مقادیر خطای  $V_{sh}$  و  $C_{sh}$  با استفاده از روابط فوق کاملاً بر هم منطبق نیستند (به استثنای معادلات Poupon & Leveaux, 1971-simplified Indonesia formula و Dewan, 1983، فقط در مورد حجم شیل). در اکثر معادلات مقادیر خطای مربوط به روابط تیکسیس و هامبل بر یکدیگر منطبق اند.
- ۶- مقایسه مقادیر خطاها نشان می‌دهند که در اغلب موارد آنها تابع مقدار عامل می‌باشند و برای تعیین مقدار خطای احتمالی موجود در محاسبه، ابتدا باید به مقدار عامل توجه شود.
- ۷- بیشترین مقدار میانگین خطاها در معادلات، مربوط به تخلخل است که معادل  $8/07$  در صد می‌باشد. به عبارت دیگر اگر در بکاربردن تخلخلی برابر  $0/05$  (۵ در صد) در فرمول یک در صد خطا رخ دهد، میانگین خطایی معادل  $8/07$  در صد در محاسبه  $S_w$  بوجود می‌آید. پس از تخلخل، میانگین خطای  $S_w$  در اثر  $C_t$  و  $C_w$  در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند (شکل ۲۱).
- ۸- برای ضرایب آرچی، مقادیر خطا در سازندهای مختلف از نظر  $C_t$ ،  $C_w$ ،  $F$ ،  $\phi$ ،  $V_{sh}$  و  $C_{sh}$  بررسی شده است که این مقادیر بسیار نزدیک به هم بوده و یا برابرند. بنابراین در معادلات مطالعه شده، مقدار خطا در  $S_w$  به دلیل وجود خطا در ضرایب آرچی، تقریباً به نوع سازند ارتباطی ندارد.

۹- مقایسه میانگین خطاهای ایجاد شده در  $S_w$  به واسطه وجود یک در صد اشتباه در بکاربردن ضرایب آرچی (a, m و n) نشان داد که بیشترین مقدار خطا متعلق به ضریب m می‌باشد. میانگین خطای بدست آمده در اثر این عامل ۱/۲۵ درصد است (شکل ۲۲).



شکل ۲۱- میانگین ماکزیمم خطاهای ایجاد شده در  $S_w$  توسط عوامل اصلی در همه معادلات اشباع‌شدگی آب.



شکل ۲۲- میانگین ماکزیمم خطاهای ایجاد شده در  $S_w$  توسط ضرایب آرچی در همه معادلات اشباع‌شدگی آب.

## References

- Archie, G. E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics: Transactions of AIME, v. 146, PP. 54-62.
- Bardon, C. and Pied, B. 1969, Formation water saturation in shaly sands. . Trans. SPWLA 10th Ann. Logging Symp., Z1-19.
- Dewan, J., 1983, Essentials of modern open-hole log interpretation: Penn Well book, Tulsa, Oklahoma, 631P.
- Hossin, A., 1960, Calcul des saturation en eau par la methode du ciment argileux (formule d' Archie generalisee). Bull. Assoc. Francaise Tech. Pet. 140, 31 March.
- Juhasz,I., 1981, Normalised Qv - the key to shaly sand evaluation using the Waxman-Smits equation in the absence of core data. Trans. SPWLA 22nd Ann. Logging Symp., Z1-36.
- Patchett, J. G. and Herrick, D. C., 1983. A review of saturation models. In: Shaly Sand Reprint Volume, SPWLA, Houston, PP III 1-7.
- Poupon, A. and Leveaux, J., 1971, Evaluation of water saturations in shaly formations. Trans. SPWLA 12th Ann. Logging Symp., O1-2. (Full text in shaly sand Reprint Volume, SPWLA, Houston, PP IV 81-95).
- Poupon, A., Loy, M. E. and Tixier, M. P., 1954, A contribution to electric log interpretation in shaly sands. Trans. AIME 201,PP. 138-145.
- Schlumberger, 1972, Log interpretation, v.1- principles. Schlumberger Ltd., New York, 113P.
- Simandoux, P., 1963, Dielectric measurements on porous media: application to the mesurement of water saturation: study of the behaviour of argillaceous formation. Revue de l' Institut Francaise du Petrole 18, supplementary issue, 193-215. (Translated text in Shaly Sand Reprint Volume, SPWLA, Houston, PP IV 97-124).
- Waxman, M. H. and Smits, L. J. M., 1968, Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. Soc. Pet. Engrs J. 8,PP.107-122.
- Woodhouse, R., 1976, Athabasca tar sand reservoir properties derived from cores and logs. Trans. SPWLA 17th Ann. Logging Symp., T1-13.