



مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر شوری بر روی پاسخ قطبش القایی طیفی نمونه‌های ماسه‌سنگ و ماسه

فاطمه رضوی راد^۱ و احمد قربانی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۳/۲۸؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۲۳

* نویسنده مسئول مکاتبات: aghorbani@yazd.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

در این مطالعه، وابستگی رسانایی الکتریکی مجازی (σ'') به رسانایی سیال پرکننده‌ی منافذ (σ_f) بر روی اندازه‌گیری‌های قطبش القایی طیفی برداشت شده بر روی نمونه‌های ماسه و ماسه‌سنگ تمیز یکی از مخازن نفتی ایران و همچنین ماسه‌سنگ حاوی رس برداشت شده از یکی از آبخوان‌های ماسه‌سنگی شمال غرب انگلستان بررسی شده است. بخش حقیقی رسانایی الکتریکی (σ') یک رابطه‌ی خطی با رسانایی سیال اشباع‌کننده‌ی منافذ (σ_f) نشان می‌دهد. همچنین تغییرات رسانایی الکتریکی مجازی (σ'') با شوری و در نتیجه رسانایی الکتریکی سیال اشباع‌کننده‌ی منافذ (σ_f) به صورت یک رابطه‌ی خطی مثبت است. به منظور تعیین زمان رهایی (τ) داده‌های طیفی، مدل کول-کول بر روی اندازه‌گیری‌های انجام شده در چهار درجه‌ی شوری مختلف بر روی نمونه‌های آبخوان ماسه‌سنگی برازش شد. زمان رهایی حاصل از مدل کول-کول برای بیشتر نمونه‌ها با افزایش رسانایی الکتریکی سیال پرکننده‌ی منافذ به شکل خطی افزایش می‌یابد. البته برای دو نمونه زمان رهایی با افزایش رسانایی سیال اشباع‌کننده‌ی منافذ، کاهش نشان می‌دهد؛ که این کاهش ممکن است به دلیل تفاوت در اندازه‌ی منافذ و همچنین محتوی رس متفاوت نمونه‌ها باشد. رفتار رسانایی مجازی (σ'') نیز با بارپذیری نرمالیزه (m_n)، که هر دو از پارامترهای اندازه‌گیری قطبش هستند، قابل مقایسه است. به عبارت دیگر بارپذیری نرمالیزه نیز با افزایش شوری سیال و در نتیجه رسانایی الکتریکی سیال اشباع‌کننده‌ی منافذ (σ_f)، افزایش می‌یابد. به منظور توصیف وابستگی قطبش سطحی به رسانایی الکتریکی سیال، پارامتر قطبش‌پذیری فصل مشترک دانه-سیال بر واحد S_{por} (C_p و C_s) نیز در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت. قطبش‌پذیری فصل مشترک دانه-سیال بر واحد S_{por} (پارامترهای C_p و C_s) مفهومی است؛ که اختلاف بین بزرگی قطبش (σ'' یا m_n) بین نمونه‌های با میزان یکسان S_{por} را توضیح می‌دهد. در این مطالعه نشان داده شد پارامترهای قطبش‌پذیری (C_p و C_s) کاملاً به رسانایی سیال اشباع‌کننده‌ی منافذ وابسته هستند. به عبارت دیگر با افزایش رسانایی سیال اشباع‌کننده‌ی منافذ، میزان قطبش‌پذیری نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد. بیشترین مقادیر پارامترهای قطبش‌پذیری (C_p و C_s) در شوری‌های بالا مشاهده شده است؛ که شاهدهی بر بیشینه‌ی قطبش‌پذیری کوارتز غالب ماسه‌های سیلیسی است. بارپذیری نرمالیزه نیز یک رابطه‌ی توانی مثبت با رسانایی الکتریکی سیال اشباع‌کننده‌ی منافذ نشان داده است.

قطبش القایی طیفی
شوری
رسانایی الکتریکی مجازی
بارپذیری نرمالیزه
زمان رهایی
مدل کول-کول
رسانایی سیال

آزمایشگاه و از ۱۰ میلی‌هرتز تا ۱۰۰ هرتز در صحرا) اندازه‌گیری می‌شود (Kemna, 2000; Binley and Kemna, 2005).

در طول ۲۵ سال گذشته، به استفاده از روش قطبش القایی در مطالعات زیست‌محیطی توجه زیادی شده است (Börner et al., 1993; Weller and Börner, 1996; Vanhala, 1997; Slater and Lesmes, 2002). انگیزه‌ی بسیاری از مطالعات انجام شده تعیین ویژگی‌های بافتی سنگ‌ها و خاک‌ها توسط اندازه‌گیری‌های قطبش القایی بوده است. هرچند به تخمین تراوایی محیط‌های متخلخل از طریق اندازه‌گیری‌های قطبش القایی نیز توجه فراوانی شده است (Slater and Sturrock et al., 1999; Börner et al., 1996; Weller et al., 2002; Slater and Glaser, 2003; Lesmes, 2002; Zisser et al., 2010; Revil and Florsch, 2010). بیشتر مطالعات مورد اشاره اثر شوری بر روی مدل‌های تخمین تراوایی در نظر گرفته نشده است؛ اما رویل و فلورس (۲۰۱۰) با در نظر گرفتن وابستگی اندازه‌گیری‌های قطبش القایی به شوری سیال منافذ، یک مدل فیزیکی برای تخمین تراوایی ارائه داده‌اند. برخی از مطالعات انجام شده نشان داده‌اند که پاسخ قطبش القایی با تغییر سیال منافذ از غیرآلی به آلی به‌طور چشم‌گیری تغییر می‌کند (Vinegar and Waxman, 1984; Olhoeft, 1985; Börner et al., 1993; Weller and Börner, 1996; Vanhala, 1997).

توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی با جریان مستقیم به‌طور گسترده برای توصیف آزمون‌های ردیاب نمک در آبخوان‌های کم عمق استفاده شده است؛ اما روش قطبش القایی طیفی تا این حد استفاده نشده است. مقاومت ویژه مستقیم همیشه در فرکانس پایین اندازه‌گیری می‌شود و روش توموگرافی مقاومت ویژه مستقیم یک تقریب است. اخیراً آزمون‌های ردیاب نمک که با روش مقاومت ویژه مستقیم برای تعیین نفوذپذیری و پراکندگی آبخوان‌های کم عمق نظارت شده‌اند، کاربرد زیادی پیدا کرده است (Pollock & Müller et al., 2010; Cirpka, 2008). یکی از مشکلات مهم روش مقاومت ویژه مستقیم وجود رسانایی سطحی در فصل مشترک کانی و آب منفذی است که در رسانایی مؤثر مواد متخلخل نیز سهمیم است. نادیده گرفتن رسانایی سطحی ممکن است منجر به تفسیر نادرست اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه آزمون ردیاب نمک شود. در ماسه‌های سیلیسی نیز، از رسانایی سطحی در شوری‌های پایین نمی‌توان چشم‌پوشی کرد (Bol'eva et al., 2007; Jardani et al., 2009). اما روش قطبش القایی طیفی یک روش مستقل برای تخمین رسانایی سطحی به خصوص تغییرات رسانایی سطحی مرتبط با تغییرات شوری ارائه می‌دهد (Revil and Florsch, 2010). اگر وابستگی قطبش القایی طیفی به شوری به‌خوبی درک شود، روش قطبش القایی طیفی، یک روش ساده برای نظارت ردیاب نمک که از فرضیه‌ی نادیده گرفتن رسانایی سطحی اجتناب می‌کند؛ ارائه

تعیین ویژگی‌های مختلف سنگ‌ها و خاک‌ها شامل ویژگی‌های فیزیکی و پتروفیزیکی یکی از مهم‌ترین موضوعات مطالعه در توصیف مخازن نفتی و آبخوان‌ها است. امروزه روش‌های ژئوفیزیکی به‌طور گسترده در مطالعات زیست‌محیطی و نزدیک سطحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین پیشرفت قابل توجهی در توسعه‌ی تئوری، روش، فناوری و ابزارهای مدل‌سازی مشاهده شده است. این روش‌ها در مقایسه با دیگر بررسی‌های زیرسطحی (مانند گمانه‌زنی و چاه‌نگاری) از مزایایی نظیر توانایی پوشش یک منطقه‌ی وسیع در مدت زمان کوتاه، ماهیت غیرتخریبی و هزینه‌ی بهره‌وری اندک برخوردارند. با توجه به این‌که روش‌های ژئوفیزیکی به ویژگی‌های فیزیکی مختلف حساس‌اند، ساختارهای زیرسطحی با ویژگی‌های ژئوفیزیکی مختلف قابل توصیف‌اند. در نتیجه روش‌های ژئوفیزیکی اطلاعات ساختاری ارزشمندی از عمق و عرض مخازن به دست می‌دهند. یکی از مهم‌ترین اهداف کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در مطالعات نزدیک سطح و زیست‌محیطی، مرتبط کردن ویژگی‌های ژئوفیزیکی به پارامترهای پتروفیزیکی است (Hubbard et al., 2000; Robinson et al., 2008; Binley et al., 2010). در نتیجه روش‌های ژئوفیزیکی در توصیف ویژگی‌های سنگ‌ها و خاک‌ها مفید واقع شده و اطلاعات سودمندی را بدون نیاز به انجام برداشت‌های هیدروژئولوژیکی سنتی پرهزینه و تخریبی فراهم می‌کنند. با گسترش استفاده از روش‌های الکترومغناطیس و اخیراً رادار نفوذی به زمین، روش‌های ژئوفیزیکی الکتریکی مورد توجه قرار گرفتند. روش‌های الکتریکی دارای کاربردهای مختلفی هستند که از آن جمله می‌توان به زمین‌شناسی، علوم زیست‌محیطی، اکتشاف کانی‌ها، اکتشاف نفت، هیدروژئولوژی و باستان‌شناسی اشاره کرد. روش قطبش القایی طیفی یک روش ژئوفیزیکی است؛ که اخیراً به آن توجه زیادی شده است (Atekwana and Slater, 2009; Williams et al., 2009). این روش برای اندازه‌گیری ویژگی‌های الکتریکی سنگ‌ها و خاک‌ها در فرکانس پایین استفاده می‌شود. (Cassiani et al., 2009; Vinegar and Waxman, 1984; Schmutz et al., 2010). به دلیل حساسیت این روش به ویژگی‌های هیدرولیکی مانند نفوذپذیری از آن برای تخمین نفوذپذیری سنگ‌ها و خاک‌ها نیز استفاده شده است (Börner, 1992; de Lima and Niwas, 2000; Slater and Lesmes, 2002; Kemna et al., 2005; Hordt et al., 2007; Revil and Florsch, 2010; Revil et al., 2012; Weller et al., 2015; Robinson et al., 2015; Osterman et al., 2016; Revil et al., 2018). در این روش، رسانایی کمپلکس یک محیط متخلخل برحسب بزرگی رسانایی الکتریکی و اختلاف فاز بین جریان الکتریکی تزریق شده و پتانسیل الکتریکی اندازه‌گیری شده در یک محدوده‌ی گسترده‌ی فرکانسی (بین ۱ میلی‌هرتز تا چند ده کیلوهرتز در

پارامترهای حاصل از اندازه‌گیری‌های قطبش القایی طیفی بر روی نمونه‌های ماسه‌سنگ و ماسه‌ی کاملاً اشباع شده، بررسی شده است. مدل کول-کول، که به‌طور گسترده برای نشان دادن ویژگی‌های طیفی مقاومت ویژه‌ی الکتریکی مختلط سنگ‌ها و خاک‌ها و همچنین برای کمی کردن میزان قطبش‌پذیری فصل مشترک دانه-سیال نیز استفاده می‌شود؛ بر روی اندازه‌گیری‌های قطبش القایی طیفی انجام شده بر روی نمونه‌ها برازش شده و سپس رابطه‌ی بین پارامترهای حاصل از برازش مدل کول-کول بر روی اندازه‌گیری‌ها با رسانایی الکتریکی سیال پرکننده‌ی منافذ مطالعه شده است. همچنین در این مطالعه به منظور در نظر گرفتن وابستگی پارامترهای قطبش القایی به شیمی سیال، به مطالعه‌ی اثر تغییر شوری سیال اشباع‌کننده‌ی نمونه‌ها بر روی میزان قطبش‌پذیری فصل مشترک دانه-سیال بر واحد S_{por} پرداخته شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- اندازه‌گیری‌های الکتریکی

ویژگی‌های الکتریکی یک محیط متخلخل با پارامترهای مختلط وابسته به فرکانس توصیف می‌شود. سه پارامتر مهم در ژئوفیزیک عبارت‌اند از: رسانایی الکتریکی $(\sigma^*(\omega))$ ، مقاومت ویژه‌ی الکتریکی $(\rho^*(\omega))$ و دی‌الکتریک $(\epsilon^*(\omega))$. رابطه‌ی این سه پارامتر با یکدیگر به‌صورت زیر است:

$$\sigma^*(\omega) = \frac{1}{\rho^*(\omega)} = i\omega\epsilon^*(\omega) \quad (1)$$

که $i = \sqrt{-1}$ است و ω ، فرکانس زاویه‌ای است که با رابطه‌ی $\omega = 2\pi f$ به فرکانس مرتبط می‌شود. اندازه‌گیری هر یک از این پارامترها در یک محدوده‌ی فرکانسی گسترده، طیف‌سنجی الکتریکی نامیده می‌شود. در ژئوفیزیک، روش الکترومغناطیس، یک روش فرکانس‌های بالا محسوب می‌شود؛ که در محدوده‌ی فرکانسی کیلوهرتز تا مگاهرتز به مطالعه می‌پردازد و پارامتر اصلی این روش، دی‌الکتریک است. یکی از سریع‌ترین روش‌های ژئوفیزیکی، روش رادار نفوذی به زمین است که در محدوده‌ی فرکانسی مگاهرتز تا گیگاهرتز عمل می‌کند و ویژگی‌های الکتریکی زمین در این روش، برحسب دی‌الکتریک بیان می‌شود. روش ژئوفیزیکی دیگری که به بررسی ویژگی‌های الکتریکی زمین در محدوده‌ی فرکانس پایین می‌پردازد، روش رسانایی الکتریکی مختلط نامیده می‌شود.

در کاربردهای در حوزه‌ی فرکانس، آنچه اندازه‌گیری می‌شود، جریان و ولتاژ وابسته به زمان $(I(t))$ و $(V(t))$ است؛ که معمولاً تغییرات سینوسی با زمان، موردنظر است. غالباً ولتاژ نسبت به جریان تأخیر دارد و گاهی هم از جریان پیشی می‌گیرد. این امر به ترتیب توسط زاویه‌ی فاز منفی و مثبت نشان داده می‌شود و به‌صورت زیر بیان می‌شود:

می‌دهد. به دلیل رقابت مکانیسم‌های قطبش متنوع موجود در محیط متخلخل، روش قطبش القایی عمدتاً در زمینه‌های تجربی با مشکلاتی همراه است. معمولاً برازش مدل‌های تجربی نظیر مدل کول-کول بر روی اندازه‌گیری‌های قطبش‌القایی طیفی متداول است (Cassiani et al., 2009; Cole and Cole, 1941).

رابطه‌ی تجربی آرچی (Archie, 1942) تناسب بین رسانایی الکتریکی محیط متخلخل کاملاً اشباع شده و رسانایی سیال است، زمانی که رسانایی الکتریکی تنها یونی است و از طریق سیال پرکننده‌ی منافذ صورت می‌پذیرد. این نسبت به صورت فاکتور سازندی بیان می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که وجود رس در محیط متخلخل منجر به رسانایی سطحی در فصل مشترک سیال-دانه شده و در نتیجه رسانایی تنها از طریق سیال پرکننده‌ی منافذ صورت نمی‌گیرد (Rink and Schopper, 1974). زیرا زمانی که یک سیال حاوی یون‌ها در تماس با زمینه‌ی جامد سنگ قرار می‌گیرد، در فصل مشترک سیال-دانه، دولایه‌ی الکتریکی تشکیل می‌شود. سطح سنگ، غالباً دارای بار منفی است که در حضور رس‌ها، اکسیدهای آهن و هیدروکسیدهای موجود در محیط منفذی، مساحت سطح و همچنین بار سطحی مرتبط با آن‌ها افزایش می‌یابد. بار منفی سطحی، کاتیون‌ها را جذب کرده و دو لایه‌ی الکتریکی در اطراف دانه تشکیل می‌شود. لایه‌ی استرن مدل دولایه‌ی الکتریکی، لایه‌ی است که یون‌های آن نسبتاً نامتحرک هستند و به وسیله نیروهای الکترواستاتیکی ثابت نگه داشته شده‌اند. آن سوی لایه‌ی استرن، لایه‌ی دیفیوز واقع شده؛ که به داخل سیال گسترش دارد. مدل‌های مفهومی و فیزیکی اخیر نشان داده‌اند که قطبش الکتروشیمیایی دو لایه‌ی الکتریکی مهم‌ترین منبع قطبش مشاهده در فرکانس زیر ۱۰۰ هرتز هستند. برخی از مدل‌های قطبش بر اساس اندازه‌ی دانه‌ها در نظر گرفته شده‌اند (Lesmes and Morgan, 2001) و برخی دیگر بر اساس اندازه‌ی منافذ تعیین شده‌اند (Titov et al., 2002).

صرف‌نظر از مدل‌های فیزیکی دولایه‌ی الکتریکی، یک رابطه‌ی خطی بین مقیاس طولی پلاریزه شونده و پاسخ قطبش‌القایی وجود دارد. به عنوان مثال، شوموتر و همکاران ۲۰۱۰ نشان داده‌اند که مدل فیزیکی ارائه شده به وسیله Leroy et al. (2008)، وابستگی خطی رسانایی مجازی به نسبت مساحت سطح منافذ به حجم منافذ (S_{por}) را پیش‌بینی می‌کند. همچنین (Weller et al. (2010b) نیز نشان داده‌اند که بزرگی قطبش (رسانایی مجازی یا بارپذیری نرمالیزه) به‌طور خطی به S_{por} وابسته هستند. مقایسه‌ی بین ماسه‌سنگ‌ها، مخلوط‌های ماسه-رس، و مخلوط‌های ماسه و ذرات فلزی نشان می‌دهد که شیب رابطه‌ی خطی بین پاسخ قطبش‌القایی (رسانایی مجازی یا بارپذیری نرمالیزه) و S_{por} به الکتروشیمی فصل مشترک دانه-سیال بستگی دارد. علاوه بر میزان قطبش، قطبش‌پذیری سطح نیز باید در نظر گرفته شود.

در این مطالعه، اثر شوری سیال پرکننده‌ی منافذ بر روی

$$c_p = \frac{\sigma''}{S_{por}}, \quad (9)$$

این پارامتر، قطبش‌پذیری فصل مشترک دانه-سیال را بر واحد S_{por} نشان می‌دهد. Weller et al. (2010b) از محلول کلرید سدیم با رسانایی ۱۰۰ میلی‌زیمنس بر متر بر اشباع کردن نمونه‌هایشان استفاده کردند و دریافتند که $c_p = 10^{-11} S$ است. در این مطالعه، به بررسی وابستگی این پارامتر (c_p) به رسانایی سیال اشباع‌کننده (σ_f) نیز پرداخته شده است. (Weller et al. 2010b and 2011) همچنین یک رابطه‌ی خطی بین بارپذیری نرمالیزه (m_n) و S_{por} مشاهده کردند. بنابراین آن‌ها پارامتر دیگری را نیز به عنوان قطبش‌پذیری فصل مشترک دانه-سیال بر واحد S_{por} یا قطبش‌پذیری مخصوص (C_s) معرفی کردند:

$$C_s = \frac{m_n}{S_{por}}. \quad (10)$$

$$c_s = \frac{m_n}{S_{por}}. \quad (11)$$

Lesmes and Frye (2001) بر این باورند که پارامترهای C_p و C_s وابسته به دانسیته‌ی بار سطحی و قابلیت تحرک یونی هستند. به منظور توصیف وابستگی فرکانسی ویژگی‌های الکتریکی، تعیین کمی رفتار طیفی آن‌ها لازم است. در نتیجه یک مدل ریاضی مناسب که بتواند پارامترهای پتروفیزیکی توصیفی انواع سنگ و خاک را به کمیت‌های طیفی قابل اندازه‌گیری آن‌ها ارتباط دهد، اساس کاربرد عملی روش مقاومت ویژه‌ی کمپلکس است. برای این منظور، روش‌های مختلف متعددی ارائه شده است؛ که عمدتاً بر اساس تئوری الکترومغناطیس (Marshall and Madden, 1959) و تئوری‌هایی عمومی (Jonscher, 1981) هستند. مدل کول-کول یکی از انواع مدل‌های رایج است؛ که به‌طور گسترده برای نشان دادن ویژگی‌های طیفی مقاومت ویژه‌ی الکتریکی کمپلکس سنگ‌ها استفاده می‌شود. این مدل در سال ۱۹۴۱ به وسیله کول و کول ارائه شده؛ که در سال ۱۹۸۷ به وسیله Pelton et al. (1987) برای توصیف طیف‌های مقاومت ویژه‌ی کمپلکس سنگ‌ها در محدوده‌ی فرکانسی ۱۰ میلی‌هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز استفاده شده است. این مدل در ادامه بیان شده است:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left[1 - m \left(1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right) \right], \quad (12)$$

که c توان کول-کول یا وابستگی فرکانسی نامیده شده و برای بیشتر سنگ‌ها بین ۰/۱ تا ۰/۶ با متوسط مقدار ۰/۲۵ متغیر است (Pelton et al., 1987). ρ_0 مقاومت ویژه‌ی الکتریکی اندازه‌گیری شده در جریان مستقیم (در فرکانس بسیار کوچک نزدیک به صفر)

$$I(t) = I_0 \sin(\omega t). \quad (2)$$

$$V(t) = V_0 \sin(\omega t + \Phi). \quad (3)$$

روش دیگر نشان دادن پارامترهای رسانایی مختلط، تقسیم آن‌ها به بخش‌های حقیقی ($\sigma'(\omega)$) و مجازی ($\sigma''(\omega)$) وابسته به فرکانس است؛ که به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\sigma^*(\omega) = \sigma'(\omega) + i\sigma''(\omega). \quad (4)$$

زاویه‌ی فاز نیز به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\tan \Phi = \frac{\rho''}{\rho'} = \frac{\sigma''}{\sigma'}. \quad (5)$$

بیشتر مدل‌های الکتریکی برای رسانایی الکتریکی مختلط یک محیط متخلخل در فرکانس‌های پایین (کمتر از ۱۰۰ هرتز)، شامل دو بخش هستند؛ الف- رسانش الکترولیتی از طریق سیال پرکننده‌ی منافذ به هم پیوسته ب- رسانش و قطبش مرتبط با سطح دانه که از طریق دولایه‌ی الکتریکی در سطح منافذ به هم پیوسته رخ می‌دهد (Vinegar and Waxman, 1984):

$$\sigma^* = \sigma_{el}^* + \sigma_{surf}^*. \quad (6)$$

رسانایی الکتریکی حقیقی (σ') یک محیط متخلخل بدون ذره‌ی فلزی در فرکانس‌های پایین (کمتر از ۱۰۰ هرتز) حاصل مجموع سیال پرکننده‌ی منافذ و مهاجرت یونی در دولایه‌ی الکتریکی تشکیل شده در فصل مشترک سیال-دانه است. رسانایی الکترولیتی (σ_{el}) و رسانایی سطحی (σ_{surf}') به موازات یکدیگر عمل کرده و در نتیجه رسانایی الکتریکی حقیقی به صورت زیر بیان می‌شود (Vinegar and Waxman, 1984):

$$\sigma' = \sigma_{el} + \sigma_{surf}' = \left(\frac{1}{F} \right) (\sigma_f + \sigma_{surf}'), \quad (7)$$

که F فاکتور سازندی الکتریکی (بدون واحد)، σ_f رسانایی سیال پرکننده‌ی منافذ (S/m) و σ_{surf}' رسانایی سطحی (S/m) است. در صورتی که رسانایی مجازی تنها با رسانایی سطحی در فرکانس‌های پایین مرتبط است (Weller and Slater, 2012):

$$\sigma'' = \sigma_{surf}''. \quad (8)$$

این مقاله به مطالعه‌ی تأثیر شوری بر روی رسانایی مجازی که به صورت مستقیم با قطبش سطحی مرتبط است، می‌پردازد.

Weller et al. (2010b) با استفاده از رابطه‌ی خطی بین σ'' و S_{por} مشاهده شده بر روی داده‌هایشان، پارامتری را به عنوان قطبش‌پذیری سطحی (C_p) معرفی کردند:

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۴، شماره ۲، ۱۳۹۷.

ویژگی‌های هیدرولوژیکی نمونه‌ها در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. مقایسه‌ی بین ماسه‌سنگ پنیس و ماسه‌سنگ سنت‌بیز نشان می‌دهد که ماسه‌سنگ پنیس تراواتر از ماسه‌سنگ سنت‌بیز است. اندازه‌گیری‌های فیزیکی و پتروفیزیکی زیر بر روی نمونه‌ها انجام شده است:

- ۱- توزیع اندازه‌ی داده‌ها با استفاده از دستگاه پراش لیزری
 - ۲- اندازه‌گیری تراوایی با استفاده از تراوایی سنج گازی
 - ۳- تعیین تخلخل
 - ۴- اندازه‌گیری ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) با استفاده از اشباع کردن مکان‌های تبادل با سدیم توسط محلول استات سدیم و تعمیم سدیم مبادله شده با استفاده از دستگاه جذب اتمی.
 - ۵- اندازه‌گیری مساحت سطح منافذ با استفاده از جذب سطحی گاز نیتروژن توسط روش BET. روش BET به برآورد دقیق مساحت سطح مخصوص منافذ مواد توسط جذب سطحی چندلایه‌ی گاز نیتروژن به عنوان تابعی از فشار متوسط می‌پردازد.
 - ۶- اندازه‌گیری فاکتور سازندی ذاتی.
- اندازه‌گیری‌های قطبش القایی طیفی در چهار درجه‌ی شوری مختلف.

به منظور انجام اندازه‌گیری‌های قطبش القایی طیفی، تمام نمونه‌ها در ابتدا با محلول کلرید سدیم با پایین‌ترین رسانایی (۱۰۰ میلی‌زیمنس بر متر برای نمونه‌های مخزن نفتی و ۰/۰۵۷ زیمنس بر متر) اشباع شده‌اند. امپدانس الکتریکی با استفاده از آرایش الکترودی چهار نقطه انجام شد (شکل ۲- الف). دو سیم‌پیچ نقره‌ای به عنوان الکترودهای جریان برای تزریق جریان متناوب استفاده شده است (شکل ۲- ب). ولتاژ و اختلاف فاز بین جریان تزریق شده و ولتاژ اندازه‌گیری شده با استفاده از الکترودهای پلاریزه‌نشو (Ag-AgCl) تعیین شده است (شکل ۲- ج). اندازه‌گیری‌های الکتریکی به وسیله دستگاه امپدانس متر ZEL-SIP04-V02 در محدوده‌ی فرکانسی ۲ میلی‌هرتز تا ۴۵ کیلوهرتز انجام شده است (Zimmermann et al., 2008). شکل ۲ یک مجموعه آزمایشگاهی اندازه‌گیری‌های قطبش القایی طیفی را نشان می‌دهد. پس از انجام اندازه‌گیری‌های قطبش القایی طیفی در پایین‌ترین میزان شوری، به منظور تمیز کردن نمونه‌ها، با آب مقطر تحت شرایط خلأ، دوبار اشباع و سپس خشک شدند. در مراحل بعدی، رسانایی سیال اشباع کننده‌ی منافذ به تدریج افزایش یافته و سپس اندازه‌گیری قطبش القایی طیفی بر روی نمونه‌ها انجام شده است.

است. m بارپذیری و τ زمان رهایی یا ثابت زمانی برحسب ثانیه است. ω نیز فرکانس زاویه‌ای است؛ که برابر با $2\pi f$ است.

۲-۲- فرایند آزمایشگاهی

این مقاله به مطالعه‌ی روابط بین ویژگی‌های هیدرولیکی و الکتریکی ۳۰ نمونه‌ی مغزه‌ی برداشت شده از یکی از میدان‌های نفتی ایران در حوضه‌ی خلیج فارس و ۷ نمونه‌ی ماسه‌سنگ برداشت شده از آبخوان ماسه‌سنگی پرموتریاس واقع در حوضه‌ی ایدن در شمال غرب انگلستان (Eden Catchment) می‌پردازد. آبخوان‌های عمده‌ی حوضه‌ی ایدن از جنس ماسه‌سنگ‌های پرمو-تریاس هستند (Allen et al., 2010). آب زیرزمینی این آبخوان‌های ماسه‌سنگی به رودخانه ایدن تخلیه می‌شود و از سال ۱۹۰۶ مورد استخراج قرار گرفته و پیش‌بینی می‌شود که در آینده نیز به‌طور گسترده مورد برداشت قرار گیرد (Butcher et al., 2003). سازندهای ماسه‌سنگی این حوضه (ماسه‌سنگ سنت بیز (St. Bees Sandstone) و ماسه‌سنگ پنیس (Sandstone Penrith)) دارای منشأ مشابهی بوده و از لحاظ سنگ‌شناسی در محدوده‌ی آرکوزهای لیتومی تا آرنیت‌های کوارتزی همراه با رس و میکا قرار می‌گیرند. ماسه‌سنگ سنت بیز دارای رنگ قرمز-قهوه‌ای یا خاکستری بوده و عمدتاً شامل دانه‌های بسیار ریز تا متوسط است (Allen et al. 1997). این ماسه‌سنگ‌ها همچنین دارای لنزهای پراکنده‌ی مادستون و سیلت هستند. ضخامت ماسه‌سنگ سنت بیز در حوضه‌ی ایدن ۳۵۰ متر است؛ که جزء ماسه‌سنگ‌های سخت یا بسیار سخت که توسط ترکیبی از کلسیت، سیلیکا و اکسید آهن سیمان شده‌اند، دسته‌بندی می‌شود (Allen et al. 1997). ماسه‌سنگ پنیس عمدتاً همگن بوده و شامل دانه‌های کوارتزی کروی خوب گرده شده است (Lovell et al., 2006). این ماسه‌سنگ‌ها با یک لایه‌ی غبار قرمز رنگ پوشیده شده و دارای اکسید یا هیدروکسید آهن در سطح هستند. این نوع ماسه‌سنگ معمولاً به رنگ قرمز قهوه‌ای تا قرمز آجری است و دارای لایه‌های نازکی از مادستون و قطعات بزرگ آهک‌های دولومیتی است (Lovell et al., 2006).

نمونه‌های مورد مطالعه از مغزه‌های حفاری استخراج شده‌اند. متوسط طول و قطر نمونه‌های برداشت شده از مخزن نفتی به ترتیب ۶۰ و ۳۸ میلی‌متر است. نمونه‌های حاصل از مخزن نفتی از عمق بین ۲۱۷۴ تا ۲۲۳۸ متر برداشت شده و دارای تخلخل و تراوایی نسبتاً بالایی هستند. نمونه‌های آبخوان ماسه‌سنگی دارای قطر ۲۰ میلی‌متر و طول حدود ۴۰ میلی‌متر هستند که؛ از مغزه‌ی برداشت شده از آبخوان به طول ۱۰۰ میلی‌متر استخراج شده‌اند (شکل ۱).

رضوی راد و قربانی، مطالعه‌ی آزمایشگاهی تأثیر شوری بر روی پاسخ قطبش القایی طیفی نمونه‌های ماسه‌سنگ و ماسه، صفحات ۴۰۰-۳۸۷.
جدول ۱: خلاصه‌ی ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده بر روی نمونه‌های ماسه و ماسه‌سنگ برداشت شده از مخزن نفتی.

پارامتر	کمینه	بیشینه	متوسط
تخلخل، ϕ (%)	۲۷/۶۵	۴۱	۳۴/۶۹
تراوایی، k (m^2)	$۴/۸۴ \times 10^{-1۳}$	$۲/۵۶ \times 10^{-11}$	$۱/۰۱ \times 10^{-11}$
نسبت مساحت سطح منافذ به حجم منافذ، S_{por} (μm^{-1})	۰/۴۶	۱۱/۷۸	۲/۰۴
متوسط قطر دانه‌ها، d_{50} (μm)	۱۰۶/۲۷	۴۰۹/۵۷	۲۴۲/۵۱
ظرفیت تبادل کاتیونی، CEC (meq/100g)	۰/۱۹	۱/۷۹	۰/۵۰

جدول ۲: خلاصه‌ی ویژگی‌های فیزیکی اندازه‌گیری شده بر روی نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ماسه‌سنگی.

پارامتر	کمینه	بیشینه	متوسط
تخلخل، ϕ (%)	۱۳/۵۴	۲۷/۴۹	۲۰/۷۱
تراوایی، k (m^2)	$۳/۹۵ \times 10^{-1۷}$	$۳/۶۱ \times 10^{-1۳}$	$۵/۴۸ \times 10^{-1۴}$
نسبت مساحت سطح منافذ به حجم منافذ، S_{por} (μm^{-1})	۱/۶۶	۴/۷۴	۳/۴۹
ظرفیت تبادل کاتیونی، CEC (meq/100g)	۴/۱۵	۹/۲۸	۶/۶۷

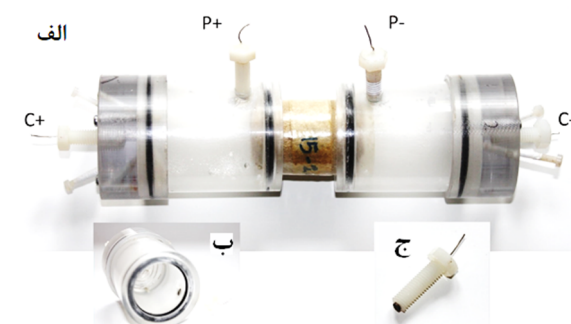
درجه‌ی شوری ۵۷، ۱۱۰، ۱۰۴۸ و ۴۰۳۰ میلی‌زیمنس بر متر) در شکل ۳ نشان داده شده است. منحنی‌های طیفی رسانایی حقیقی نمونه‌های مورد مطالعه، تقریباً موازی هستند. همان‌طور که مورد انتظار است، افزایش جزئی رسانایی حقیقی با افزایش فرکانس برای تمام نمونه‌ها مشاهده می‌شود. همچنین با افزایش میزان رسانایی سیال پرکننده‌ی منافذ (میزان شوری)، میزان رسانایی حقیقی نمونه‌ها افزایش می‌یابد.

شکل ۴ تغییرات رسانایی الکتریکی مجازی (σ'') با تغییر میزان شوری سیال پرکننده‌ی منافذ برای نمونه‌های ماسه‌سنگ و ماسه نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، با افزایش میزان رسانایی سیال پرکننده‌ی منافذ، میزان رسانایی الکتریکی مجازی (σ'') نیز افزایش می‌یابد. با توجه به این‌که نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ماسه‌سنگی حاوی رس هستند، پیک واضحی را نشان می‌دهند. البته نمونه‌های برداشت شده از مخزن نفتی تقریباً تمیز هستند و همان‌طور که مورد انتظار بود، در طیف رسانایی مجازی این نمونه‌ها پیک واضحی مشاهده نمی‌شود.

با توجه به رابطه‌ی ۷، یک رابطه‌ی خطی بین رسانایی الکتریکی حقیقی و رسانایی سیال پرکننده‌ی منافذ مورد انتظار است. شکل ۵ رابطه‌ی خطی مثبت بین رسانایی الکتریکی حقیقی (σ') و رسانایی سیال اشباع کننده منافذ (σ_f) را نشان می‌دهد. برای هر دو نوع نمونه‌ی مورد مطالعه (ماسه‌سنگ و ماسه)، رسانایی الکتریکی حقیقی (σ') به شدت به رسانایی سیال اشباع کننده‌ی نمونه‌ها (σ_f) وابسته است. با توجه به معادله‌ی ۷، شیب نمودار رسانایی الکتریکی حقیقی (σ') در برابر رسانایی سیال اشباع کننده‌ی نمونه‌ها (σ_f) معادل معکوس فاکتور سازندی ذاتی و عرض از مبدأ این نمودار میزان رسانایی سطحی نمونه‌هایی مورد بررسی را به دست می‌دهد.



شکل ۱: نمونه‌های استوانه‌ای آبخوان ماسه‌سنگی با قطر ۲۰ میلی‌متر و طول حدود ۴۰ میلی‌متر که از مغزه‌ی ماسه‌سنگی با قطر ۱۰۰ میلی‌متر استخراج شده‌اند.



شکل ۲: الف- محفظه نگهداری نمونه مورد استفاده برای اندازه‌گیری‌های قطبش القایی طیفی بر روی نمونه‌های ماسه و ماسه‌سنگ. ب- الکترود جریان (سیم پیچ نقره) ج- الکترود پتانسیل پلاریزه نشو (Ag-AgCl).

۳- بحث و نتایج

طیف‌های رسانایی حقیقی (σ') دو نمونه ماسه‌سنگ و دو نمونه ماسه (به عنوان نماینده‌ی ۳۰ نمونه‌ی برداشت شده از یک مخزن نفتی) اشباع شده با محلول کلرید سدیم در چهار درجه‌ی شوری مختلف (۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۶۰۰۰ میلی‌زیمنس بر متر) و همچنین دو نمونه از هفت نمونه‌ی آبخوان ماسه‌سنگی (اشباع شده در چهار

صورت خطی افزایش می‌یابد. همچنین وابستگی فرکانسی (C) این نمونه با افزایش رسانایی الکتریکی سیال به طور جزئی کاهش می‌یابد، در صورتی که وابستگی فرکانسی نمونه‌های دیگر با افزایش رسانایی الکتریکی سیال پرکننده منافذ به‌طور خطی افزایش می‌یابد.

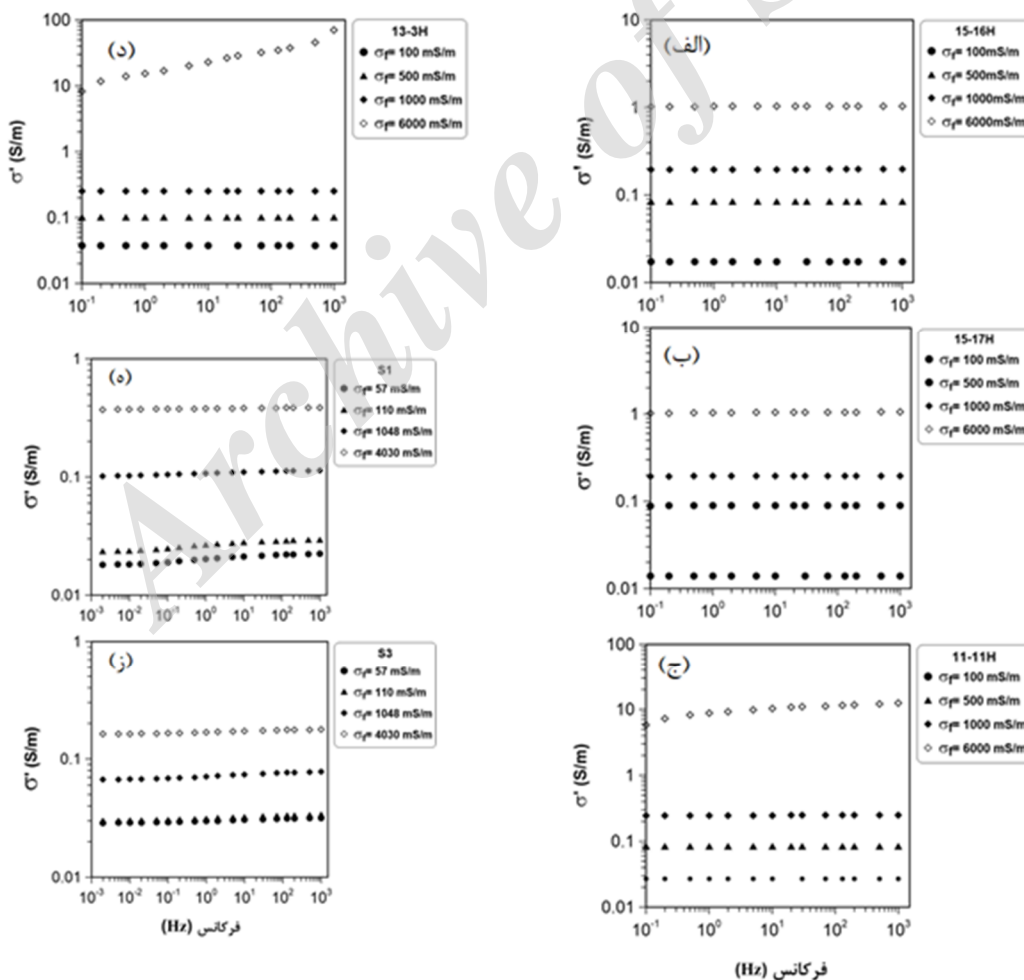
همچنین بارپذیری نرمالیزه شده (m_n) به عنوان اختلاف بین رسانایی الکتریکی حقیقی در بالاترین و پایین‌ترین فرکانس اندازه‌گیری، محاسبه شده است. شکل ۸ رابطه‌ی بین بارپذیری نرمالیزه و رسانایی الکتریکی سیال اشباع کننده منافذ را نشان می‌دهد.

بررسی اثر تغییرات رسانایی سیال پرکننده منافذ نمونه‌ها بر روی پارامترهای تعیین‌کننده قطبش‌پذیری فصل مشترک دانه-سیال بر واحد S_{por} نشان داده است که هر دو پارامتر (C_p و C_s) وابستگی خطی مثبتی به شوری سیال اشباع کننده دارند؛ یعنی C_p و C_s با افزایش شوری سیال و در نتیجه افزایش رسانایی اشباع کننده منافذ، افزایش می‌یابند (شکل‌های ۹ و ۱۰).

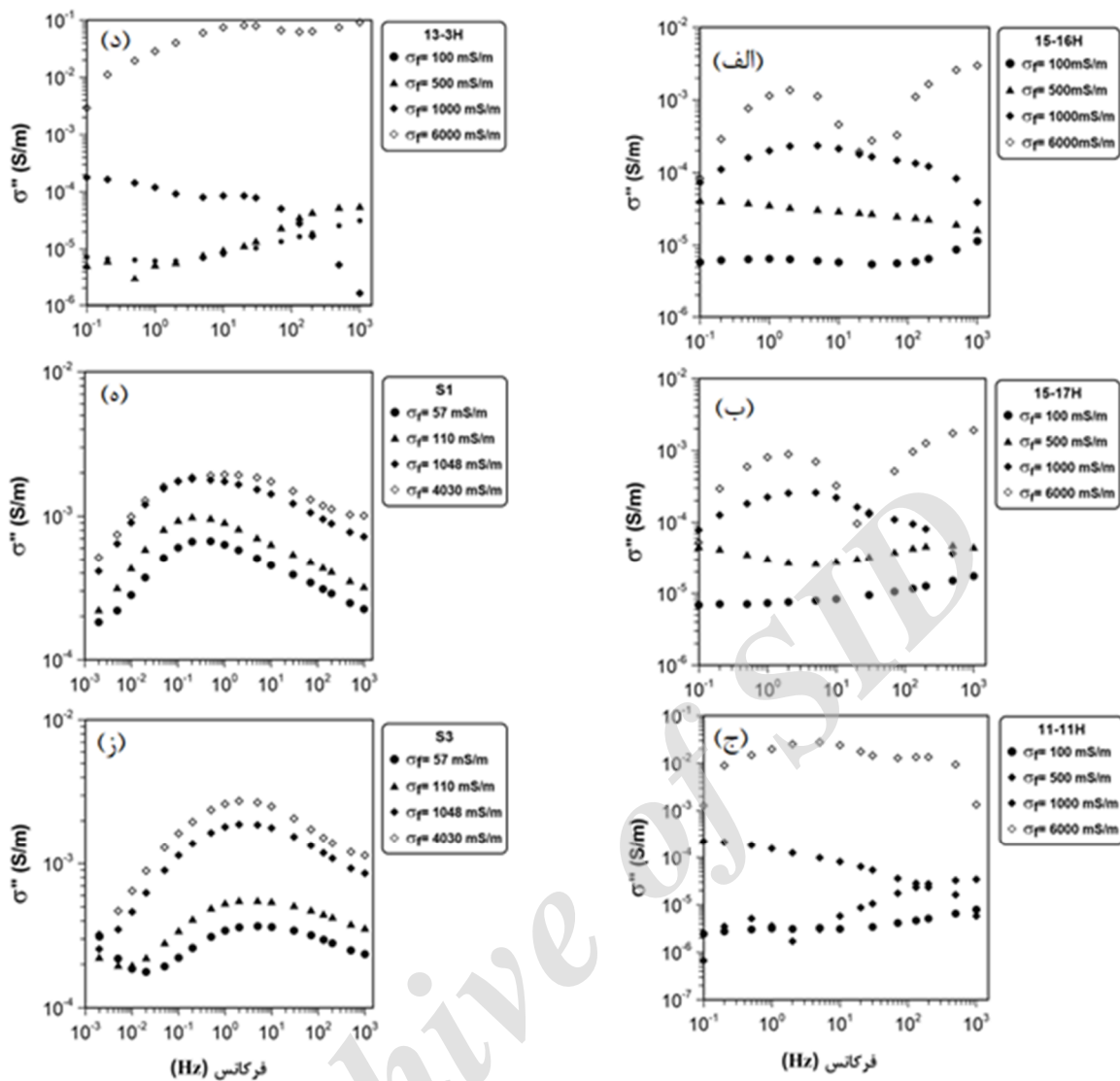
رسانایی الکتریکی مجازی نمونه‌های مورد آزمایش در این مطالعه نیز به عنوان تابعی از رسانایی سیال اشباع کننده منافذ در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، یک روند عمومی مثبت خطی بین رسانایی الکتریکی مجازی نمونه‌ها و رسانایی سیال اشباع کننده منافذ وجود دارد.

همچنین با توجه این‌که رسانایی مجازی نمونه‌های آبخوان ماسه‌سنگی مورد آزمایش پیک‌های واضحی نشان می‌دهند، مدل کول-کول بر روی اندازه‌گیری‌های انجام شده در این مطالعه برازش شد و سپس رابطه‌ی بین پارامترهای حاصل از مدل کول-کول با رسانایی سیال پرکننده منافذ بررسی شد.

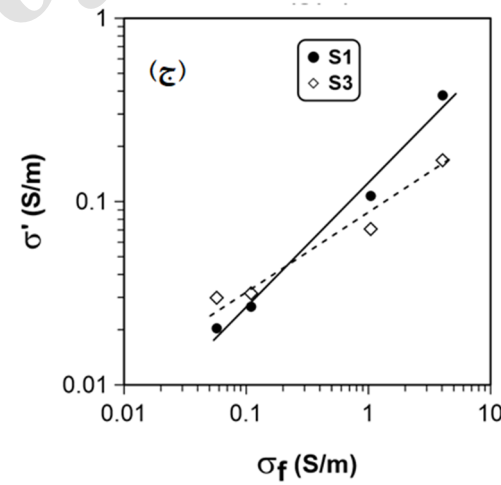
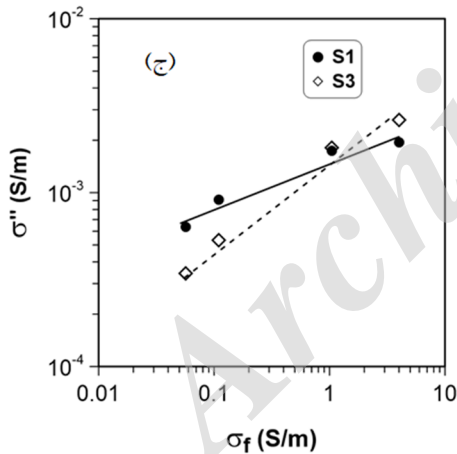
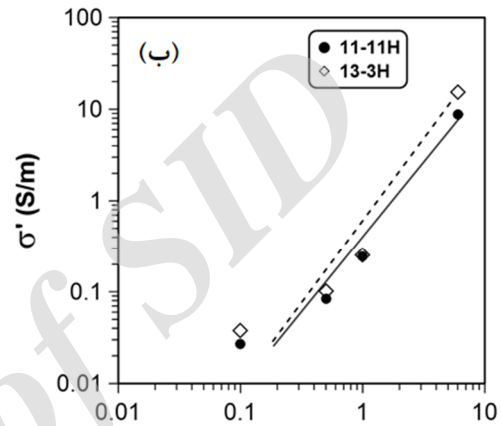
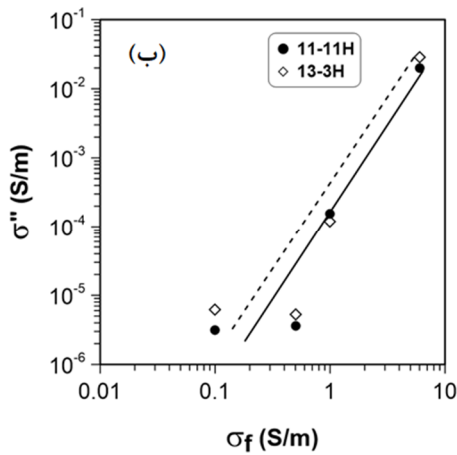
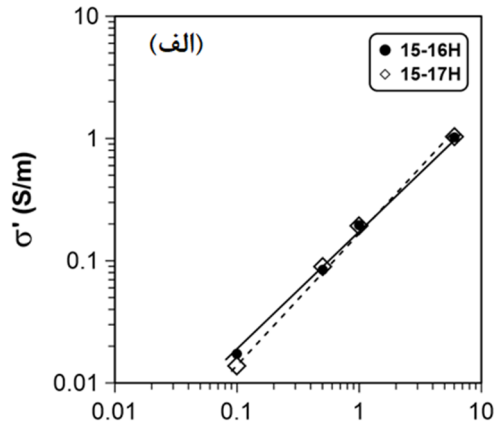
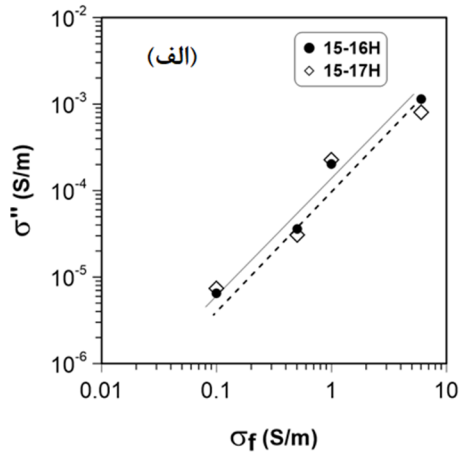
زمان رهایی حاصل از مدل کول-کول یکی از مهم‌ترین پارامترهای پاسخ قطبش القایی طیفی است. بنابراین رابطه‌ی بین زمان رهایی حاصل از برازش کول-کول بر روی اندازه‌گیری‌های انجام شده به عنوان تابعی از رسانایی سیال اشباع کننده منافذ برای نمونه‌های ماسه‌سنگ در شکل ۷-ج نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، زمان رهایی برای تمام نمونه‌ها به جزء یکی از نمونه‌ها (S1) با رسانایی الکتریکی سیال پرکننده منافذ، به



شکل ۳: تغییرات طیف‌های رسانایی حقیقی (σ') با رسانایی سیال اشباع کننده منافذ (σ_f) الف و ب - دو نمونه‌ی ماسه‌سنگ برداشت شده از مخزن نفتی. ج و د - دو نمونه‌ی ماسه‌ی برداشت شده از مخزن نفتی. ه و ز - دو نمونه ماسه‌سنگ برداشت شده از آبخوان ماسه‌سنگی.

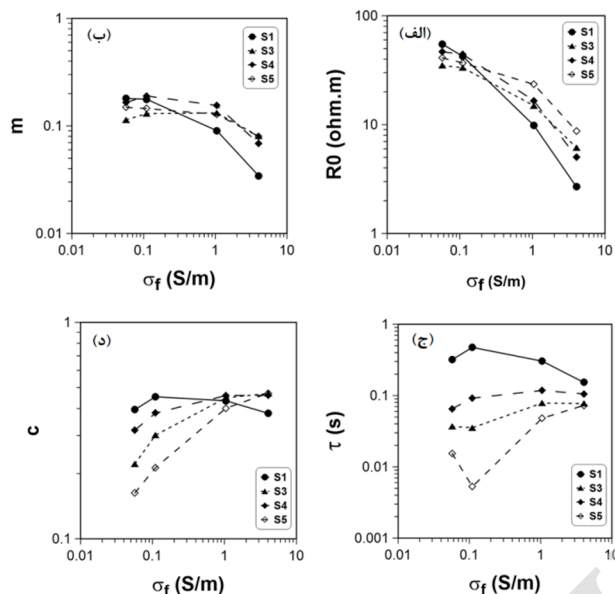


شکل ۴: تغییرات طیف‌های رسانایی مجازی (σ'') با رسانایی سیال اشباع کننده‌ی منافذ (σ_f) الف و ب - دو نمونه‌ی ماسه‌سنگ برداشت شده از مخزن نفتی. ج و د - دو نمونه‌ی ماسه‌ی برداشت شده از مخزن نفتی. ه و ز - دو نمونه ماسه‌سنگ برداشت شده از آبخوان ماسه‌سنگی.

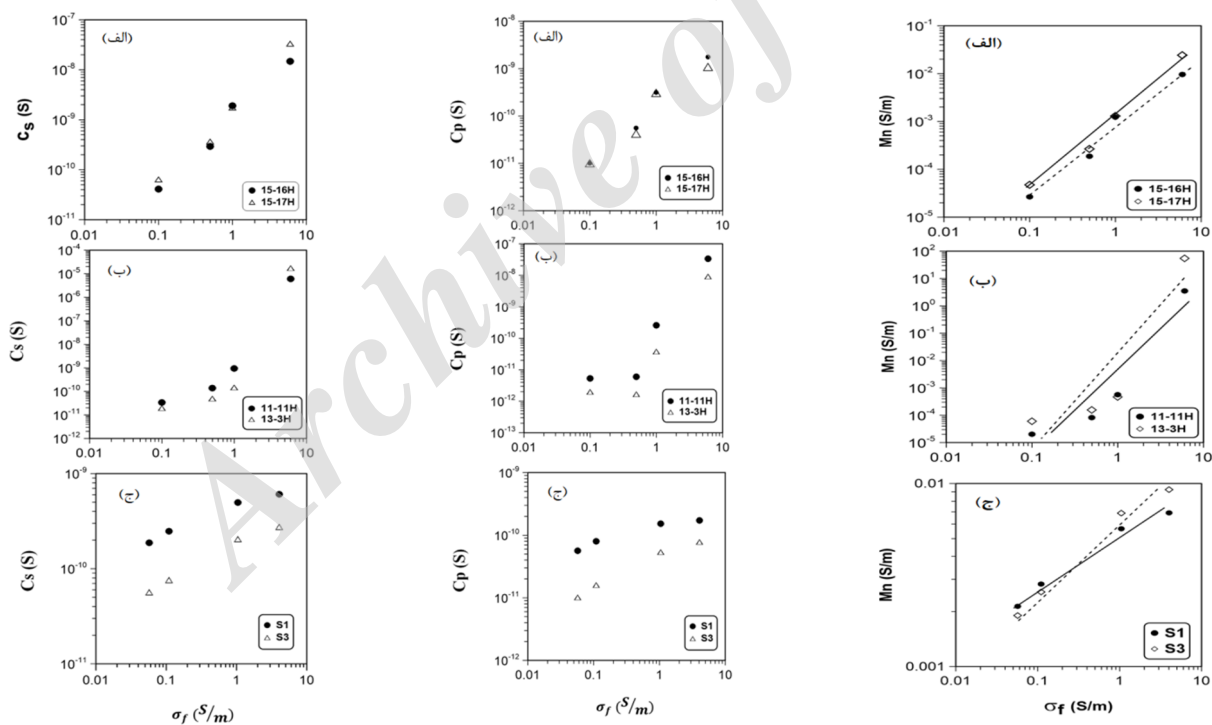


شکل ۶: تغییرات رسانایی مجازی (σ'') در فرکانس یک هرتز با رسانایی سیال اشباع کننده‌ی منافذ الف - دو نمونه‌ی ماسه‌سنگ برداشت شده از مخزن نفتی. ب - دو نمونه‌ی ماسه‌ی برداشت شده از مخزن نفتی. ج - دو نمونه ماسه‌سنگ برداشت شده از آبخوان ماسه‌سنگی.

شکل ۵: تغییرات رسانایی حقیقی (σ') در فرکانس یک هرتز با رسانایی سیال اشباع کننده‌ی منافذ الف - دو نمونه‌ی ماسه‌سنگ برداشت شده از مخزن نفتی. ب - دو نمونه‌ی ماسه‌ی برداشت شده از مخزن نفتی. ج - دو نمونه ماسه‌سنگ برداشت شده از آبخوان ماسه‌سنگی.



شکل ۷: تغییرات پارامترهای حاصل از برازش مدل کول-کول بر روی اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی نمونه‌های برداشت شده از آبخوان ماسه-سنگی. الف- تغییرات مقاومت ویژه (R_0) با رسانایی الکتریکی سیال ب- تغییرات بارپذیری (m) با رسانایی الکتریکی سیال ج- تغییرات زمان رهایی (τ) با رسانایی الکتریکی سیال د- تغییرات وابستگی فرکانسی (C) با رسانایی الکتریکی سیال.



شکل ۱۰: رابطه‌ی بین C_s با رسانایی الکتریکی سیال پرکننده‌ی منافذ برای الف- دو نمونه‌ی ماسه‌سنگ برداشت شده از مخزن نفتی. ب- دو نمونه‌ی ماسه‌ی برداشت شده از مخزن نفتی. ج- دو نمونه ماسه‌سنگ برداشت شده از آبخوان ماسه‌سنگی.

شکل ۹: رابطه‌ی بین C_p با رسانایی الکتریکی سیال پرکننده‌ی منافذ برای الف- دو نمونه‌ی ماسه‌سنگ برداشت شده از مخزن نفتی. ب- دو نمونه‌ی ماسه‌ی برداشت شده از مخزن نفتی. ج- دو نمونه ماسه‌سنگ برداشت شده از آبخوان ماسه‌سنگی.

شکل ۸: رابطه‌ی بین بارپذیری نرمالیزه (M_n) با رسانایی الکتریکی سیال پرکننده‌ی منافذ برای الف- دو نمونه‌ی ماسه‌سنگ برداشت شده از مخزن نفتی. ب- دو نمونه‌ی ماسه‌ی برداشت شده از مخزن نفتی. ج- دو نمونه ماسه‌سنگ برداشت شده از آبخوان ماسه‌سنگی.

۵- سپاس‌گزاری

تمام آزمایش‌های انجام شده در این پروژه در دانشگاه لنکستر انگلستان (Lancaster Environment Centre, Lancaster University) به راهنمایی پروفیسور اندرو بینلی (Prof. Andrew Binley) انجام شده است؛ به همین دلیل از ایشان قدردانی و سپاسگزاری می‌گردد. همچنین قدردان مهندس دیوید لویز (David Lewis)، تکنسین آزمایشگاه دانشگاه لنکستر، برای ساخت محل نگهداری نمونه مورد استفاده برای انجام آزمایش‌هاست. از شرکت نفت فلات قاره تهران نیز به دلیل تأمین نمونه‌های مورد نیاز برای این پروژه قدردانی می‌گردد.

۶- منابع

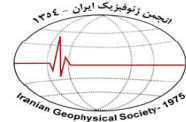
- Allen, D.J., Brewerton, L.J., Coleby, L.M., Gibbs, B.R., Lewis, M.A., MacDonald, A.M., Wagstaff, S.J. and Williams, A.T., 1997, The physical properties of major aquifers in England and Wales. British Geological Survey Technical Report WD/97/34, Environment Agency R&D Publication 8.
- Allen, D.J., Newell, A.J. and Butcher, A.S., 2010, Preliminary review of the geology and hydrogeology of the Eden DTC sub-catchments, British Geological Survey Open Report. OR/10/063, 45 P.
- Archie, G.E., 1942, The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics: Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, 146, 54-62.
- Atekwana, A. and Slater, L., 2009, Biogeophysics: a new frontier in Earth science research, Rev. Geophys., 47, RG4004, doi:10.1029/2009RG000285.
- Binley, A. and Kemna, A., 2005, DC resistivity and induced polarization methods, in Hydrogeophysics, Chapter 5, pp. 129-156, eds Rubin, Y. & Hubbard, S., Springer, The Netherlands.
- Binley, A., Cassiani, G. and Deiana, R., 2010, Hydrogeophysics: opportunities and challenges, Boll. di Geofis. Teor. ed Appl., Vol. 51, No. 4.
- Bol'ève, A., Crespy, A., Revil, A., Janod, F. and Mattiuzzo, J.L., 2007, Streaming potentials of granular media: influence of the Dukhin and Reynolds numbers, J. geophys. Res., 112, B08204, doi:10.1029/2006JB004673.
- Börner, F., 2009, Complex conductivity measurements. In Groundwater Geophysics (pp. 119-153). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Börner, F., Gruhne, M. and Schön, J., 1993, Contamination indications derived from electrical properties in the low frequency range, Geophysical

۴- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه نشان داده است که شیمی سیال یکی از عوامل مؤثر بر قطبش فصل مشترک دانه-سیال است. بزرگی قطبش یک پارامتر کلیدی مدل‌های مختلف برای تعیین مساحت سطح مخصوص و ویژگی‌های هیدرولیکی محیط متخلخل (مانند تراوایی) از اندازه‌گیری‌های قطبش القایی است. بارپذیری نرمالیزه (m_n) و رسانایی الکتریکی حقیقی و مجازی (σ' و σ'') اندازه‌گیری شده برای هر دو نوع نمونه‌ی تمیز و حاوی رس رابطه‌ی توانی مثبتی با شوری سیال نشان دادند. به عبارت دیگر با افزایش رسانایی الکتریکی سیال پرکننده‌ی منافذ، رسانایی الکتریکی حقیقی و مجازی (σ' و σ'') و بارپذیره نرمالیزه‌ی نمونه‌ها (m_n) افزایش می‌یابد. قطبش‌پذیری فصل مشترک دانه-سیال بر واحد S_{por} (پارامترهای C_p و C_s) مفهومی است که اختلاف بین بزرگی قطبش (σ' یا m_n) بین نمونه‌های با میزان یکسان S_{por} را توضیح می‌دهد. بنابراین به منظور توصیف وابستگی قطبش سطحی به رسانایی الکتریکی سیال، پارامتر قطبش‌پذیری فصل مشترک دانه-سیال بر واحد S_{por} (C_s و C_p) نیز به در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که پارامترهای قطبش‌پذیری (C_p و C_s) که قبلاً توسط یک رابطه‌ی خطی بین پارامترهای قطبش القایی (m_n و σ'') و S_{por} توصیف شده‌اند، کاملاً به رسانایی سیال اشباع‌کننده‌ی منافذ وابسته هستند. بیشترین مقادیر C_p و C_s در شوری‌های بالا مشاهده شده‌اند؛ که شاهده‌ی بر بیشینه‌ی قطبش‌پذیری کوارتز غالب ماسه‌های سیلیسی است. بارپذیری نرمالیزه، یک رابطه‌ی توانی مثبت با رسانایی الکتریکی سیال اشباع‌کننده‌ی منافذ نشان می‌دهد. به منظور تعیین زمان رهایی (τ) داده‌های طیفی، مدل کول-کول بر روی اندازه‌گیری‌های انجام شده در چهار درجه‌ی شوری مختلف بر روی نمونه‌های آبخوان ماسه‌سنگی برآزش شد. زمان رهایی حاصل از مدل کول-کول برای تعدادی از نمونه‌ها به‌طور خطی با افزایش رسانایی الکتریکی سیال پرکننده‌ی منافذ افزایش می‌یابد. هر چند برای دو نمونه زمان رهایی با افزایش رسانایی سیال اشباع‌کننده‌ی منافذ، کاهش نشان می‌دهد. این کاهش ممکن است به دلیل متفاوت بودن اندازه‌ی منافذ این دو نمونه از دیگر نمونه‌های مورد آزمایش باشد. با توجه به اینکه اندازه‌ی دانه‌ها و در نتیجه اندازه‌ی منافذ رابطه‌ی مستقیمی با زمان رهایی دارند؛ یعنی اندازه‌ی منافذ بزرگ‌تر منتج به زمان رهایی بزرگ‌تر می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت رفتار این دو نمونه با سایر نمونه‌ها ناشی از تفاوت در اندازه‌ی منافذ این نمونه‌ها است. همچنین اختلاف در محتوی رس موجود در فضای منفذی نیز منجر به تفاوت در میزان زمان‌های رهایی نمونه‌ها می‌شود.

- water-saturated packs of glass beads: *Journal of Colloid and Interface Science*, 321 (1), 103-117.
- Lesmes, D.P. and Frye, K.M., 2001, Influence of pore fluid chemistry on the complex conductivity and induced polarization responses of Berea sandstone, *J. geophys. Res.*, 106 (B3), 4079-4090.
- Lesmes, D.P. and Morgan, F.D., 2001, Dielectric spectroscopy of sedimentary rocks, *Journal of Geophysical Research*, 106, 13329-13346.
- Lovell, M.A., Jackson, P.D., Harvey, P.K. and Flint, R.C., 2006, High-resolution petrophysical characterization of samples from an Aeolian sandstone: the Permian Penrith sandstone of NW England. In: Barker, R.D. and Tellam, J.H. (eds.) *Fluid flow and solute movement in sandstones: The onshore UK Permo-Triassic red bed sequence*. London, Geological Society of London, pp. 49-65.
- Marshall, D.J. and Madden, T.R., 1959, Induced polarization, a study of its causes, *Geophysics*, 24, 790-816.
- Müller, K., Vanderborght, J., Englert, A., Kemna, A., Huisman, J.A., Rings, J. and Vereecken, H., 2010, Imaging and characterization of solute transport during two tracer tests in a shallow aquifer using electrical resistivity tomography and multilevel groundwater samplers, *Water Resour. Res.*, 46, W03502, doi:10.1029/2008WR007595.
- Olhoeft, G.R., 1985, Low-frequency electrical properties, *Geophysics*, 50, 2492-2503.
- Osterman, G., Keating, K., Binley, A. and Slater, L., 2016, A laboratory study to estimate pore geometric parameters of sandstones using complex conductivity and nuclear magnetic resonance for permeability prediction: *Water Resources Research*, 52, 4321-4337.
- Pollock, D. and Ciproka, O.A., 2008, Temporal moments in geoelectrical monitoring of salt tracer experiments, *Water Resour. Res.*, 44, W12416, doi:10.1029/2008WR007014.
- Revil, A. and Florsch, N., 2010, Determination of permeability from spectral induced polarization data in granular media, *Geophys. J. Int.*, 181, 1480-1498, doi:10.1111/j.1365-246X.2010.04573.x.
- Revil, A., Binley, A., Mejus, L. and Kessouri, P., 2015, Predicting permeability from the characteristic relaxation time and intrinsic formation factor of complex conductivity spectra. *Water Resources Research*, 51, 6672-6700.
- Revil, A., Koch, K. and Holliger, K., 2012, Is it the grain size or the characteristic pore size that controls the induced polarization relaxation time of clean sands and sandstones? *Water Resources Research*, 48, W05602. <https://doi.org/10.1029/2011WR011561>.
- Prospecting, 41, 83-98.
- Börner, F.D., 1992, Complex conductivity measurements of reservoir properties, in *Proceedings of the Third European Core Analysis Symposium*, Paris, pp. 359-386.
- Butcher, A.S., Lawrence, A.R., Jackson, C., Cunningham, J., Cullis, E., Hasan, K. and Ingram, J., 2003, Investigation of rising nitrate concentrations in groundwater in the Eden valley, Cumbria: Phase 1 Project Scoping Study. A joint project by the British Geological Survey and the Environment Agency. NGCLC Report-Project NC/00/24/14.
- Cassiani, G., Kemna, A. and Villa, A., 2009, Spectral induced polarization for the characterization of free-phase hydrocarbon contamination of sediments, *Near Surf. Geophys.*, 7, (5-6), 547-562.
- Cole, K.S. and Cole, R.H., 1941, Dispersion and absorption in dielectrics. I. Alternating current characteristics, *J. Chem. Phys.*, 9, 341-351.
- de Lima, O.A.L. and Niwas, S., 2000, Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstone aquifers from geoelectrical measurements, *Journal of Hydrology*, 235, 12-26.
- Hördt, A., Blaschek, R., Kemna, A. and Zisser, N., 2007, Hydraulic conductivity estimation from induced polarisation data at the field scale—the Krauthausen case history, *J. appl. Geophys.*, 62, 33-46.
- Hubbard, S.S. and Rubin, Y., 2000, Hydrogeological parameter estimation using geophysical data: a review of selected techniques, *Journal of Contaminant Hydrology*, 45 (1-2), 3-34.
- Jardani, A., Revil, A., Barrash, W., Crespy, A., Rizzo, E., Straface, S. and Johnson, T. (2009). Reconstruction of the water table from self-potential data: A Bayesian approach, *Groundwater*, 47 (2), 213-227.
- Jonscher, A.K., 1981, A new understanding of the dielectric relaxation of solids, *J. Mat. Sci.*, 16, 2037-2060.
- Kemna, A., 2000, Tomographic inversion of complex resistivity: theory and application, PhD Thesis. Bochum University, 196 P.
- Kemna, A., Münch, H.M., Titov, K., Zimmermann, E. and Vereecken, H., 2005, Relation of SIP relaxation time of sands to salinity, grain size and hydraulic conductivity, in *Proceedings of the 11th European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*, Extended Abstracts: Near Surface 2005, P054.
- Leroy, P., Revil, A., Kemna, A., Cosenza, P. and Ghorbani, A., 2008, Complex conductivity of

- conductivity spectra of sandstones: *Geophysics*, 76 (5), F315–F327.
- Weller, A., Nordsiek, S. and Debschütz, W., 2010a, Estimating permeability of sandstone samples by nuclear magnetic resonance and spectral-induced polarization, *Geophysics*, 75 (6), E215–E226.
- Weller, A., Slater, L., Binley, A., Nordsiek, S. and Xu, S., 2015, Permeability prediction based on induced polarization: Insights from measurements on sandstone and unconsolidated samples spanning a wide permeability range, *Geophysics*, 80, D161–D173.
- Weller, A., Slater, L., Nordsiek, S. and Ntarlagiannis, D., 2010b, On the estimation of specific surface per unit pore volume from induced polarization: A robust empirical relation fits multiple datasets, *Geophysics*, 75 (4), WA105–WA112.
- Williams, K.E., 2007, Method and system for combining seismic data and basin modeling, U.S. Patent No. 7,280,918. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Williams, K.H. et al., 2009. Geophysical monitoring of microbial activity during stimulated subsurface bioremediation, *J. Environ. Sci. Technol.*, 43(17), 6717–6723, doi:10.1021/es900855.
- Williams, K.H., Kemna, A., Wilkins, M.J., Druhan, J., Arntzen, E., N'Guessan, A.L. and Banfield, J.F., 2009, Geophysical monitoring of coupled microbial and geochemical processes during stimulated subsurface bioremediation. *Environmental science & technology*, 43 (17), 6717-6723.
- Zhou, B., 1992, Discussion on: "The use of Hartley transform in geophysical applications", R. Saatçilar, S. Ergintav, and N. Canitez, authors, *Geophysics*, 57, 196-197.
- Zimmermann, E., Kemna, A., Berwix, J., Glaas, W., Münch, H.M. and Huisman, J.A., 2008, A high-accuracy impedance spectrometer for measuring sediments with low polarizability. *Measurement Science and Technology*, 19 (10), 105603.
- Zisser, N., Kemna, A. and Nover, G., 2010, Relationship between low-frequency electrical properties and hydraulic permeability of low-permeability sandstone, *Geophysics*, 75 (3), E131–E141.
- Rink, M. and Schopper, J.R., 1974, Interface conductivity and its implication to electric logging, *Transactions of the SPWLA 15th Annual Logging Symposium*, Paper J.
- Robinson, D.A., 2008, Advancing process-based watershed hydrological research using near-surface geophysics: A vision for, and review of, electrical and magnetic geophysical methods, *Hydrol. Process.*, 22 (18), 3604-3635.
- Robinson, J., Slater, L., Weller, A., Keating, K., Robinson, T., Rose, C. and Parker, B., 2018, On permeability prediction from complex conductivity measurements using polarization magnitude and relaxation time, *Water Resources Research*, 54 (5), 3436-3452.
- Schmutz, M., Revil, A., Vaudelet, P., Batzle, M., Femenía Viñao, P. and Werkema, D.D., 2010, Influence of oil saturation upon spectral induced polarization of oil bearing sands, *Geophys. J. Int.*, 183, 211-224.
- Slater, L. and Lesmes, D., 2002, Electrical-hydraulic relationships observed for unconsolidated sediments, *Water Resour. Res.*, 38 (10), 1213.
- Slater, L.D. and Glaser, D.R., 2003, Controls on induced polarization in sandy unconsolidated sediments and application to aquifer characterization, *Geophysics*, 68, 1547-1558.
- Sturrock, J.T., Lesmes, D.P. and Morgan, F.D., 1999, Permeability estimation using spectral induced polarization measurements, *Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP)*, Oakland.
- Titov, K., Komarov, V., Tarasov, V. and Levitski, A., 2002, Theoretical and experimental study of time domain induced polarization in water-saturated sands, *J. appl. Geophys.*, 50, 417-433.
- Vanhala, H., 1997, Mapping oil-contaminated sand and till with spectral induced polarization (SIP) method, *Geophysical Prospecting*, 45, 303-326.
- Vinegar, H.J. and Waxman, M.H., 1984, Induced polarization of shaly sands, *Geophysics*, 49, 1267-1287.
- Weller, A. and Börner, F.D., 1996, Measurements of spectral induced polarization for environmental purposes, *Environmental Geology*, 27, 329-334.
- Weller, A., Breede, K., Slater, L. and Nordsiek, S., 2011, Effect of changing water salinity on complex



Laboratory study of effect of changing water salinity on spectral induced polarization response of sandstone and sand samples

Fatemeh Razavirad¹ and Ahmad Ghorbani^{2*}

1- Ph.D. Student, Mining and Metallurgical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran

2- Associate Professor, Mining and Metallurgical Engineering Department, Yazd University, Yazd, Iran

Received: 18 June 2018; Accepted: 14 August 2018

* Corresponding author: aghorbani@yazd.ac.ir

Keywords

Spectral Induced Polarization
Salinity
Imaginary Conductivity
Normalized Chargeability
Relaxation Time
Cole-Cole Model
Fluid Conductivity

Extended Abstract

Summary

In this study, the influence of pore fluid salinity on the complex electrical conductivity responses of sandstone and sand samples is analyzed. The investigated samples in this study include clean sandstone and sand samples provided by an Iranian offshore oil company and sandstone samples containing clay minerals that have taken from a sandstone aquifer located in northwest of England. All samples have been saturated with sodium chloride solution. The fluid electrical conductivity (σ_f) of sodium chloride solution has gradually been increased from 57 mS/m to 6000 mS/m. The expected linear

relation between σ_f and the real component of electrical conductivity (σ') of the saturated samples has been observed. It is also observed that the imaginary component (σ'') increases with the increase of salinity, and consequently, the increase of fluid conductivity. To determine the relaxation time (τ) of spectral induced polarization (SIP) data, Cole-Cole model has been fitted on the measurements carried out at four different salinities of sandstone aquifer samples. The Cole-Cole relaxation time increases with the increase of fluid conductivity for all samples except two samples. The behavior of σ'' is also comparable to M_n as both parameters measure the polarizability. In other words, normalized chargeability also increases with the increase of fluid salinity. In this study, the dependence of polarizability on fluid salinity is also demonstrated. Maximum values of polarizability are observed at high salinity for quartz dominated siliceous material.

Introduction

The induced polarization (IP) geophysical method measures the low-frequency electrical properties of rocks and soil materials. This method has appeared as a potentially powerful tool for subsurface imaging due to the dependence of the measurements on rock or soil internal surface area. Given the increasing interest in using IP measurements to deduce rock textural properties such as permeability, further studies of the dependence of IP measurements on pore fluid composition are needed. In SIP, a phase lag between the current and the electrical field provides complementary information to electrical conductivity measurements. The conductivity and the phase can be rewritten into a complex conductivity (or a complex resistivity) that can be measured over a broad range of frequencies, typically from 1 mHz to few tens of kHz in the laboratory and from 10 mHz to 10–100 Hz in the field.

Methodology and Approaches

SIP measurements were collected in a fully saturated state for each sample at four different salinities. All samples were saturated with a NaCl solution starting with the lowest salinity and then fluid electrical conductivity (σ_f) of sodium chloride solution was gradually increased from 57 mS/m to 6000 mS/m. The electrical impedance was measured using a four-electrode array. Two silver coils were used as current electrodes to inject an alternating sinusoidal current. The voltage and the phase shift between the applied current and measured voltage was determined using Ag-AgCl non-polarized potential electrodes. Electrical measurements were taken using the ZEL-SIP04-V02 impedance meter in a frequency range of 2 mHz to 45 kHz (Forschungszentrum Julich GmbH).

Results and Conclusions

Our investigation has shown that the fluid chemistry is an important parameter that controls the polarizability of the mineral-fluid interface. Real and imaginary components of conductivity increase with the increase of saturating fluid conductivity. It has also been demonstrated that normalized chargeability show a positive power law relationship with fluid conductivity. The results of Cole-Cole model fitted on data have indicated that relaxation time increases with salinity for all samples except two samples. We have also shown that polarizability parameters are controlled by fluid conductivity.