

## اثر پارامترهای موثر بر جفت‌شدگی الکترومغناطیس در مطالعات قطبش القایی بسامدی

کاظم ملک پور دهکردی<sup>1</sup> و احمد قربانی<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

<sup>2</sup> استادیار، دانشکده معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

(تاریخ دریافت: 94/05/19، تاریخ پذیرش: 95/03/10)

چکیده

روش قطبش القایی، روش ژئوفیزیکی اصلی در اکتشاف کانسارهای پورفیری است. روش قطبش القایی طیفی به‌عنوان شاخه‌ای از روش قطبش القایی، به‌دلیل ارائه اطلاعات بیش‌تر در ارتباط با بی‌هنجاری زیرسطحی، در دهه‌های اخیر به‌خصوص در اکتشاف کانسارهای پورفیری، هیدروژئوفیزیک، اکتشافات باستان‌شناسی، بیوژئوفیزیک و مسائل زیست‌محیطی مورد توجه قرار گرفته است. در این روش، برداشت‌های صحرایی بر روی یک گستره بسامدی (معمولاً 1 میلی‌هرتز تا 10 کیلوهرتز) انجام می‌شود که به‌دلیل اعمال جریان تحریک بسامدی به داخل زمین، اثرات القایی بر روی طیف‌های پاسخ اهمی و قطبش زمین مشاهده می‌شوند (اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس). به‌دلیل بزرگی اثرات القایی و ایجاد خطا بر روی پاسخ الکترونیک زمین، محاسبه پاسخ رهنبدی (امپدانس) متقابل زمین و جدایش پاسخ الکترونیک و الکترومغناطیس زمین ضروری است. مطالعات صورت گرفته به سه طریق: جدایش پاسخ قطبش القایی از داده‌های صحرایی، بررسی هم‌زمان هر دو اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس و قطبش القایی در امپدانس متقابل زمین به‌عنوان پاسخ کلی زمین و وارون‌سازی امپدانس متقابل و درنهایت کاهش اثرات القایی بر داده‌ها با به‌کار بردن چینش مناسب کابل-های جریان الکترونیک در حین برداشت صحرایی انجام شده.

اثر هندسه آرایه الکترودی و رسانایی الکترونیک DC زمین بر نتایج برداشت صحرایی قطبش القایی طیفی به‌خوبی شناخته شده است. به هر حال به دلیل این که معادله رهنبدی متقابل ارائه‌شده توسط سوند که پایه مطالعات یادشده می‌باشد، برای زمین با رسانایی حقیقی بدون قطبش القایی حل شده است، اثر دیگر پارامترهای موثر بر قطبش القایی زمین کم‌تر بررسی شده است. در این پژوهش، دیگر پارامترهای نیم‌فضا مانند بارپذیری، ثابت زمانی و ثابت بسامدی (با در نظر گرفتن مدل کول-کول به‌عنوان مدل قطبش القایی زمین) در نظر گرفته شده و تاثیر تغییرات آنها بر رهنبدی متقابل زمین با ارائه مثال‌های نظری و یک مثال واقعی با استفاده از نمودار نایکوئیست بررسی می‌شود.

نتایج نشان می‌دهد که اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس در بسامدهای کم‌تر از 10 هرتز هم مشاهده می‌شود. وقتی اختلاف دو ثابت زمانی پراکنش جفت‌شدگی الکترومغناطیس و ثابت زمانی قطبش القایی کوچک شود، وقتی مقدار ثابت بسامدی  $C$  کوچک است و وقتی بارپذیری نیم‌فضا کوچک باشد، تفکیک این دو پراکنش پیچیده می‌گردد. از نظر کاربردی این نتایج نشان می‌دهد که تخمین پاسخ قطبش القایی زمین وقتی کانه‌های پرفیری با ابعاد ریز وجود دارد، وقتی توزیع دانه‌بندی کانه در اندیس معدنی وسیع باشد و یا در حالتی که عیار کانه در اندیس معدنی کم است، تفکیک این دو اثر پیچیده‌تر و با خطای بیشتر همراه است. همچنین تخمین خصوصیات قطبش القایی زمین در برداشت‌های زیست‌محیطی به‌دلیل کوچک بودن بارپذیری زمین با خطا همراه است.

**واژه‌های کلیدی:** قطبش القایی طیفی، اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس، پارامترهای ذاتی کول-کول و هندسه آرایه الکترودی، نمودار نایکوئیست

## 1 مقدمه

خواهد بود.

طی سال‌های گذشته روش قطبش القایی طیفی (SIP) به-طور گسترده برای شناسایی اهداف زیادی مانند اکتشافات زیست‌محیطی، ژئوفیزیک مهندسی، اکتشاف کانسارهای معدنی (پلتون و همکاران، 1978؛ لیو و ژنگ، 1998)، هیدروژئوفیزیک (کلاین و سیل، 1982؛ کینا و همکاران، 2004؛ بینلی و همکاران، 2005؛ اتوا و گونتر، 2013) و بررسی آلودگی‌های آلی و غیرآلی سنگ‌ها و خاک‌ها (ون‌هالا، 1997a و 1997b؛ عبدال‌آل و همکاران، 2006؛ رویل و همکاران، 2011) کاربرد یافته است.

در روش قطبش القایی طیفی، مقاومت ویژه الکتریکی مختلط زیرسطحی در بسامدهای مختلف (1 میلی هرتز تا 10 کیلو هرتز) با تزریق جریان الکتریکی متغیر با زمان ( $I(\omega)$ ) از طریق الکترودهای جریان و اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل الکتریکی بین دو الکترود پتانسیل محاسبه می‌شود. اثر القای الکترومغناطیس کابل جریان الکتریکی بر زمین و بر کابل پتانسیل الکتریکی را اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس می‌نامند (براون، 1985). این اثر به‌ویژه در بخش بسامد بالای طیف‌های دامنه مقاومت ویژه الکتریکی و فاز، به‌طور واضح مشاهده می‌شود. این اثر در برداشت‌های قطبش القایی طیفی به‌دلیل استفاده از جریان متناوب و همچنین وجود جریان الکتریکی اولیه (فرستنده) در زمان اندازه‌گیری مشهودتر از آن در برداشت‌های قطبش القایی در حوزه زمان است.

اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس در برداشت‌های قطبش القایی طیفی به‌نوعی ایجاد محدودیت در انتخاب آرایه الکترودی می‌کند؛ زیرا با انتخاب آرایه الکترودی مناسب و چینش خاص کابل جریان می‌توان اثر آن را در پاسخ کل کاهش داد (دی و موریسون، 1973؛ ویت و گروسکا، 1986؛ اشموتز و همکاران، 2014). به‌هرحال، با افزایش بسامد جریان الکتریکی، اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس افزایش یافته و تفسیر با خطا همراه

با افزایش رسانایی الکتریکی زمین و ابعاد هندسی آرایه الکترودی (طول و فاصله دوقطبی‌های جریان و پتانسیل)، اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس افزایش می‌یابد (دی و موریسون، 1973). در این حالت ممکن است که این اثر حتی در بسامدهای کمتر از 100 هرتز مشاهده گردد (روث و اولدنبرگ، 2001). در اکتشافات عمیق، که برای افزایش عمق نفوذ جریان طول دوقطبی‌های برداشت و فاصله جدایش آنها افزایش می‌یابد، به‌طور معمول به‌منظور جلوگیری از برداشت اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس از بسامدهای پایین استفاده می‌شود (کاتسوبه و کولت، 1973؛ وین و زونگ، 1977). اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس حتی در بسامدهای حدود 1 هرتز هم مشاهده شده است (گاسپرکوا و موریسون، 2001). لازم به ذکر است که پاسخ قطبش القایی (به‌ویژه در اکتشافات معدنی) معمولاً در بخش بسامد پایین طیف پاسخ قرار دارد. به‌هرحال، در این برداشت‌ها نیز خطای بزرگی در تخمین پارامترهای قطبش القایی زیرسطحی وجود خواهد داشت (دی و موریسون، 1973). این امر هم به‌دلیل وجود اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس در بخش پایینی طیف بسامدی و هم به‌دلیل محدود شدن این طیف است.

هدف اصلی این مطالعه بررسی تأثیر پارامترهای مدل کول-کول (پارامترهای قطبش القایی زمین: رسانایی، بارپذیری، ثابت زمانی و ثابت بسامدی) و هندسه آرایه الکترودی ( $n$  و  $a$ ) بر اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس زمین نیم‌فضای همگن قطبش‌پذیر در مطالعات قطبش القایی بسامدی است. با توجه به این که نمودار نایکوئیست در مطالعات القاء الکترومغناطیس به‌کار گرفته می‌شود، به ویژه این که این نمودار به‌طور واضح اثرات مختلف الکتریکی و الکترومغناطیس را نمایش می‌دهد، از آن برای بررسی پاسخ‌های مختلف مقاومت ویژه الکتریکی

همکارانش (1969) ارائه شد.

با استفاده از الگوریتم‌های تبدیل سریع فوریه توسط کولی و توکی (1965)، دی و موریسون (1973) اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس را در حوزه زمان برای نیم‌فضای همگن با استفاده از یک تپ (پالس) تحریک دوره‌ای محاسبه کردند. آنها رهنبدی متقابل بین دوقطبی‌های جریان و پتانسیل با طول دلخواه را توسط بسط جواب کامل مقدار مرزی دوقطبی افقی جریان بر روی یک نیم‌فضای چندلایه‌ای محاسبه کردند.

فان فورهایس و همکاران (1973) طی مطالعات آزمایشگاهی قطبش القایی در حوزه بسامد، طیف فاز را برای کانی‌زایی مس پورفیری اندازه‌گیری کردند، اما به این نتیجه رسیدند که مقدار اختلاف فاز بین دوقطبی جریان الکتریکی و دوقطبی پتانسیل در تمام بسامدها ثابت می‌ماند و پاسخ طیف دامنه و فاز مقاومت ویژه الکتریکی مختلط می‌تواند با شناسایی و حذف اثرات القایی مورد استفاده قرار گیرد. لازم به ذکر است که در مطالعات آزمایشگاهی با استفاده از دوقطبی‌های بسیار کوچک جریان و پتانسیل و نمونه با ابعاد کوچک، از اثرات جفت‌شدگی الکترومغناطیس می‌توان صرف‌نظر کرد. به عبارت دیگر رهنبدی متقابل اندازه‌گیری شده در بسامدهای مختلف همان پاسخ طیفی قطبش القایی است. آنها مدل فاز ثابت را برای داده‌های قطبش القایی ارائه دادند. پلتون و همکاران (1978) این تحقیقات را ادامه دادند و برخلاف مطالعات فان فورهایس و همکاران (1973) دریافتند که مدل فاز ثابت برای اندازه‌گیری‌های قطبش القایی صحیح نیست و دو پارامتر طیفی بارپذیری ( $m$ ) و ثابت زمانی ( $\tau$ ) در مدل کاربردی رهنبدی کول-کول صدق کرده و با تغییر کانی‌زایی تنوع گسترده‌ای را نشان می‌دهند. آنها به‌منظور ایجاد وجه تمایز بین کانسارهای سولفیدی، گرافیت و مس پورفیری (با درجه کانی‌زایی و بافت‌های مختلف) یک برداشت در مقیاس کوچک در محل

مختلط (رهنبدی متقابل) زمین، اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس و پاسخ قطبش القایی زمین استفاده شده است.

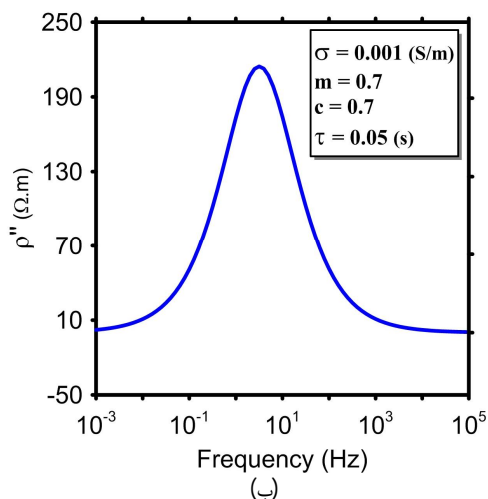
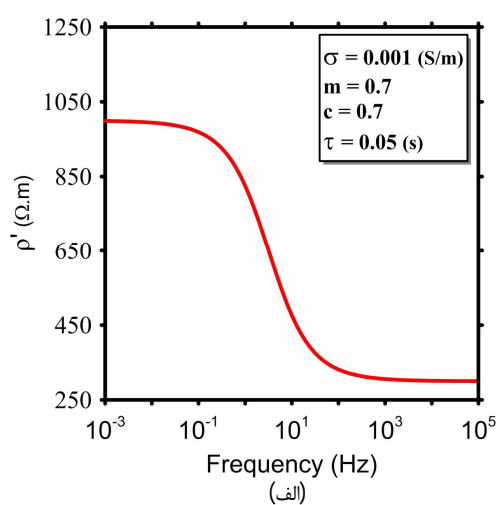
در پژوهش حاضر برای بررسی تأثیر پارامترهای ذاتی مدل کول-کول بر میزان اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس، محاسبه طیف دامنه و فاز با در نظر گرفتن اثرات هم‌زمان قطبش القایی و جفت‌شدگی الکترومغناطیس، از مدل‌های ارائه شده توسط ویت و گروسکا (1986) [13] و کُد نرم‌افزاری CRIDMod [38] استفاده شده است. مدل‌های مذکور، اثرات الکترومغناطیس حاصل از دوقطبی‌های جریان و پتانسیل را بر روی سطح نیم‌فضای همگن الکتریکی با مقاومت ویژه مختلط محاسبه می‌کنند.

## 2 مروری بر مطالعات صورت گرفته در مورد

### جفت‌شدگی الکترومغناطیس در قطبش القایی

رهنبدی (امپدانس) متقابل سیم‌هایی با طول محدود که بر روی نیم‌فضای همگن یا بالای نیم‌فضای همگن قرار گرفته‌اند، توسط فورستر (1933) محاسبه شده است؛ رهنبدی متقابل زمین دولایه‌ای افقی توسط ریوردان و سوند (1933) و هاوومن (1970) محاسبه شد. محاسبه پاسخ‌های قطبش القایی در حوزه زمان برای دوقطبی‌های مختلف جریان بر روی یک نیم‌فضا توسط بهات تاچاریا (1957) و ویت (1951) محاسبه شد. میلِت (1967) اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس محاسبه شده برای آرایه الکترونی دوقطبی-دوقطبی خطی مستقیم بر روی یک نیم‌فضای همگن را با فرض ساده‌سازی زمین به‌عنوان یک سیم‌پیچ معادل و اثر القایی متقابل آن با سیم‌پیچ‌های پتانسیل و جریان منتشر کرد. شناخت پارامترهای القایی متقابل در این مدل‌سازی مسئله اصلی است. یک مدل برای تفسیر کمی داده‌های میدان‌های الکترومغناطیس متغیر با زمان در یک نیم‌فضای چندلایه توسط موریسون و

پارامترهای هر پراکنش محاسبه می‌شود. با داشتن پارامترهای قطبش القایی و جفت‌شدگی و به کمک مدل کول-کول می‌توان طیف‌های دامنه و فاز هر پراکنش را به دست آورد (پلتون و همکاران، 1978). شکل 2 طیف فاز رهنبدی متقابل، جفت‌شدگی الکترومغناطیس و قطبش القایی خالص پس از وارون‌سازی داده‌های صحرائی و انطباق با مدل حاصل ضرب دو کول-کول را نشان می‌دهد.



شکل 1. طیف‌های (الف) بخش حقیقی ( $\rho'$ ) و (ب) بخش موهومی ( $\rho''$ ) مقاومت ویژه الکتریکی مختلط کول-کول در نیم‌فضای همگن قطبش‌پذیر بدون وجود اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس. پارامترهای مدل (نیم‌فضا) شامل رسانایی الکتریکی  $\sigma = 0.001$  زیمنس بر متر، بارپذیری  $m = 0.7$ ، ثابت بسامدی  $c = 0.7$  و ثابت زمانی  $\tau = 0.05$  ثانیه.

رخنمون‌های کانسار ترتیب دادند. بدین منظور آنها فاصله الکترودی کوچک را انتخاب کردند تا اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس تا حد امکان کوچک باشد. از آن به بعد مدل کول-کول به طور گسترده در برداشت‌های قطبش القایی به کار گرفته شد.

کول و کول (1941) مدل موسوم به مدل کول-کول را برای نمایش ساده اثر قطبش القایی ارائه کردند (شکل 1). نوعی از این مدل، با سه پارامتر، توسط مارشال و مدن (1959) و کانتول (1967) تحت عنوان رهنبدی واربرگ توسعه یافت. مدل تعمیم‌یافته کول-کول با داشتن چهار پارامتر نشان داد که پتانسیل برداشت‌شده با این مدل می‌تواند در تشخیص کانی‌زایی‌های مختلف به خصوص از طریق برداشت قطبش القایی بسامدی مؤثر واقع شود (مدن و کانتول، 1967؛ پلتون و همکاران، 1978). انطباق مناسب مدل کول-کول و داده‌های قطبش القایی در مطالعات مختلف بررسی شده است (لیو و ژنگ، 1998؛ پلتون و همکاران، 1972؛ کی، 1981، کی و داکورث، 1983). شکل 1 طیف بخش‌های حقیقی و موهومی مقاومت ویژه الکتریکی را با در نظر گرفتن پارامترهای مدل (نیم‌فضا) شامل مقاومت ویژه الکتریکی نیم‌فضا برابر با 1000 اهم متر، بارپذیری  $m = 0.7$ ، ثابت بسامدی  $c = 0.7$  و ثابت زمانی  $\tau = 0.05$  ثانیه نشان می‌دهد.

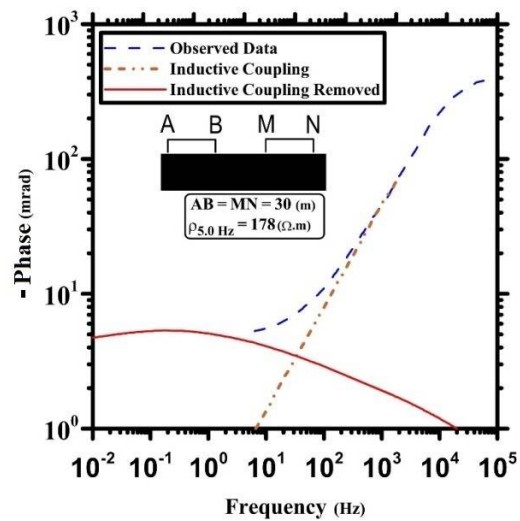
پلتون و همکاران (1972) اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس را به صورت تجربی از انطباق داده‌های صحرائی قطبش القایی طیفی با مقاومت ویژه الکتریکی مختلط به دست آمده از حاصل ضرب دو مدل کول-کول محاسبه کردند. یکی از مدل‌های کول-کول معرف اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس (پراکنش ایجاد شده در بخش بسامد بالای طیف) و دیگری به عنوان اثر قطبش القایی زمین (پراکنش ایجاد شده در بخش بسامد بالای طیف) در نظر گرفته شده است. پس از وارون‌سازی و انطباق دو پراکنش کول-کول به داده‌های صحرائی،

حذف اثرات القایی از پاسخ امپدانس متقابل ارائه دادند. آنها پاسخ القایی نیم‌فضای با مقاومت ویژه حقیقی را از پاسخ رهنبدی متقابل اندازه‌گیری شده مربوط به نیم‌فضای مختلط کم کرده و مقدار به‌دست آمده را به‌عنوان قطبش القایی نیم‌فضا در نظر گرفتند.

روث و اولدنبرگ (2001) با استفاده از مفاهیم میدان الکتریکی روشی برای حذف اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس از داده‌های قطبش القایی بسامدی ارائه کردند. آنها با این فرض که در بسامدهای پایین اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس بر قطبش القایی خالص صرف‌نظر کردنی باشد، پاسخ قطبش القایی زمین را از داده‌های مشاهداتی برای آرایه دوقطبی-دوقطبی به‌دست آوردند. آنها فرض کردند که میدان الکتریکی به‌عنوان یک تابع نرده‌ای، مجموعی از اثرات قطبش القایی خالص و اثرات القای خالص است.

اینگمن نیلسن و بومگارتر (2006a و 2006b) معادله رهنبدی متقابل ارائه شده از سوی سوند (1949) را با استفاده از مدل‌سازی عددی پیش‌رو برای یک نیم‌فضای دارای لایه‌بندی و قابلیت قطبیده‌شوندگی در قالب گد نرم‌افزاری CRIDMOD ارائه کردند. شکل 3 طیف‌های بخش حقیقی و فاز پاسخ رهنبدی متقابل یک نیم‌فضای همگن قطبیده‌شونده (با پارامترهای کول-کول: مقاومت ویژه الکتریکی DC برابر 100 اهم متر، بارپذیری 0.5، ثابت بسامدی 0.5 و ثابت زمانی 10 ثانیه) را برای آرایه دوقطبی-دوقطبی (با  $a=100$  متر و  $N=1$ ) محاسبه شده با استفاده از نرم‌افزار CRIDMOD نشان می‌دهد.

قربانی و همکاران (2009) مدلی برای وارون‌سازی داده‌های یک‌بُعدی قطبش القایی طیفی برای مدل کول-کول با در نظر گرفتن اثرات جفت‌شدگی الکترومغناطیس ارائه کردند. اشموتز و همکاران (2014) نشان دادند که با چیدمان مناسب کابل دوقطبی جریان می‌توان به‌طور عملی اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس را حتی برای آرایه



شکل 2. حذف اثر جفت‌شدگی القایی از طیف فاز داده‌های قطبش القایی بسامدی با استفاده از مدل کول-کول (پلتون و همکاران، 1978). خط چین آبی‌رنگ نشان‌دهنده داده‌های مشاهداتی، خط نقطه قهوه‌ای نشان‌دهنده القای خالص و خط پر نشان‌دهنده قطبش القایی خالص است.

میجر و سیلیک (1981) نشان دادند که مدل حاصل از مجموع دو مدل کول-کول نتایج بهتری نسبت به حاصل ضرب دو مدل کول-کول ارائه می‌دهد.

مدل‌های تجربی ذکر شده در بالا (پلتون و همکاران، 1978؛ میجر و سیلیک، 1981؛ هالوف و پلتون، 1980) بر پایه مدل‌های فیزیکی استوار نیستند ولی در عمل، انطباق رضایت‌بخشی در بسامدهای پایین‌تر از بسامد فاز کرانگینه (پیشینه یا کمینه) بین مدل کول-کول و پاسخ رهنبدی القایی نشان می‌دهند. براون (1985) مدل فیزیکی ساده‌ای را برای پدیده قطبش و دی‌الکتریک ارائه داد. او با در نظر گرفتن یک نیم‌فضای رسانای همگن به‌عنوان یک سیم‌پیچ زیرسطحی ساده همراه با ضریب القاء و مقاومت ویژه الکتریکی مشخص، رهنبدی متقابل بین جفت‌الکترودهای جریان و پتانسیل را در یک برداشت قطبش القایی با آرایه الکترودی دوقطبی-دوقطبی محاسبه کرد.

ویت و گروسکا (1986) معادله رهنبدی متقابل ارائه شده از سوی سوند (1949) را در شرایط مختلف از جمله برای نیم‌فضای همگن مدل کردند و روشی برای

نسبت ولتاژ نیروی محرکه الکتریکی به جریان الکتریکی خواهد بود:

$$Z(\omega) = E_2(\omega) I_1(\omega), \quad (1)$$

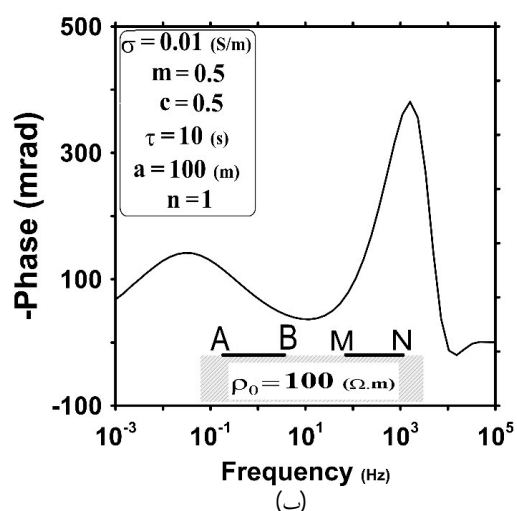
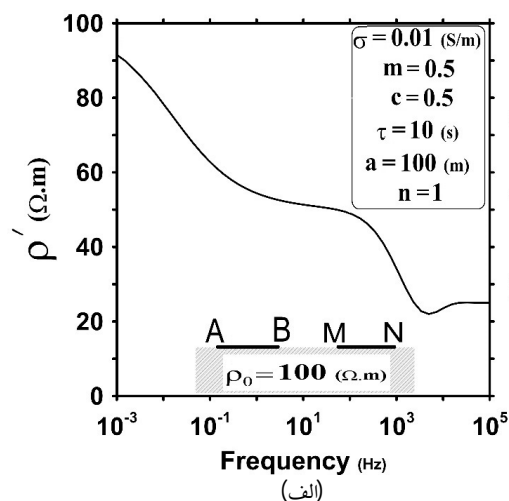
که  $I_1$  مقدار جریان متناوب الکتریکی بین دو الکتروود جریان و  $E_2$  نیروی محرکه الکتریکی بین دو الکتروود پتانسیل است.

رهنبدی متقابل به علت جریان‌های الکتریکی بازگشتی زمین و به علت صورت گرفتن القا بین کابل‌های سیم‌پیچ‌های فرستنده و گیرنده که در بالای سطح زمین قرار دارند، به ترتیب دارای یک سهم مقاومت ویژه مختلط و یک سهم اثر جفت‌شدگی القایی خواهد بود (براون، 1985). بر اساس معادله سوند (1949)، رهنبدی متقابل بین دو کابل با چینش دلخواه بر روی سطح زمین بر روی دوقطبی‌های فرضی در طول مسیر کابل‌ها به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} Z(\omega) &= \iint_{Aa}^{Bb} \left[ P(r) \cos \xi + \frac{\partial^2 Q(r)}{\partial(s) \partial(s)} \right] ds dS \quad (2) \\ &= \iint_{Aa}^{Bb} P(r) \cos \xi ds dS + Q(|Aa|) \\ &\quad + Q(|Ba|) + Q(|Ab|) + Q(|Bb|). \end{aligned}$$

مطابق شکل 4، حدهای انتگرال‌گیری نمایانگر بازه محدود به ابتدا و انتهای کابل‌های فرستنده ( $A$  و  $B$ ) و گیرنده ( $a$  و  $b$ )،  $dS$  و  $ds$  عنصرهای دیفرانسیل طول بر روی کابل‌های جریان و پتانسیل،  $\xi$  زاویه بین عنصرهای طولی کابل‌های فرستنده و گیرنده و  $r$  فاصله بین عنصرهای کابل‌های فرستنده و گیرنده هستند. سوند (1949) رسانایی زمین را حقیقی و ثابت در نظر گرفت و گذردهی خلاء را برای آن در نظر گرفت. با در نظر گرفتن این فرض‌ها، در یک نیم‌فضای همگن تابع  $Q(r)$  حقیقی و ثابت (مستقل از بسامد) خواهد بود و تنها به

شولمیرژه که در برداشت‌های قطبش القایی مرسوم نیست، کاهش داد.

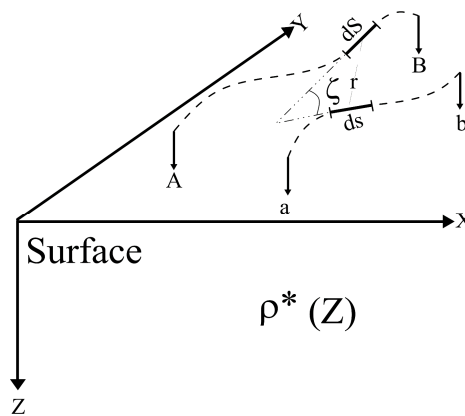


شکل 3. (الف) طیف بخش حقیقی و (ب) طیف فاز پاسخ رهنبدی متقابل یک نیم‌فضای همگن قطبش‌پذیر محاسبه‌شده با استفاده از نرم‌افزار CRIDMOD (اینگمن‌نیلسن و بومگارتنر، 2006a و 2006b). پارامترهای زمین و هندسه آرایش در روی شکل نشان داده شده است.

### 3 رهنبدی متقابل دوقطبی‌های جریان و پتانسیل نیم‌فضای همگن

پاسخ رهنبدی متقابل در یک برداشت قطبش القایی طیفی بر روی یک نیم‌فضای همگن را می‌توان به صورت معادله (1) نوشت. در واقع برای دو جفت الکتروود متصل به سطح زمین، طبق تعریف، رهنبدی متقابل بین دو مدار الکتروود

موقعیت ابتدا و انتهای کابل‌های فرستنده و گیرنده بستگی خواهد داشت. تابع  $P(r)$  نیز تابع نمایان‌کننده اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس است.



شکل 4. موقعیت قرارگیری کابل‌های جریان و پتانسیل بر روی سطح زمین.  $ds$  به ترتیب عنصرهای انتگرال‌گیری بر روی کابل‌های پتانسیل و جریان هستند.  $A$  و  $B$  محل الکترودهای جریان و  $a$  و  $b$  محل الکترودهای پتانسیل را نشان می‌دهد.  $r$  فاصله بین عنصرهای  $ds$  و  $ds$  و زاویه بین عنصرهای یادشده و  $\rho^*(Z)$  مقاومت ویژه مختلط زمین است.

در حالت نیم‌فضای همگن، وقتی نفوذپذیری مغناطیسی زیرسطحی برابر با نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد ( $\mu_0 = \mu_1$ ) و تمام فواصل در مقایسه با طول موج‌های فضای آزاد کوچک باشد، به طوری که جریان جابه‌جایی در هوا چشم‌پوشیدنی باشد ( $k_0 \rightarrow 0$ ) که در آن  $k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$ ، توابع  $P$  و  $Q$  به صورت زیر ساده می‌شوند (دی و موریسون، 1973):

$$P(r) = \frac{-i\omega\mu_0}{2\pi k_1^2 r^3} [1 - (1 + ik_1 r)e^{-ik_1 r}], \quad (3)$$

$$Q(r) = \frac{-i\omega\mu_0}{2\pi k_1^2 r^3}, \quad (4)$$

$$k_1^2 = -i\omega\mu_0 (\sigma_1 + i\omega \epsilon_1), \quad (5)$$

که  $k_1$  همان عدد موج یا ضریب انتشار نیم‌فضای همگن،  $\epsilon_1$  دی‌الکتریک زمین و  $\sigma_1$  رسانایی زمین است.

#### 4 مروری بر معادلات قطبش القایی

قانون آمپر (کرل  $H$ ) رابطه بین چگالی جریان کل ( $J_T$ )، چگالی جریان رسانش و چگالی جریان جابه‌جایی را نشان می‌دهد:

$$\nabla^* H = J_T = J_c + \frac{\partial D}{\partial t}. \quad (6)$$

چگالی رسانش جریان ( $J_c$ )، رسانایی الکتریکی  $\sigma$ ، جابه‌جایی  $D$  و دی‌الکتریک ( $\epsilon$ ) از طریق روابط پایه به شدت میدان الکتریکی ( $E$ ) مربوط می‌شوند:

$$J_c = \sigma E, \quad (7)$$

$$D = \epsilon_0 E + P = \epsilon_0 (1 + \chi(\omega)) E, \quad (8)$$

که  $\sigma$  و  $\epsilon_0$  به ترتیب رسانایی الکتریکی محیط و ضریب گذردهی خلاء را نشان می‌دهند.  $P$  نیز قطبش محیط را که ناشی از میدان الکتریکی ( $E$ ) و مغناطیس‌پذیری ( $\chi$ ) است، نشان می‌دهد. با ترکیب روابط (6) تا (8) می‌توان رابطه کلی زیر را نوشت:

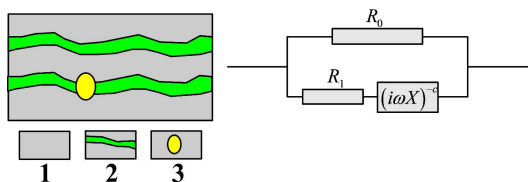
$$J_T = \left( \frac{1}{\rho^*} + i\omega \epsilon_r \epsilon_0 \right) E, \quad (9)$$

که  $\epsilon_r$  ثابت دی‌الکتریک نسبی محیط و  $\rho^*$  مقاومت ویژه الکتریکی مختلط محیط (عکس رسانایی مختلط  $\sigma^*$ ) است.

#### 5 مروری بر مدل تجربی کول-کول

از بین مدل‌های زیادی که برای توصیف رفتار مقاومت ویژه الکتریکی مختلط ارائه شده است (مارشال و مدن، 1959؛ ونگ، 1979)، مدل تجربی کول-کول (1941) که در ابتدا برای توصیف رفتار گذردهی مختلط ارائه شد، کاربرد گسترده‌ای یافته است. پلتون و همکاران (1978) از این مدل برای توصیف پراکندگی مقاومت ویژه الکتریکی مشاهده‌شده در داده‌های صحرائی حاصل از برداشت در

$(i\omega X)^{-c}$  بیانگر رهنبدی الکتریکی مسیرهای جریانی است که با کانه معدنی مسدود شده‌اند. این عبارت به نوعی بیانگر رهنبدی الکتریکی سطح مشترک الکترولیت و کانه معدنی (یونی-فلزی) است.  $R_1$  مقاومت الکتریکی منافذ حاوی الکترولیت مسدود شده به وسیله کانه است.



شکل 5. سنگ حاوی کانه معدنی (1. سنگ میزبان، 2. مسیر جریان الکتریکی حاوی الکترولیت، 3. کانه معدنی) و مدار الکتریکی معادل مرتبط با مدل کول-کول.  $R_0$  مقاومت الکتریکی منافذ باز پر شده با الکترولیت،  $(i\omega X)^{-c}$  رهنبدی الکتریکی سطح مشترک الکترولیت و کانه معدنی (یونی-فلزی) است و  $R_1$  مقاومت الکتریکی منافذ حاوی الکترولیت، مسدود شده با کانه است.

معادله کول-کول در حوزه زمان، مشخصات قطبش القایی ناپایدار در طول قطع جریان قطبش را بر طبق رابطه زیر توصیف می‌کند (پلتون و همکاران، 1978):

$$M(t) = m \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (t/\tau)^{nc}}{\Gamma(1+nc)}, \quad (12)$$

که  $M(t) = V(t)/V_0$  بارپذیری را در حوزه زمان نشان می‌دهد.  $V_0$  و  $V(t)$  به ترتیب پتانسیل الکتریکی منحنی دشارژ در زمان  $t$  بعد از قطع جریان و پتانسیل الکتریکی یک لحظه قبل از قطع جریان هستند.  $\Gamma(X)$  نیز تابع گاما است. پارامترهای  $m$ ،  $c$  و  $\tau$  نیز همان پارامترهای مدل کول-کول هستند.

مطالعات مختلف نشان داده است که در سنگ‌های حاوی کانه، پارامترهای  $m$  و  $\tau$  از مدل کول-کول به ترتیب به کمیت عنصرهای مستعد برای قطبش (عیار کانه) و اندازه آنها (اندازه ذرات کانه) وابسته است (پلتون و همکاران، 1978؛ لیو و ژنگ، 1998). پارامتر  $c$  نیز به

محدوده‌های مستعد کانی‌زایی فلزی استفاده کردند. این مدل مطابق رابطه زیر برای مقاومت ویژه الکتریکی نوشته می‌شود:

$$\rho^*(\omega) = \rho_0 \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{1}{1 - (i\omega\tau)^c} \right) \right]. \quad (10)$$

رابطه (10) را برای رسانایی الکتریکی مختلط می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\sigma^*(\omega) = \sigma_0 \left[ 1 + m \left( \frac{i\omega}{1 + (i\omega\tau)^c (1-m)} \right) \right], \quad (11)$$

که  $\rho_0$  و  $\sigma_0$  به ترتیب مقاومت ویژه و رسانایی الکتریکی در جریان الکتریکی مستقیم (DC)،  $m$  میزان بارپذیری،  $\rho_{\infty}$  و  $\sigma_{\infty}$  به ترتیب مقاومت ویژه و رسانایی الکتریکی در بسامد بالا،  $\tau$  ثابت زمانی و  $c$  ثابت بسامدی است. بارپذیری مطابق تعریف  $m = \frac{\rho_0 - \rho_{\infty}}{\rho_0}$  یا  $m = \frac{1 - \sigma_0}{\sigma_{\infty}}$  دامنه قطبش القایی را نشان می‌دهد.

پلتون و همکاران (1978) نشان دادند که این مدل می‌تواند برای تشخیص انواع کانی‌زایی معدنی با تفکیک اندازه دانه‌بندی هر کانی‌زایی مجزا مورد استفاده قرار گیرد. پارامترهای مدل کول-کول ( $\rho_0, m, \tau, c$ ) با انطباق مدل بر داده‌های صحرائی مختلط به دست می‌آیند. بسامدی که در آن بیشینه فاز اتفاق می‌افتد از رابطه  $f_{\text{peak}} = 1/2\pi\tau(1-m)^{0.5c}$  (ونها، 1997a). طیف فاز کول-کول متقارن و پارامتر  $c$  میزان شیب در نمودار تمام‌لگاریتمی طیف فاز است (میجر و سیلیک، 1981).

شکل 5 سنگ حاوی کانه معدنی و مدار معادل آن را مطابق با قطبش القایی مدل کول-کول نشان می‌دهد. در مدار معادل، مقاومت الکتریکی ( $R_0$ ) بیانگر مقاومت الکتریکی منافذ باز پر شده با الکترولیت (منافذ حاوی الکترولیت که با کانه مسدود نشده‌اند). عبارت



$$\begin{cases} G(z) = e^{-z} \left( \frac{1}{z} - 1 \right) + z \text{Ei}(z), \\ \text{Ei}(z) = \int_z^{\infty} \frac{e^{-v}}{v} dv, \\ \gamma = \sqrt{i\omega\mu_0 / \rho^*}. \end{cases} \quad (15)$$

در بسامدهای پایین تابع  $G(z)$  به سمت  $\frac{1}{z} - 1$  میل می‌کند. در این حالت رهنبدی متقابل به صورت زیر به دست می‌آید:

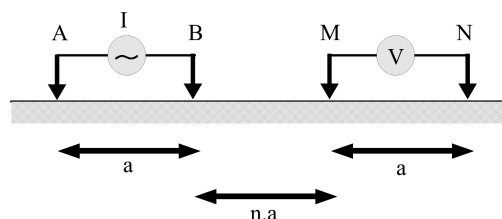
$$Z_0 = \frac{\rho_0}{\pi a(N+2)(N+1)N}. \quad (16)$$

معادله (16) رابطه‌ای شناخته شده بین مقاومت ویژه ظاهری و مقاومت الکتریکی در برداشت‌های جریان مستقیم (DC) و عبارت مخرج، فاکتور هندسی آرایه الکترونی دوقطبی-دوقطبی است. ویت و گروسکا (1986) برای جریان الکتریکی تزریقی با بسامدهای به اندازه کافی کوچک، رابطه مقاومت ویژه مختلط را به صورت زیر نوشتند:

$$\rho_a(\omega) = Z(\omega)(\pi a(N+2)(N+1)N), \quad (17)$$

که  $Z(\omega)$  برابر با رهنبدی متقابل برداشت شده است. اینگمن نیلسن و بومگارتر (2006) نرم‌افزار CR1DMod را که قادر به مدل‌سازی پیش‌رو داده‌های قطبش القایی طیفی با در نظر گرفتن اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس است، برای زمین لایه‌ای تهیه کردند. این نرم‌افزار امکان تعیین تعداد لایه‌های زیرسطحی، تعیین آرایه الکترونی و نحوه قرارگیری کابل‌ها بر روی زمین را در اختیار کاربر می‌گذارد. در نهایت، طیف دامنه و فاز را بر اساس تبدیلات هنکل با استفاده از صافی‌های رقمی و انتگرال‌های عددی کاربردی توابع بسط محاسبه می‌کند (اینگمن نیلسن و بومگارتر، 2006b).

توزیع اندازه دانه‌های کانه بستگی دارد (لیو و ژنگ، 1998؛ ونهالا، 1997a و 1777b). بین‌لی و همکاران (2005) با اندازه‌گیری بر روی نمونه‌های به دست آمده از گمانه‌های اکتشافی در آبخوان ماسه‌سنگی در منطقه اشباع و غیراشباع نشان دادند که بین پارامترهای مدل کول-کول و رسانایی هیدرولیکی رابطه‌ای با همبستگی بالا وجود دارد.



شکل 6. آرایه دوقطبی-دوقطبی برای برداشت‌های ژئوالکتریک.  $a$  طول دوقطبی‌های پتانسیل و جریان و  $n$  نیز فاکتور فاصله‌داری بین دوقطبی‌های جریان و پتانسیل است.

## 6 محاسبه رهنبدی متقابل نیم‌فضای قطبش‌پذیر

ثابت انتشار زیرسطحی را می‌توان به طور کلی به صورت زیر بیان کرد:

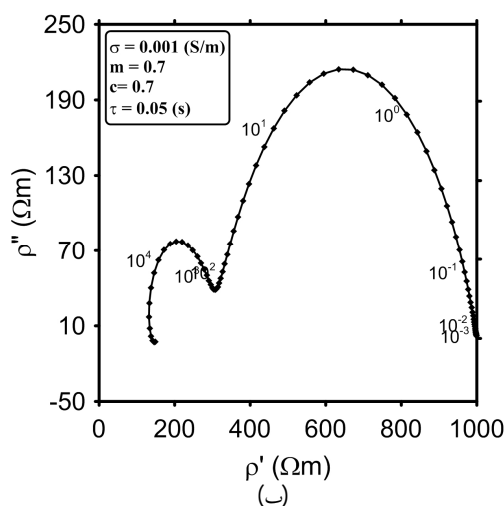
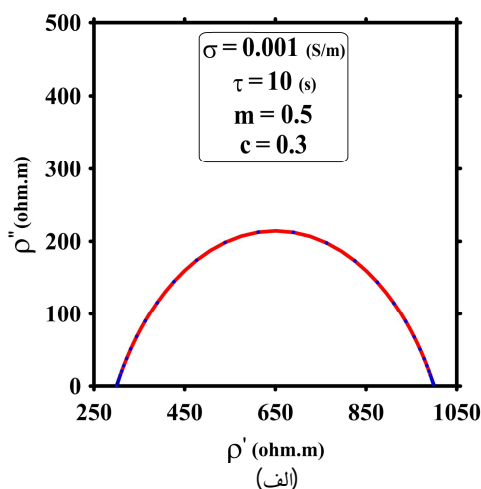
$$k_1^2 = -i\omega\mu_1 \left( \frac{1}{\rho^*} + i\omega \epsilon_r \epsilon_0 \right). \quad (13)$$

در بسامدهای تا حد کافی کوچک، زمانی که استفاده از تقریب شبه‌استاتیک توجیه‌پذیر است، می‌توان از عبارت  $i\omega \epsilon_r \epsilon_0$  صرف‌نظر کرد. تحت این شرایط و در یک نیم‌فضای همگن غیرمغناطیسی، ویت و گروسکا (1986) رهنبدی متقابل را برای آرایه دوقطبی-دوقطبی خطی به صورت زیر به دست آوردند:

$$Z_{EM} = \frac{\gamma \rho^*}{4\pi} \left( \frac{2}{a(N+2)(N+1)N\gamma} - 2G(\gamma(N+1)a) + \right) \left( G(\gamma(N+2)a) + G(\gamma Na) \right), \quad (14)$$

که

مثال‌هایی پرداخته می‌شود.



شکل 7. نمودار نایکوئیست (الف) مدل کول-کول که کماتی از یک دایره و فاقد اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس است و پاسخ قطبش القایی خالص نیم‌فضای همگن قطبش‌پذیر را نشان می‌دهد. پارامترهای مدل در شکل نشان داده شده است. (ب) زمین قطبش‌پذیر مطابق مدل کول-کول (پارامترهای مدل در شکل نشان داده شده است). آرایه الکترودی دوقطبی-دوقطبی با فاصله دوقطبی‌های جریان و پتانسیل  $a = 100$  متر و  $n = 1$ . اعداد روی شکل بسامد جریان را نشان می‌دهد.

## 8 اثر هندسه آرایه الکترودی بر نیم‌فضای همگن

### قطبش‌ناپذیر و قطبش‌پذیر

شکل‌های 8-الف و 8-ب نمودارهای نایکوئیست رهبندی متقابل مدل نیم‌فضای همگن با مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی 10 اهم‌متر را نشان می‌دهد. با توجه به این که زمین

## 7 معرفی نمودار نایکوئیست

نمودار نایکوئیست روشی برای نمایش پاسخ بسامدی است. منظور از پاسخ بسامدی، پاسخ حالت ماندگار سامانه به ورودی سینوسی است. این نمودار، نمایش پارامتری پاسخ بسامدی است که در پردازش سیگنال و کنترل خودکار استفاده می‌شود. در مختصات دکارتی، قسمت حقیقی تابع تبدیل روی محور طول‌ها و قسمت موهومی روی محور عرض‌ها رسم می‌شود. بسامد به‌عنوان یک پارامتر تغییر می‌کند و در نتیجه نمودار برحسب بسامد رسم می‌شود.

در مطالعه قطبش القایی طیفی از نمودار نایکوئیست برای ترسیم رهبندی متقابل به‌دست آمده از برداشت صحرائی، تفکیک اثر پراکنش حاصل از قطبش القایی (در بسامدهای پایین) و پراکنش حاصل از اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس (معمولاً در بسامدهای بالاتر طیف) استفاده شده است (براون، 1981؛ وین و زونگ، 1977). نمایش مقاومت ویژه مختلط مدل کول-کول کماتی از یک دایره است (شکل 7-الف) (وین و زونگ، 1977). شکل 7-ب نمودار نایکوئیست زمین قطبش‌پذیر مطابق مدل کول-کول ( $\rho_0 = 1000$  اهم‌متر،  $m = 0.7$ ،  $c = 0.7$  و  $\tau = 0.05$  ثانیه) به‌دست آمده از نرم‌افزار CR1DMod را نشان می‌دهد. آرایه الکترودی به کار رفته دوقطبی-دوقطبی با فاصله دوقطبی‌های جریان و پتانسیل  $a = 100$  متر و  $n = 1$  است. اعداد روی شکل بسامد جریان را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، دو پراکنش، یکی در بسامدهای پایین (کمتر از 100 هرتز) مربوط به اثر قطبش القایی نیم‌فضا و دیگری در بسامدهای بزرگ‌تر از 100 هرتز مربوط به جفت‌شدگی الکترومغناطیس دیده می‌شود.

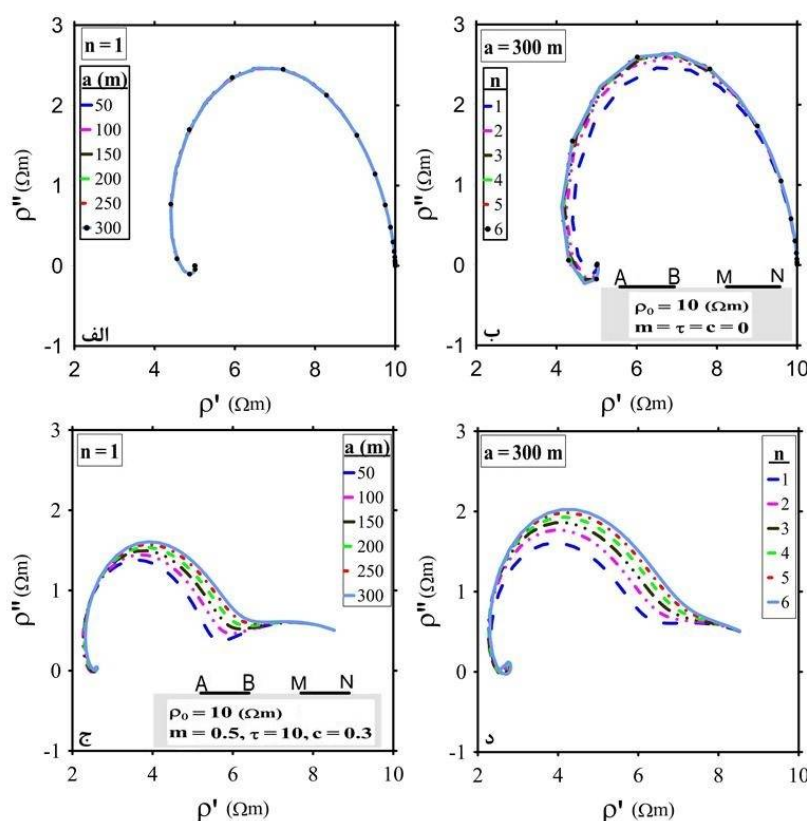
در ادامه به بررسی اثر پارامترهای مدل کول-کول (قطبش القایی زمین) بر جفت‌شدگی الکترومغناطیس و رهبندی کل با استفاده از نمودار نایکوئیست و ارائه

است، در بسامدهای کوچک و بزرگ، از نظر ظاهری، این نمودارها با وجود جابه‌جایی در طیف فاز در طول محور بسامد، بر هم منطبق هستند، ولی در بسامدهای میانی کمی ظاهر این نمودارها با یکدیگر اختلاف دارند. حدس زده می‌شود عدم انطباق این نمودارها به دلیل خطا در حل عددی باشد.

این نمودارها نشان می‌دهند که با تغییر هندسه آرایه الکترونی ظاهر کلی نمودار نایکوئیست رهنبدی متقابل (در این حالت با جفت‌شدگی الکترومغناطیس منطبق است) ثابت می‌ماند.

شکل های 8-ج و 8-د نمودارهای نایکوئیست مدل نیم‌فضای همگن قطبش‌پذیر را نشان می‌دهد. قطبش القایی

نیم‌فضای بدون قطبش القایی می‌باشد، اثر آن بر روی نمودار نایکوئیست نقطه‌ای با مختصات  $\rho' = \rho_0 = 10 (\Omega m)$  و  $\rho'' = 0$  در نتیجه پراکنش نشان داده شده بر روی شکل اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس است. همان‌طور که در شکل 8-الف دیده می‌شود با افزایش طول دوقطبی‌های برداشت، تغییری در ظاهر نمودارهای نایکوئیست ایجاد نمی‌شود. به هر حال بسامد جریان برای حالت‌های مختلف  $a$  در یک نقطه از نمودار متفاوت است. شکل 8-ب نمودار نایکوئیست را برای حالتی نشان می‌دهد که طول دوقطبی‌های جریان و پتانسیل ثابت (برابر 300 متر) است ولی فاصله بین آنها ( $n$ ) تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل نشان داده شده



**شکل 8.** نمودار نایکوئیست پاسخ رهنبدی متقابل با به کار بردن آرایه الکترونی دوقطبی-دوقطبی خطی (الف) مدل نیم‌فضای همگن با مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی 10 اهم‌متر (قطبش‌ناپذیر:  $m, c, \tau$  برابر صفرند) که در آن طول دوقطبی‌های برداشت ( $a$ ) تغییر می‌کند ( $n = 1$  ثابت است). (ب) همان مدل نیم‌فضای همگن با مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی 10 اهم‌متر (قطبش‌ناپذیر) که در آن فاصله بین دوقطبی‌های برداشت ( $n$ ) تغییر می‌کند ( $a = 300$  متر ثابت است). (ج) مدل نیم‌فضای همگن دارای قطبش القایی ( $m, c, \tau$  در شکل نشان داده شده‌اند) که در آن طول دوقطبی‌های برداشت ( $a$ ) تغییر می‌کند ( $n = 1$  ثابت است). (د) همان مدل نیم‌فضای همگن دارای قطبش القایی که در آن فاصله بین دوقطبی‌های برداشت ( $n$ ) تغییر می‌کند ( $a = 300$  متر ثابت است).

تغییر در مقدار ثابت زمانی تغییری در نمودار نایکوئیست رهنبدی متقابل آن ایجاد نمی‌کند (شکل 9-الف): منحنی‌های نشان داده شده با نام (Cole-Cole model). با توجه به این که ثابت زمانی جفت‌شدگی الکترومغناطیس از ثابت زمانی قطبش القایی کوچک‌تر است (میجر و سیلیک، 1981)، وقتی اختلاف این دو ثابت زمانی بیشتر می‌شود (برای مثال ثابت زمانی قطبش القایی بسیار بزرگ شود)، تفکیک دو پراکنش در نمودار نایکوئیست به راحتی صورت می‌پذیرد و برعکس وقتی این دو ثابت زمانی به یکدیگر نزدیک شوند (مقادیر کوچک ثابت زمانی قطبش القایی)، تقریباً تفکیک این دو پراکنش پیچیده می‌شود. در مطالعات قطبش القایی، ثابت زمانی کوچک‌تر مربوط به کانه‌های با ابعاد ریزتر می‌باشد (پلتون و همکاران، 1978).

ب- تأثیر ثابت بسامدی نیم‌فضای قطبش‌پذیر بر پاسخ رهنبدی متقابل

شکل 9-ب نمودارهای نایکوئیست رهنبدی متقابل حاصل از برداشت قطبش القایی با استفاده از آرایه الکتروودی دوقطبی-دوقطبی خطی بر روی مدل نیم‌فضای مختلط را نشان می‌دهد. در این نمودار پارامتر ثابت بسامدی ( $c$ ) مدل کول-کول تغییر می‌کند. افزایش ثابت بسامدی در مدل کول-کول (شکل 9-ب): منحنی‌های نشان داده شده با نام (Cole-Cole model)، باعث افزایش مقدار موهمی رهنبدی متقابل می‌شود. برعکس با افزایش  $c$  مقدار موهمی رهنبدی متقابل مربوط به پراکنش جفت‌شدگی الکترومغناطیس (بخش چپ نمودار شکل 9-ب) کاهش می‌یابد. در نهایت، شکل 9-ب نشان می‌دهد که تفکیک دو اثر قطبش القایی و جفت‌شدگی الکترومغناطیس وقتی مقدار  $c$  کوچک است، پیچیده‌تر می‌شود. این نمودارها نشان می‌دهند که اندازه‌گیری قطبش القایی کانسارهای پرفیری وقتی ابعاد دانه‌های کانه

نیم‌فضا مطابق مدل کول-کول با پارامترهای  $\rho_0 = 10$  اهم‌متر، بارپذیری 0.5،  $c = 0.3$  و ثابت زمانی 10 ثانیه است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، دو پراکنش، یکی در بسامدهای پایین و دیگری در بسامدهای بالاتر، به ترتیب مربوط به قطبش القایی محیط و جفت‌شدگی الکترومغناطیس، مشاهده می‌شود. با افزایش  $a$  (و یا  $n$ ) پراکنش مربوط به جفت‌شدگی الکترومغناطیس به سمت راست نمودار نایکوئیست (به سمت بسامدهای پایین‌تر) منتقل می‌شود؛ به طوری که در  $a$  (و یا  $n$ ) های بسیار بزرگ اثر پراکنش قطبش القایی محو می‌گردد (شکل‌های 8-الف و 8-ب). مقایسه شکل‌های 8-الف و 8-ب با شکل‌های 8-ج و 8-د نشان می‌دهد که برای نیم‌فضای همگن با رسانایی DC یکسان، بخش موهمی رهنبدی متقابل، وقتی نیم‌فضا قطبش‌ناپذیر باشد، بزرگ‌تر است (بیشینه مقادیر در محور عرض‌ها در دو شکل با هم مقایسه شود).

9 اثر پارامترهای قطبش القایی نیم‌فضای همگن بر رهنبدی متقابل آن

در بخش قبلی به بررسی هندسه آرایه الکتروودی بر رهنبدی متقابل نیم‌فضای همگن قطبش‌ناپذیر و قطبش‌پذیر پرداخته شد. در ادامه به بررسی اثر پارامترهای مختلف قطبش القایی نیم‌فضا (مطابق مدل کول-کول) بر رهنبدی متقابل آن با ذکر مثال‌هایی پرداخته می‌شود. در این حالت هندسه آرایه الکتروودی ثابت در نظر گرفته می‌شود.

الف- تأثیر ثابت زمانی نیم‌فضای قطبش‌پذیر بر پاسخ رهنبدی متقابل

ثابت زمانی ( $\tau$ ) مدل کول-کول باعث جابه‌جایی بیشینه نمودار فاز در گستره طیف بسامد می‌شود (میجر و سیلیک، 1981). بنابراین با افزایش مقادیر ثابت زمانی ( $\tau$ ) بیشینه نمودار فاز در بسامدهای پایین‌تر ظاهر می‌شود. در حالتی که اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس وجود ندارد،

نمودار نایکوئیست پاسخ رهنبدی متقابل وقتی اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس وجود ندارد نیز نشان داده شده است (منحنی‌های نشان داده شده با نام Cole-Cole model). با توجه به این که هر دو بخش حقیقی  $(\rho' = |\rho| \cos \varphi)$  و موهومی  $(\rho'' = |\rho| \sin \varphi)$  رهنبدی متقابل شامل دامنه مقاومت ویژه الکتریکی  $|\rho|$  که خود تابعی است از مقاومت ویژه نیم‌فضای همگن قطبش‌پذیر، هستند، با کوچک شدن مقاومت ویژه نیم‌فضای همگن، هر دو بخش حقیقی و مجازی رهنبدی متقابل نیز کوچک می‌شود. به عبارت دیگر، این امر دلالت بر کوچک شدن اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس ندارد. همان‌طور که از شکل 9-د دیده می‌شود، با افزایش رسانایی نیم‌فضا، نسبت  $\rho''/\rho_0$  بزرگ شده و لذا در کل اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس افزایش می‌یابد. به-هرحال، همان‌طور که از شکل 9-د برمی‌آید، نمودار نایکوئیست در بیان اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس نیم‌فضای همگن قطبش‌پذیر نیز دچار ضعف است.

## 10 داده‌های صحرائی

شکل 10 نمودار نایکوئیست داده‌های صحرائی قطبش القایی طیفی برداشت‌شده بر روی یک سکانس ضخیم یخرفت رُسی را با استفاده از آرایه الکترودی دوقطبی-دوقطبی خطی با طول دوقطبی  $a = 30 \text{ m}$  و فاصله بین دوقطبی  $a = 3 \text{ m}$  نشان می‌دهد [38]. داده‌ها در طیف بسامدی 0.125 تا 9216 هرتز شامل 30 بسامد با دستگاه شرکت Zonge به‌دست آمده است. در شکل 10 پراکنش جفت‌شدگی الکترومغناطیس به‌وضوح دیده می‌شود، در صورتی که پراکنش قطبش القایی به سختی در محدوده بسامدی پایین طیف (سمت راست نمودار) دیده می‌شود. این امر می‌تواند به دلیل کوچک بودن هر دوی بارپذیری و ثابت زمانی به وجود آمده باشد (به شکل 9 مراجعه شود). با استفاده از نرم‌افزار CRIDmod، پارامترهای قطبش

متفاوت باشند، پیچیده‌تر می‌شود، چرا که  $C$  با توزیع اندازه ذرات کانه ارتباط دارد (پلتون و همکاران، 1978).

## ج- تأثیر بارپذیری نیم‌فضای همگن قطبش‌پذیر بر پاسخ رهنبدی متقابل

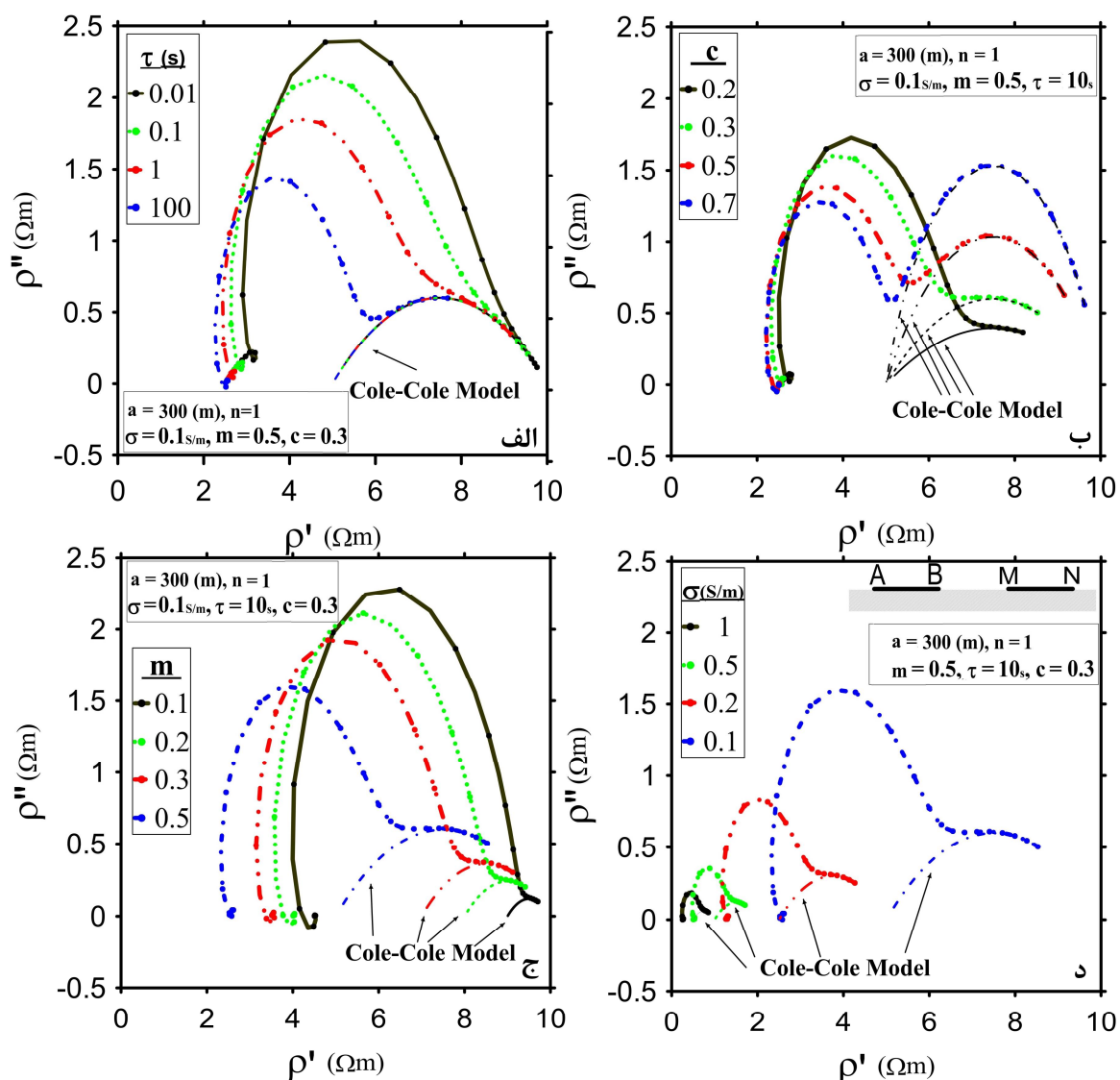
شکل 9-ج نمودار نایکوئیست رهنبدی متقابل حاصل از برداشت قطبش القایی طیفی با استفاده از آرایه الکترودی دوقطبی-دوقطبی خطی بر روی یک نیم‌فضای همگن قطبش‌پذیر را وقتی پارامتر بارپذیری کول-کول تغییر می‌کند، نشان می‌دهد. همچنین در این نمودار تغییر بارپذیری کول-کول وقتی اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس وجود ندارد، نشان داده شده است (منحنی‌های نشان داده شده با نام Cole-Cole model). در این حالت افزایش بارپذیری  $m$ ، باعث افزایش بخش موهومی رهنبدی متقابل قطبش القایی (سمت راست منحنی شکل 9-ج) و کاهش بخش موهومی مرتبط با جفت‌شدگی الکترومغناطیس (بخش بسامد بالای نمودارهای شکل 9-ج: سمت چپ منحنی‌ها). به‌هرحال، این نمودارها نشان می‌دهند که تفکیک دو اثر قطبش القایی و جفت‌شدگی الکترومغناطیس وقتی دامنه قطبش القایی بزرگ‌تر باشد ( $m$  بزرگ‌تر)، ساده‌تر است. به عبارت دیگر، در برداشت‌های زیست‌محیطی و در حالتی که عیار کانه در اندیس معدنی کم باشد، تفکیک این دو اثر پیچیده‌تر بوده و لذا تخمین پارامترهای قطبش القایی با خطای بیشتر همراه خواهد بود.

## د- تأثیر رسانایی الکتریکی نیم‌فضای همگن قطبش‌پذیر بر پاسخ رهنبدی متقابل

شکل 9-د نمودار نایکوئیست پاسخ رهنبدی متقابل برداشت قطبش القایی طیفی با استفاده از آرایه الکترودی دوقطبی-دوقطبی خطی بر روی نیم‌فضای قطبش‌پذیر وقتی رسانایی الکتریکی آن تغییر می‌نماید، را نشان می‌دهد.

که در ابتدا حدس زده شده بود، دامنه قطبش القایی (بارپذیری) بسیار کوچک است. مقاومت ویژه الکتریکی DC به صورت تقریبی نزدیک به مقدار مقاومت ویژه حقیقی در بسامد پایین (اولین نقطه نمودار در سمت راست) است.

القایی بر پایه مدل کول-کول تخمین زده شده و در نهایت رهنبدی متقابل مربوطه که بهترین انطباق را با داده‌های صحرائی داشته باشد، محاسبه شده است (خط پُر در شکل 10). پارامترهای قطبش القایی نیم‌فضای همگن منتهجه برابر با  $\rho_0 = 59$  اهم‌متر،  $m = 0.07$ ،  $c = 0.35$  و ثابت زمانی  $\tau = 5 \times 10^{-4}$  ثانیه به دست آمده است. همان‌گونه

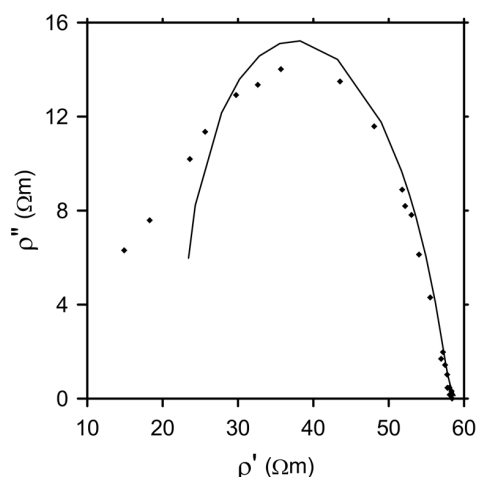


شکل 9. نمودار نایکوئیست پاسخ رهنبدی متقابل در برداشت قطبش القایی با استفاده از آرایه الکتروودی دوقطبی-دوقطبی خطی برای مدل نیم‌فضای همگن قطبش-پذیر برای بررسی میزان تأثیرگذاری (الف) ثابت زمانی کول-کول، (ب) ثابت بسامدی کول-کول، (ج) بارپذیری کول-کول و (د) رسانایی الکتریکی DC بر اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس. بر روی شکل، پارامترهای قطبش القایی زمین (پارامترهای مدل کول-کول) آورده شده است.

و سلیک، 1981). در سال‌های اخیر به بررسی هم‌زمان هر دو اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس و قطبش القایی در رهنبدی متقابل زمین به‌عنوان پاسخ کلی زمین و وارون-سازی رهنبدی متقابل پرداخته شده است (اینگمن نیلسن و بومگارتتر، 2006b؛ قربانی و همکاران، 2009). اخیراً کاهش اثرات القایی بر داده‌ها با به‌کار بردن چینش مناسب کابل‌های جریان الکتریکی در حین برداشت صحرایی مطرح شده است (اشموتز و همکاران، 2014).

اثر هندسه آرایه الکترودی و رسانایی الکتریکی DC زمین بر نتایج برداشت صحرایی قطبش القایی طیفی به‌خوبی شناخته شده است (برای مثال، روث و اولدنبرگ، 2001). به‌رحال، اثر دیگر پارامترهای موثر بر قطبش القایی زمین مانند بارپذیری، ثابت زمانی و ثابت بسامدی (با در نظر گرفتن مدل کول-کول به‌عنوان مدل قطبش القایی زمین)، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این امر می‌تواند به این دلیل باشد که معادله رهنبدی متقابل ارائه شده توسط سوند (1949)، برای زمین با رسانایی حقیقی (بدون در نظر گرفتن اثرات قطبش القایی) ارائه و حل شده است.

در این مطالعه، پاسخ کلی قطبش القایی طیفی (رهنبدی متقابل، مشکل از پاسخ قطبش القایی خالص و اثر جفت‌شدگی الکترومغناطیس) بر روی یک زمین نیم‌فضای همگن قطبش‌پذیر با انتخاب آرایه الکترودی دوقطبی-دوقطبی، با ثابت در نظر گرفتن هندسه آرایه الکترودی (طول آرایه الکترودی و فاصله بین دوقطبی‌های جریان و پتانسیل) با استفاده از نرم‌افزار CR1Dmod برای مثال‌هایی محاسبه شد. تأثیر پارامترهای ذاتی محیط قطبش‌پذیر (با فرض استفاده از مدل کول-کول) بر پاسخ کل (رهنبدی متقابل) با استفاده از نمودارهای نایکوئیست به‌طور کیفی بررسی و مقایسه شد. همچنین تأثیر پارامترهای هندسه آرایه الکترودی ( $a, n$ ) نیز با استفاده از نمودارهای نایکوئیست بررسی گردید.



شکل 10. نمودار نایکوئیست داده‌های صحرایی قطبش القایی طیفی (نقاط) بر روی یک لایه ضخیم یخرفت رُسی با استفاده از آرایه الکترودی دوقطبی-دوقطبی خطی با طول دوقطبی  $a=30\text{ m}$  و فاصله بین دوقطبی  $a=3$  (اینگمن نیلسن و بومگارتتر، 2006a). خط پُر رهنبدی متقابل محاسبه‌شده با نرم‌افزار CR1Dmod به‌منظور انطباق به داده‌های صحرایی. پارامترهای قطبش القایی نیم‌فضای همگن با  $\rho_0=59$  اهم متر،  $m=0.07$ ،  $c=0.35$  و ثابت زمانی  $\tau=5 \times 10^{-4}$  ثانیه.

## 11 نتیجه‌گیری

با توجه به افزایش کاربردهای روش قطبش القایی طیفی در سال‌های اخیر، بررسی و یافتن راه حل برای محدودیت‌های آن ضروری به نظر می‌رسد. به‌دلیل استفاده از سیگنال جریان متغیر با زمان در این روش (در محدوده بسامدهایی که منجر به القاء الکترومغناطیس بین کابل جریان، زمین و کابل پتانسیل می‌شوند)، جفت‌شدگی الکترومغناطیس بین زمین و کابل‌های جریان و پتانسیل رخ می‌دهد و پاسخ الکتریکی زمین را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به همین دلیل محاسبه پاسخ رهنبدی متقابل زمین و جدایش پاسخ الکتریکی و الکترومغناطیس زمین ضروری به نظر می‌رسد. در سال‌های گذشته از جنبه‌های مختلف به این موضوع پرداخته شده است. با توجه به پیچیدگی موضوع رشد چندانی در این زمینه روی نداده است. در گذشته بیشتر به جدایش پاسخ قطبش القایی از داده‌های صحرایی پرداخته شده است (پلتون و همکاران، 1978؛ ویت و گروسکا، 1986؛ روث و اولدنبرگ، 2001؛ میجر

پیچیده تر بوده و لذا تخمین پارامترهای قطبش القایی با خطای بیشتر همراه خواهد بود.

- نتایج فوق با یک مثال از داده های صحرائی بررسی و با نتایج وارون سازی کنترل شد.

#### تشکر و قدردانی

در اینجا لازم است از دو داور محترم که با ارائه نظرات خود باعث ارتقاء کیفی مقاله شدند، تشکر و قدردانی گردد.

#### منابع

- Abdel Aal, G. Z., Slater, L. D., and Atekwana, E. A., 2006, Induced-polarization measurements on unconsolidated sediments from a site of active hydrocarbon biodegradation: *Geophysics*, **71**(2), H13–H24.
- Attwa, M., and Günther, T., 2013, Spectral induced polarization measurements for environmental purposes and predicting the hydraulic conductivity in sandy aquifers: *Hydrology and Earth System Sciences*, **10**, 5315–5354, doi: 10.5194/hessd-10-5315-2013.
- Binley, A., Slater, L. D., Fukes, M., and Cassiani, G., 2005, Relationship between spectral induced polarization and hydraulic properties of saturated and unsaturated sandstone: *Water Resources Research*, **41**, W12417.
- Bhattacharyya, B. K., 1957, Propagation of an electric pulse through a homogeneous and isotropic medium: *Geophysics*, **22**, p. 905.
- Brown, R. J., 1985, EM coupling in multifrequency IP and a generalization of the Cole–Cole impedance model: *Geophys. Prospect.*, **33**, 282–302.
- Cole, K. S., and Cole, R. H., 1941, Dispersion and absorption in dielectrics, *J. Chem. Phys.*, **9**, 341–351.
- Cooley, J. M., and Tukey, J. M., 1965, An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series: *Math. of Comput.*, **19**, p. 297.
- Dey, A., and Morrison, H. F., 1973, EM coupling in frequency and time-domain induced-polarization surveys over a multilayered
- نتایج حاصل از مدل سازی برداشت قطبش القایی طیفی بر روی یک نیم فضای همگن با مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی نشان می دهد که با وجود جابه جایی طیف فاز در طول محور بسامد، شکل نمودارهای نایکوئیست با تغییر هندسه آرایه الکتروودی، بر هم منطبق خواهند بود. از سوی دیگر با انتخاب نیم فضای همگن قطبش پذیر، اثر جفت شدگی الکترومغناطیس با کاهش فاصله دوقطبی های جریان و پتانسیل و طول آنها، کاهش پیدا کرده و نمودارهای نایکوئیست آنها بر هم منطبق نخواهند بود. برای نیم فضای همگن با رسانایی DC یکسان، بخش موهومی رهنبدی متقابل، وقتی نیم فضا قطبش ناپذیر باشد، بزرگ تر است.
- در این مطالعه اثر پراکنش جفت شدگی الکترومغناطیس در بسامدهای بسیار پایین و کوچک بودن پاسخ قطبش القایی زمین نسبت به اثر جفت شدگی در حالات مختلف نشان داده شد.
- نتایج این مطالعه نشان می دهد که:
- وقتی اختلاف دو ثابت زمانی پراکنش جفت شدگی الکترومغناطیس و ثابت زمانی قطبش القایی کوچک شود، تفکیک این دو پراکنش پیچیده می گردد. به عبارت دیگر، تخمین ثابت زمانی کانه های پرفیری با ابعاد ریزتر با خطا همراه خواهد بود.
- تفکیک دو اثر قطبش القایی و جفت شدگی الکترومغناطیس وقتی مقدار ثابت بسامدی کوچک باشد، پیچیده تر است. به عبارت دیگر، تخمین پارامترهای قطبش القایی کانسارهای پرفیری وقتی توزیع دانه بندی کانه در اندیس معدنی وسیع باشد، پیچیده تر می شود.
- به دلیل کوچک بودن بارپذیری در برداشت های زیست محیطی و در حالتی که عیار کانه در اندیس معدنی کم باشد، تفکیک این دو اثر



- Application of Spectral Induced Polarization: Geophysical Monograph Series.
- Madden, T. R., and Cantwell, T., 1967, Induced polarization, A review: in Sumner, J. S., ed., Mining Geophysics, Vol. II, SEG, 373–400.
- Major, J. and Silic, J., 1981, Restrictions on the use of Cole–Cole dispersion models in complex resistivity interpretation: Geophysics, **46**, 916–931.
- Marshall, D. J., and Madden, T. R., 1959, Induced polarization — A study of its causes: Geophysics, **24**, 790–816.
- Millett, F. B., 1967, Electromagnetic coupling of collinear dipoles on a uniform half-space: in Mining Geophysics, 2, Tulsa, SEG.
- Morrison, H. F., Phillips, R. J., and O'Brien, D. P., 1969, Quantitative interpretation of transient electromagnetic fields over a layered half-space: Geophysical Prospect, **17**, p. 82.
- Pelton, H., Hallof, G., and Smith, J., 1972, Parameters to describe second order IP effects in the frequency domain: McPhar Geophysics Ltd, Toronto.
- Pelton, H., Smith, D., and Sill, W. R., 1977, Interpretation of complex resistivity and dielectric data: Phoenix Geophysics Ltd, Willowdale (Toronto).
- Pelton, W. H., Ward, S. H., Hallof, P. G., Sill, W. R. and Nelson, P. H., 1978, Mineral discrimination and removal of inductive coupling with multifrequency IP: Geophysics, **43**(3), 588–609.
- Revil, A., Schmutz, M., and Batzle, M., 2011, Influence of oil wettability upon spectral induced polarization of oil-bearing sands: Geophysics, **76**(5), A31–A36, doi: 10.1190/geo2011-0006.1.
- Riordan, J., and Sunde, E. D., 1933, Mutual impedance of grounded wires for stratified two-layer earth: Bell System Tech. J., 12,
- Routh, P. S. and Oldenburg, D. W., 2001, Electromagnetic coupling in frequency-domain induced polarization data: A method for removal: Geophys. J. Int., **145**, 59–76.
- Schmutz, M., Ghorbani, A., Vaudelet, P., and Blondel, A., 2014, Cable arrangement to reduce electromagnetic coupling effects in spectral-induced polarization studies: Geophysics, **79**(2), A1–A5. doi: 10.1190/geo2013-0301.1
- Van Voorhis, G. D., Nelson, P. H. and Drake, T. L., 1973, Complex resistivity spectra of porphyry copper mineralization: Geophysics, Earth: Geophysics, **38**, 380–405, doi: 10.1190/1.1440348.
- Foster, R. N., 1933, Mutual impedance of grounded wires lying on or above the surface of the earth: Bell System Tech. J., 12,
- Gasperikova, E., and Morrison, H. F., 2001, Mapping of induced polarization using natural fields: Geophysics, **66**, 137–147.
- Ghorbani, A., Camerlynck, C., and Florsch, N., 2009, CR1Dinv: A Matlab program to invert 1D Spectral Induced Polarization data for Cole–Cole model including electromagnetic effects: Computers and Geosciences, **35**, 255–266.
- Ingeman-Nielsen, T., and Baumgartner, F., 2006a, Numerical modeling of complex resistivity effects on a homogenous half-space at low frequencies: Geophysical Prospect, **54**, 261–271.
- Ingeman-Nielsen, T., and Baumgartner, F., 2006b, CR1Dmod: A Matlab program to model 1D complex resistivity effects in electrical and EM surveys: Computers and Geosciences, **32**, 1411–1419.
- Hallof, P. G. and Pelton, H., 1980, Spectral IP survey of Hura deposit (line 50 800 N) Cobar, NSW: In the Geophysics of the Elura Orebody, Cobar, New South Wales (ed. Emerson, D.W.), The Australian Society of Exploration Geophysicists (ASEG), Australia, 54–58.
- Hohmann, G. W., 1970, Electromagnetic coupling between grounded wires at the surface of a two-layer earth: personal communication.
- Katsube, T. J., Collett, L. S., 1973, Electrical characteristic differentiation of sulphide minerals by laboratory techniques: Geophysics, **38**, 1207.
- Kay, A. E., 1981, The effects of Low Temperature on the Induced Polarization Response of Mississippi Valley-type Ore Samples: MSc thesis, University of Calgary.
- Kay, A. E., and Duckworth, 1983, The effect of permafrost on the IP response of lead zinc ores: J. Canadian Soc. Exploration Geophysicists, **19**, 75–83.
- Kemna, A., Binley, A. and Slater, L., 2004, Crosshole IP imaging for engineering and environmental applications: Geophysics, **69**, 97–107.
- Klein, J. D., and Sill, W. R., 1982, Electrical properties of artificial clay-bearing sandstone: Geophysics, **47**(11), 1593–1605.
- Luo, Y., and Zhang, G., 1998, Theory and

- Wait, J. R., 1951, The magnetic dipole over the horizontally stratified earth: *Can. J. of Physics*, **29**, p. 577.
- Wait, J. R., and Gruszka, T. P., 1986, On electromagnetic coupling removal from induced polarization surveys: *Geoexploration*, **24**, 21–27.
- Wong, J., 1979, An electrochemical model of the induced-polarization phenomenon in disseminated sulfide ores: *Geophysics*, **44**, 1245–1265.
- Wynn, J. C., and Zonge, K. L., 1977, Electromagnetic coupling: *Geophys. Prospect.*, **25**, 29–51.
- 38, 49–60.
- Sunde, E. D. 1949, *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*: Van Nostrand, New York.
- Vanhala, H., 1997a, *Laboratory and Field Studies of Environmental and Exploration Applications of the Spectral Induced Polarization (SIP) Method*: PhD thesis, Geological survey of Finland.
- Vanhala, H., 1997b, Mapping oil-contaminated sand and till with the Spectral Induced Polarization (SIP) method: *Geophys. Prospect.*, **45**, 303–326.