

ژئوالکتریک و  
الکترومغناطیس صحرایی  
اصول و تفسیر

www.ketab.ir

تالیف: دکتر لطیف صمدی  
دانشگاه خوارزمی



## پیشگفتار

ژئوالکتریک به مجموعه روش های الکتریکی و الکترومغناطیسی اطلاق می شود که در کاوش های زیر زمینی برای آشکارسازی طیف وسیعی از ابهامات زمین شناسی بکار می روند. ژئوالکتریک بخشی از ژئوفیزیک کاربردی است و برای شناخت پوسته زمین، اکتشاف مواد معدنی، شناسایی ذخایر آب زیر زمینی و موارد متعدد دیگر کاربرد دارد. اصول فیزیک، روش بر میدان های الکتریکی و الکترومغناطیسی استوار است. این میدان ها منشأ طبیعی و یا مصنوعی دارند. در روش ژئوالکتریک معمولاً پتانسیل الکتریکی، گرادیان پتانسیل و شدت میدان های الکتریکی و مغناطیسی اندازه گیری می شوند. این روش ها به شیوه های مختلفی اجرا می شوند و می توانند از سطح زمین، درون چاه، معادن و یا داخل تونل ها بکار روند. ژئوالکتریک روش بی بدیل ژئوفیزیکی و رقیب جدی حفاری است. در این روش به جای حفاری که بطور مستقیم به مواد معدنی دسترسی پیدا می کند، ابزار مطالعاتی میدان های الکتریکی و الکترومغناطیسی هستند. این امواج ضمن انتشار در داخل زمین اطلاعات مربوط به والی لایه ها، عوامل تکتونیکی، وجود نفت و گاز، زون های فلزی و غیر فلزی، آب های زیر زمینی و کم و کیف آنها را در سطح زمین حمل می کنند. روش های ژئوالکتریکی مانند دیگر روش های ژئوفیزیکی ارتباط نزدیکی با علوم زمین نظیر سنگ شناسی، فیزیک سنگ، ژئوتکنیک، زمین شناسی ساختمانی، زمین شناسی اقتصادی و آب شناسی دارند. کاربرد اولیه روش های ژئوالکتریکی به اوایل قرن بیستم برمی گردد، بطوریکه دانشمندان فرانسوی برادران شلومبرژه (1910-1912) برای اولین بار روش های چاهک الکتریکی و پد فیل زنی الکتریکی را مطرح کردند. امروزه با گذشت یک قرن هنوز روش ابداع شده توسط برادران شلومبرژه مورد استفاده قرار می گیرد و دامنه کاربرد آنها همراه با توسعه روش روز بروز بیشتر و بیشتر می شود. از روش های ژئوالکتریکی بطور گسترده در اکتشاف و پی جویی کانسار های فلزی و غیر فلزی، مطالعه سفره های آب های زیرزمینی، مطالعات تکتونیکی، بررسی ساختار پوسته زمین، مهندسی پی و ساختمان، پروژه ها و تاسیسات آبی، ساختگاه سد ها و مطالعات اولیه مسیر احداث راه و جاده و موارد متعدد دیگر

استفاده می شود. این کتاب در هفت فصل تدوین شده است در فصل اول به خواص الکتریکی و الکترومغناطیسی مواد و سنگ ها پرداخته می شود. در فصل دوم تئوری میدان الکتریکی و الکترومغناطیسی بطور اجمال مرور می شود. در فصل سوم با خلاصه ای از مجموعه روش های ژئوالکتریک و طبقه بندی آنها آشنا می شویم. در فصل چهار به اصول روش، مبانی تئوری، نحوه برداشت صحرایی و تعبیر و تفسیر داده ها در روش جریان ثابت که به آن روش مقاومت الکتریکی می گویند پرداخته می شود. فصل پنجم شامل روش های الکترومغناطیس فرکانسی (چاهک فرکانسی)، الکترومغناطیس حوزه زمان - چاهک گذری (TDEM-TS)، روش منیتوتلوریک (MT)، روش فرکانس صوتی (AFMAG)، روش فرکانس بسیار پایین (VLF) و ژئوالکتریک هوابرد می باشد. در فصل شش روش های خطی و "قایی و پتانسیل خودزا بررسی می شوند. در فصل هفتم مجموعه سولاتی برای خرد آبی طرح شده است. این سولات از متن کتاب و برای تک تک فصل ها بطور جداگانه استخراج است. در این فصل مجموعه ای از دادهای چاهک الکتریکی منفرد که توسط طریقه طراحی و برداشت شده است برای تفسیر و شناخت اصل عدم قطعیت توسط عزیزان شنجانده شده است. همچنین داده های چاهک الکتریکی قائم یک پروفیل صحرایی در یک مطالعه میدانی توسط نویسنده برای تفسیر و رسم مقطع ژئوالکتریک آمده است. منابع و واژه نامه بخش پایانی کتاب را تشکیل می دهند. این کتاب برای مهندسين و دانشجویان ژئوفیزیک، معدن و زمین شناسی، عمران و ژئوتکنیک و عزیزان بخش های عمرانی در امور کشاورزی تدوین شده است. امید است عزیزان و مخاطبین محترم قبول زحمت نموده و اشکالات، ایهامات و ایرادات احتمالی را با آدرس ایمیلی که در زیر این صفحه درج شده است به اطلاع اینجانب برسانند. عزیزان و دوستان زیادی در فراهم شدن این مجموعه برای چاپ زحمت کشیده اند و از همه آنان تشکر می شود. از آقای مهندس مهدی حیدری برای کمک در طرح جلد مجموعه تشکر ویژه دارد. امید است با استفاده از منابع علمی داخلی بتوانیم در نهادینه شدن تولید منابع علمی ملی و بومی در کشور سهیم باشیم. به امید حق انشالله.

|    |                                                           |
|----|-----------------------------------------------------------|
| ۷  | پیش گفتار                                                 |
| ۱۷ | فصل ۱: خواص ژئوالکتریکی مواد معدنی و سنگ ها               |
| ۱۹ | ۱-۱ رسانایی الکتریکی مواد معدنی                           |
| ۱۹ | ۱-۱-۱ ماهیت رسانایی الکتریکی مواد معدنی                   |
| ۲۲ | ۱-۱-۲ مقاومت ویژه مواد معدنی و سنگ ها                     |
| ۲۲ | ۱-۱-۳ عامل موثر در مقاومت الکتریکی ویژه                   |
| ۲۴ | ۱-۱-۱-۱ تخلخل                                             |
| ۲۴ | ۱-۱-۳-۲ رطوبت و آب                                        |
| ۲۵ | ۱-۱-۳-۱ املاح                                             |
| ۲۵ | ۱-۱-۳-۲-۱ تحت فشار                                        |
| ۲۶ | ۱-۱-۳-۱-۱-۵ درج حرارت و فشار                              |
| ۲۷ | ۱-۱-۴ ویژگی الکتریکی محلول های                            |
| ۲۹ | ۲-۱ ویژگی الکترو شیمیایی                                  |
| ۲۹ | ۱-۲ کلیات                                                 |
| ۳۰ | ۲-۲ پتانسیل اکسیداسیون و احیا                             |
| ۳۰ | ۳-۲-۱ پتانسیل جنبشی (فیلتر شدن)                           |
| ۳۱ | ۴-۲-۱ پتانسیل هم جوی سیالات                               |
| ۳۴ | ۵-۲-۱ پتانسیل جداری یا غشائی                              |
| ۳۷ | ۳-۱ تراوایی مغناطیسی مواد                                 |
| ۳۹ | ۴-۱ تراوایی دی الکتریکی مواد                              |
| ۴۱ | ۵-۱ قطبش القایی                                           |
| ۴۱ | ۱-۵-۱ اصول فیزیکی قطبش القایی                             |
| ۴۵ | فصل ۲: میدان های الکتریکی و الکترو مغناطیسی در ژئوالکتریک |
| ۴۷ | ۱-۲ میدان الکترومغناطیسی                                  |
| ۴۷ | ۱-۱-۲ کلیات                                               |
| ۴۸ | ۲-۱-۲ معادلات ماکسول                                      |
| ۵۰ | ۳-۱-۳ شرایط مرزی                                          |

|    |                                                                |
|----|----------------------------------------------------------------|
| ۵۲ | ۲-۲ میدان الکتریکی جریان ثابت                                  |
| ۵۲ | ۱-۲-۲ معادلات ماکسول                                           |
| ۵۳ | ۲-۲-۲ شرایط مرزی                                               |
| ۵۵ | فصل ۳: طبقه بندی روش های ژئوالکتریک                            |
| ۵۷ | ۱-۳ روش های ژئوالکتریک ساختاری                                 |
| ۵۷ | ۱-۱-۳ کلیات روش ها                                             |
| ۵۹ | ۲-۱-۳ چاهک الکتریکی قائم                                       |
| ۶۰ | ۳-۳ چاهک دوقطبی قائم                                           |
| ۶۰ | ۴-۱-۳ پین-پین الکتریکی                                         |
| ۶۱ | ۵-۱-۳ چاهک مرکزانی                                             |
| ۶۱ | ۶-۱-۳ چاهک مرکز                                                |
| ۶۲ | ۷-۱-۳ چاهک متاوریک                                             |
| ۶۳ | ۸-۱-۳ پروفیل زنی میمونلورک                                     |
| ۶۳ | ۹-۱-۳ روش جریان های دایره ای                                   |
| ۶۳ | ۱۰-۱-۳ عمق کاوش روش های رزونانس                                |
| ۶۵ | ۲-۳ روش های ژئوالکتریک غیر ساختاری                             |
| ۶۷ | فصل ۴: روش مقاومت الکتریکی                                     |
| ۶۹ | ۱-۴ اصول تئوری روش مقاومت الکتریکی                             |
| ۶۹ | ۱-۱-۴ مقدمه                                                    |
| ۷۰ | ۲-۱-۴ میدان چشمه نقطه ای جریان ثابت در محیط یکنواخت و نازک پهن |
| ۷۲ | ۳-۱-۴ میدان دوقطبی الکتریکی جریان ثابت                         |
| ۷۵ | ۲-۴ عمق کاوش در روش مقاومت الکتریکی                            |
| ۷۵ | ۱-۲-۴ ایده چاهک الکتریکی قائم                                  |
| ۷۹ | ۳-۴ مقاومت الکتریکی ویژه ظاهری                                 |
| ۷۹ | ۱-۳-۴ مفهوم فیزیکی                                             |
| ۸۰ | ۱-۳-۴ روش محاسبه                                               |
| ۸۳ | ۴-۴ آرایه های ژئوالکتریک                                       |
| ۸۳ | ۱-۴-۴ انواع آرایه ها                                           |
| ۸۴ | ۱-۱-۴-۴ آرایه شلومبرزه                                         |

|     |                                                               |
|-----|---------------------------------------------------------------|
| ۸۴  | ۴-۱-۲ آرایه و نر                                              |
| ۸۵  | ۴-۱-۳ آرایه سه الکترودی                                       |
| ۸۶  | ۴-۱-۴ آرایه دو الکترودی                                       |
| ۸۶  | ۴-۱-۵ آرایه های دو قطبی - دو قطبی                             |
| ۸۹  | ۴-۵ اثر مرز تماس لایه های زمین بر میدان الکتریکی              |
| ۸۹  | ۴-۵-۱ ضریب بازتاب                                             |
| ۹۱  | ۴-۵-۲ تاثیر مرز مشترک دو لایه بر میدان الکتریکی               |
| ۹۷  | ۴-۶ چاهک الکتریکی قائم با آرایه شلومبرژه                      |
| ۹۷  | ۴-۶-۱ سطح اجزا                                                |
| ۹۹  | ۴-۶-۱-۱ پابی نشت جریان الکتریکی                               |
| ۹۹  | ۴-۶-۲-۱ رسم تکا                                               |
| ۱۰۰ | ۴-۶-۲-۲ روش قطع جریان                                         |
| ۱۰۰ | ۴-۶-۳ کنترل خطی، اندر رگبی                                    |
| ۱۰۰ | ۴-۶-۴ نمودار صحرایی                                           |
| ۱۰۳ | ۴-۷ حل مستقیم در روش مقاومت الکتریکی                          |
| ۱۰۳ | ۴-۷-۱ اصول روش                                                |
| ۱۰۴ | ۴-۷-۲ روش بازتاب آینه ای                                      |
| ۱۰۵ | ۴-۷-۲-۱ میدان چشمه نقطه ای در سطح محیط دو لایه                |
| ۱۰۸ | ۴-۷-۲-۲ نمودار های دو لایه چاهک الکتریکی                      |
| ۱۱۴ | ۴-۷-۳ روش تحلیلی                                              |
| ۱۱۴ | ۴-۷-۳-۱ میدان چشمه نقطه ای در سطح محیط $\Pi$ لایه             |
| ۱۱۶ | ۴-۷-۳-۲ نمودار های سه لایه چاهک الکتریکی                      |
| ۱۲۰ | ۴-۷-۳-۳ نمودار چهار لایه چاهک الکتریکی (مثال)                 |
| ۱۲۲ | ۴-۷-۴ روش فیلتر خطی                                           |
| ۱۲۳ | ۴-۷-۵ روش دستی                                                |
| ۱۲۳ | ۴-۷-۵-۱ لایه معادل و نقاط معادل در نمودار های سه لایه         |
| ۱۲۴ | ۴-۷-۵-۲ روش تحلیلی برای تعیین نقاط معادل                      |
| ۱۲۶ | ۴-۷-۵-۳ رسم نمودار سه لایه با کمک نقاط معادل و نمودار دو لایه |
| ۱۲۸ | ۴-۷-۵-۴ نمودارهای کمکی ابرت برای تعیین نقاط معادل             |
| ۱۳۱ | ۴-۸ اصل هم ارزی در نمودارهای چاهک الکتریکی قائم               |
| ۱۳۱ | ۴-۸-۱ کمیت های ترکیبی (مقاومت عرضی و رسانایی طولی)            |

- ۱۳۴ ..... ۲-۸-۴ اصل هم ارزی
- ۱۳۵ ..... ۱-۲-۸-۴ اصل هم ارزی S2
- ۱۳۵ ..... ۲-۲-۸-۴ اصل هم ارزی T2
- ۱۳۹ ..... ۹-۴ تفسیر نمودارهای چاهک الکتریکی قائم
- ۱۳۹ ..... ۱-۹-۴ کلیات
- ۱۴۰ ..... ۲-۹-۴ مجانب نمودارهای مقطع دو لایه با سنگ کف نارسانا
- ۱۴۰ ..... ۳-۹-۴ مجانب نمودارهای سه لایه با سنگ کف نارسانا
- ۱۴۲ ..... ۴-۹-۴ تفسیر نمودارهای چاهک الکتریکی به روش دستی
- ۱۴۲ ..... ۱-۴-۹-۴ تفسیر نمودارهای سه لایه
- ۱۴۶ ..... ۲-۴-۹-۴ تفسیر نمودارهای چهار لایه با  $\rho_2$  و  $\rho_3$  معلوم
- ۱۴۸ ..... ۳-۴-۹-۴ تفسیر نمودارهای چهار لایه با  $\rho_2$  و  $\rho_3$  مجهول
- ۱۴۹ ..... ۵-۹-۴ تفسیر باکت رابانه
- ۱۵۱ ..... ۶-۹-۴ تفسیر دینی داده های ژئوالکتریکی
- ۱۵۱ ..... ۱-۶-۹-۴ نقشه هم مقدار رسانایی طولی S
- ۱۵۲ ..... ۲-۶-۹-۴ نقشه هم مقدار مقاومت عرضی T
- ۱۵۲ ..... ۳-۶-۹-۴ نقشه هم مقدار مقاومت ظاهری max و min
- ۱۵۲ ..... ۴-۶-۹-۴ نقشه هم مقدار مقاومت ظاهری برای AB های مساوی
- ۱۵۲ ..... ۵-۶-۹-۳ شبه مقطع عمودی
- ۱۵۳ ..... ۱۰-۴ پروفیل زنی ژئوالکتریکی
- ۱۵۳ ..... ۱-۱۰-۴ اصول روش
- ۱۵۴ ..... ۲-۱۰-۴ شناسایی ساختمان های طاقدیسی و ناودیسی
- ۱۵۷ ..... ۳-۱۰-۴ کاربرد های روش پروفیل زنی الکتریکی
- ۱۵۷ ..... ۴-۱۰-۴ شیوه های اجرای پروفیل زنی الکتریکی
- ۱۵۹ ..... ۱۱-۴ پروفیل زنی ترکیبی (شناسایی گسل)
- ۱۵۹ ..... ۱-۱۱-۴ مبانی تئوری روش
- ۱۶۳ ..... ۲-۱۱-۴ ویژگی مقاومت ظاهری پروفیل زنی ترکیبی در محل گسل
- ۱۶۴ ..... ۳-۱۱-۴ مثال عددی روش پروفیل زنی ترکیبی
- ۱۶۷ ..... فصل ۵: روش های الکترومغناطیسی (EM)
- ۱۶۹ ..... ۵-۱ چشمه های میدان الکترومغناطیسی (EM)
- ۱۶۹ ..... ۱-۱-۵ کلیات روش های EM

- ۱۷۰ ..... ۵-۱-۲ دوقطبی الکتریکی جریان متغير
- ۱۷۱ ..... ۵-۱-۳ دو قطبی مغناطیسی
- ۱۷۲ ..... ۵-۱-۴ ساختار میدان های الکتریکی و مغناطیسی
- ۱۷۳ ..... ۵-۱-۵ ویژگی کمی میدان جریان متغير
- ۱۷۴ ..... ۵-۱-۱ عدد موجی در محیط نارسانا و فرکانس بالا (شبه موجی)
- ۱۷۴ ..... ۵-۱-۲ عدد موجی در محیط رسانا و فرکانس پایین (شبه استاتیک)
- ۱۷۵ ..... ۵-۱-۶ طول موج و سرعت امواج الکترومغناطیسی
- ۱۷۵ ..... ۵-۱-۷ عمق و محدوده کاوش روش های EM
- ۱۷۵ ..... ۵-۱-۸ بطله عمق نفوذ جریان با طول موج
- ۱۷۷ ..... ۵-۱-۹ اعماق عمق کاوش با فاصله نسبی فرستنده و گیرنده
- ۱۷۸ ..... ۵-۱-۱۰ زمن دو رزون نزدیک
- ۱۷۹ ..... ۵-۲ سونداژ فرکانسی (FS)
- ۱۷۹ ..... ۵-۲-۱ اصول روش سونداژ فرکانسی
- ۱۸۱ ..... ۵-۲-۲ مقاومت ظاهری در روش فرکانسی
- ۱۸۲ ..... ۵-۲-۳ زون دور
- ۱۸۲ ..... ۵-۲-۴ زون نزدیک
- ۱۸۴ ..... ۵-۲-۵ ویژگی های نمودار سونداژ فرکانسی
- ۱۸۴ ..... ۵-۲-۶ مجانب راست نمودار سونداژ فرکانس وقتی سنگ کف عایق است
- ۱۸۸ ..... ۵-۲-۷ مطالعات صحرائی به روش فرکانسی
- ۱۹۱ ..... ۵-۳ الکترو مغناطیس حوزه زمان (TDEM)
- ۱۹۱ ..... ۵-۳-۱ سونداژ گذرا (TS)
- ۱۹۲ ..... ۵-۳-۲ ویژگی میدان گذرا
- ۱۹۳ ..... ۵-۳-۳ زون دور
- ۱۹۴ ..... ۵-۳-۴ زون نزدیک
- ۱۹۵ ..... ۵-۳-۵ مطالعات صحرائی باروش سونداژ گذرا TS
- ۱۹۹ ..... ۵-۴ روش منیتو تلوریک (MT)
- ۱۹۹ ..... ۵-۴-۱ مبانی فیزیکی روش MT
- ۲۰۱ ..... ۵-۴-۲ امواج الکترومغناطیسی تخت در محیط لایه ای موازی
- ۲۰۲ ..... ۵-۴-۳ امیدانس
- ۲۰۳ ..... ۵-۴-۴ مفهوم مقاومت ظاهری
- ۲۰۴ ..... ۵-۴-۵ روش اجرای MTS

|     |                                               |
|-----|-----------------------------------------------|
| ۲۰۵ | ۵-۵ روش الکترومغناطیسی با فرکانس شنوایی       |
| ۲۰۵ | ۵-۵-۱ اصول روش                                |
| ۲۰۵ | ۵-۵-۲ روش اندازه گیری                         |
| ۲۰۶ | ۵-۵-۳ معایب و مزایای روش                      |
| ۲۰۶ | ۵-۵-۴ کاربردهای روش                           |
| ۲۰۷ | ۵-۶ روش فرکانس خیلی پایین VLF                 |
| ۲۰۷ | ۵-۶-۱ اصول روش                                |
| ۲۰۹ | ۵-۶-۲ عمق کاوش                                |
| ۲۰۹ | ۵-۶-۳ ویژگی امواج الکترو مغناطیسی با چشمه VLF |
| ۲۰۹ | ۵-۶-۴ روش اندازه گیری صحرایی                  |
| ۲۱۰ | ۵-۶-۵ زاویه تابش                              |
| ۲۱۰ | ۵-۶-۶ مدت تتریابی                             |
| ۲۱۱ | ۵-۶-۷ اصول تتریابی                            |
| ۲۱۳ | ۵-۷ ژئوالکتریک هواپر در                       |
| ۲۱۳ | ۵-۷-۱ اصول روش                                |
| ۲۱۵ | فصل ۶ روش های دیگر ژئوالکتریکی                |
| ۲۱۷ | ۶-۱ روش قطبش القایی                           |
| ۲۱۷ | ۶-۱-۱ مقدمه                                   |
| ۲۱۸ | ۶-۱-۲ پتانسیل الکترولیتی در قطبش القایی       |
| ۲۱۸ | ۶-۱-۳ پتانسیل اکسیداسیون در قطبش القایی       |
| ۲۱۹ | ۶-۱-۴ شرایط تشکیل قطبش القایی                 |
| ۲۱۹ | ۶-۱-۵ روش های مطالعه قطبش القایی              |
| ۲۲۰ | ۶-۱-۵-۱ روش پالسی                             |
| ۲۲۱ | ۶-۱-۵-۲ روش جریان متغیر                       |
| ۲۲۲ | ۶-۱-۵-۳ آرایه روش قطبش القایی                 |
| ۲۲۲ | ۶-۱-۵-۴ کاربرد روش قطبش القایی                |
| ۲۲۵ | ۶-۲ روش پتانسیل خودزا (SP)                    |
| ۲۲۵ | ۶-۲-۱ اصول روش                                |
| ۲۲۷ | ۶-۲-۲ الکتروود غیر پلاریزه                    |
| ۲۲۷ | ۶-۲-۳ روش اجرای پتانسیل خودزا                 |

|     |                                                             |
|-----|-------------------------------------------------------------|
| ۲۲۸ | ..... ۴-۲-۶ کاربرد روش پتانسیل خودزا                        |
| ۲۲۹ | ..... فصل ۷ خودآزمایی                                       |
| ۲۳۱ | ..... ۱-۷ مجموعه سوالات                                     |
| ۲۳۱ | ..... ۱-۱-۷ مقدمه                                           |
| ۲۳۲ | ..... ۲-۱-۷ فصل ۱                                           |
| ۲۳۲ | ..... ۳-۱-۷ فصل ۲                                           |
| ۲۳۲ | ..... ۴-۱-۷ فصل ۳                                           |
| ۲۳۳ | ..... ۵-۱-۷ فصل ۴                                           |
| ۲۳۵ | ..... ۶-۱-۷ فصل ۵                                           |
| ۲۳۶ | ..... ۷-۱-۷ فصل ۶                                           |
| ۲۳۷ | ..... ۲-۷ مجموعه داده های جابجایی الکتریکی منفرد برای تفسیر |
| ۲۴۳ | ..... ۳-۷ تفسیر و رسم مقطع نهایی بکر (داده های صحرائی)      |
| ۲۴۷ | ..... منابع                                                 |
| ۲۴۹ | ..... واژه نامه                                             |