

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته: ژئوفیزیک

گرایش: ژئوالکتریک

پایان نامه کارشناسی ارشد

وارون سازی سه بعدی داده های مگنتوتلوریک

با استفاده از روش هایی بر اساس گرادیان

نگارنده: زهره نقدی

استاد راهنما:

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

شهریور ۱۳۹۵

تقدیر و تشکر

بر خود لازم میدانم از کلیه کسانی که بنده را در این مقطع تحصیلی و همچنین در تهیهی این پژوهش یاری نمودند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم؛ به خصوص از زحمات استاد محترم و گرانقدر جناب دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی که از ابتدای راه و در طی انجام این تحقیق، با راهنمایی‌های خود مرا در تهیهی این اثر علمی یاری نمودند همچنین از استاد عزیز سرکار خانم اعظم ربیعی که مرا مورد حمایت علمی خود قرار دادند. همچنین جناب دکتر عرب امیری و دکتر نجاتی، که زحمت داوری این پایان نامه را متقبل شدند. از خانواده عزیزم مخصوصاً پدر بزرگوار و مادر مهربانم به خاطر تمام محبت‌هایی که صادقانه و بدون هیچ چشم‌داشتی به من ارزانی داشتند و با حمایت‌های همه جانبه خود به من کمک نمودند تا مراتب تحصیلی و نیز پایان‌نامه درسی را به نحو احسن به اتمام برسانم، سپاسگزارم. از همسر دلسوز و مهربانم به خاطر فداکاری بی شائبه‌ی خود جهت گرما بخشی به محفل خانواده‌ام در کنار فرزندان عزیزم هما و همایون نهایت تشکر را دارم و امیدوارم خداوند منان از سر لطف، توفیق جبران ذره‌ای هر چند کوچک از زحمات این بزرگواران را به من عطا نماید. همچنین از کلیه دوستان دوره تحصیل خود مخصوصاً افسانه احمدپور و سحر معظم سپاسگزارم که در کنارشان علم آموختم و خاطرات خوبی را برای من رقم زدند.

تعهد نامه

اینجانب زهره نقدی سده دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک-ژئوالکتریک دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه وارون سازی سه بعدی داده های مگنتوتلوریک با استفاده از روش هایی بر اساس گرادیان تحت راهنمایی جناب آقای دکتر کامکار روحانی متعهد

می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

روش مگنتوتلوریک (MT) یک فن ژئوفیزیکی سطحی غیرفعال است که از میدان‌های سطحی غیرفعال الکترومغناطیسی طبیعی زمین برای بررسی ساختارهایی با مقاومت ویژه‌ی الکتریکی متفاوت زیرسطحی استفاده می‌کند. عمق بررسی روش MT بسیار بیشتر از دیگر روش‌های الکترومغناطیسی است. این روش به‌عنوان ابزار مقدماتی که می‌تواند تغییرات ضخامت را در حوزه‌های رسوبی بزرگ تعیین کند استفاده می‌شود. از آن‌جا که در اکثر موارد زمین واقعی تحت مطالعه دارای پیچیدگی‌های ذاتی است لذا انجام مدل‌سازی‌های یک‌بعدی و یا حتی دوبعدی برای نیل به مقاصد اکتشافی کافی نبوده و نیاز به انجام مدل‌سازی سه‌بعدی به خوبی احساس می‌شود.

ModEm یک سیستم مدولار برای وارون‌سازی داده‌های مگنتوتلوریک است که یک برنامه‌ی منظم با به کارگیری ۴ مؤلفه تانسور امپدانس محسوب می‌شود. داده‌های دوره بلند MT برداشت شده با دوره تناوب ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ ثانیه در ۱۱۰ سایت با کیفیت قابل توجه در شمال غرب اقیانوس اطلس آمریکا در سال ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ به‌منظور وارون‌سازی توسط این برنامه مورد استفاده قرار گرفت. در اجرای این برنامه بر روی مجموعه داده‌های MT ذکر شده، زمان مناسب برای انجام محاسبات برای ۱۶۲ تکرار ۱۲ ساعت بوده، که بهترین نتایج در تکرار ۱۶۲م با مقدار خطای $1/75798$ درصد به‌دست آمده است. قوی‌ترین عوارض آشکار شده با انجام وارون‌سازی اولیه‌ی سه‌بعدی این مجموعه داده‌ها، مناطق گسترده‌ای از رسانندگی بالا در پوسته پایینی زیر کل ناحیه Oregon جنوب‌شرقی و زیر منطقه Cascade بوده است که با پوسته‌ی با مقاومت‌ویژه بالا در منطقه Sietza و خلیج کلمبیا تباین قابل توجهی داشت. برای بررسی صحت نتایج از داده‌های باقی‌مانده استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که صحت نتایج وارون‌سازی قابل اعتماد هستند. **کلمات کلیدی:** مگنتوتلوریک، مدل‌سازی وارون سه‌بعدی، ModEm، گرادیان مزدوج غیرخطی.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات	۱
۱-۱ تعریف مسأله	۲
۲-۱ سابقه تحقیق	۳
۳-۱ اهداف و ضرورت انجام تحقیق	۴
۴-۱ روش انجام تحقیق	۵
۵-۱ ساختار پایان نامه	۵
فصل دوم: مبانی نظری روش مگنتوتلوریک	۷
۱-۲ چشمه‌های روش MT	۸
۲-۲ خواص الکتریکی سنگ‌ها	۱۰
۳-۲ القای الکترومغناطیس	۱۱
۴-۲ اساس معادلات القای الکترومغناطیس در زمین	۱۲
۵-۲ القای الکترومغناطیسی در یک نیم‌فضای همگن	۲۰
۶-۲ مقاومت ظاهری و فاز	۲۳
۷-۲ نیم‌فضای ناهمسانگرد	۲۵
۸-۲ القای الکترومغناطیسی در زمین یک‌بعدی	۲۶
۹-۲ القای الکترومغناطیسی در زمین دوبعدی	۲۸
۱۰-۲ القای الکترومغناطیسی در زمین سه‌بعدی	۳۳
۱۱-۲ مدل‌سازی پیشرو داده MT	۳۵
۱۲-۲ مدل‌سازی پیشرو در سه‌بعد	۳۶
۱۳-۲ وارون‌سازی داده‌های MT	۴۲
۱-۱۳-۲ وارون‌سازی خطی در فضای مدل	۴۳
۲-۱۳-۲ وارون‌سازی غیرخطی با استفاده از روش گرادیان مزدوج غیرخطی	۵۰
۱۴-۲ اعوجاج داده‌های MT	۵۲
۱-۱۴-۲ اثرات اعوجاج گالوانی	۵۲
۲-۱۴-۲ جابه‌جایی ایستا	۵۳
۳-۱۴-۲ اثرات اعوجاج القائی، سوق یافتگی جریان	۵۵
۴-۱۴-۲ اثرات توپوگرافی	۵۹
۵-۱۴-۲ ناهمسانگردی	۶۰
۱۵-۲ روش اجرای پیمایش	۶۱

۶۲	 ۱۶-۲ رزولوشن (تفکیک پذیری)
۶۳	 ۱۷-۲ روش های MT در برابر دیگر روش های الکتریکی و EM
۶۵	 فصل سوم: برنامه مدل سازی MODEM
۶۶	 ۱-۳ مقدمه
۶۶	 ۲-۳ نظریه و نمادها
۷۱	 ۳-۳ بررسی اجمالی برنامه MODEM
۷۷	 ۴-۳ موازی سازی
۸۰	 ۵-۳ لایه واسط
۸۲	 ۶-۳ حل کننده پیشرو
۸۳	 ۷-۳ توابع داده
۸۵	 ۸-۳ حل کننده ماتریس حساسیت
۸۶	 ۹-۳ گسسته سازی عددی
۹۰	 ۱۰-۳ مثال: EM سه بعدی
۹۰	 ۱-۱۰-۳ گسسته سازی عددی
۹۴	 ۲-۱۰-۳ لایه واسط
۹۷	 فصل چهارم: وارون سازی داده های MT
۹۸	 ۱-۴ مقدمه
۹۹	 ۲-۴ ساختار رسانندگی منطقه ای CASCADIA
۱۰۰	 ۳-۴ داده ی MT و آنالیز آن
۱۰۱	 ۴-۴ وارون سازی سه بعدی
۱۱۱	 فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۱۲	 ۱-۵ نتیجه گیری
۱۱۲	 ۲-۵ پیشنهادات
۱۱۴	 منابع

فهرست اشکال

- شکل (۱-۲): اعوجاج مگنتوسفر ناشی از تعاملات باد خورشیدی..... ۹
- شکل (۲-۲): رسانندگی الکتریکی سنگ‌های مختلف..... ۱۱
- شکل (۳-۲): اثر گالوانیک..... ۱۶
- شکل (۴-۲): رفتار میدان الکتریکی وابسته به عمق..... ۲۲
- شکل (۵-۲): مدل شماتیک مدل مقاومت یک‌بعدی با ρ متغیر در جهت z ۲۶
- شکل (۶-۲): مدل مقاومت دو بعدی با یک تماس جانبی در جهت x ۲۹
- شکل (۷-۲): مدل مقاومت سه‌بعدی..... ۳۵
- شکل (۸-۲): شبکه‌های عددی استفاده شده در روش تفاضل محدود..... ۳۹
- شکل (۹-۲): بخش کوچکی از شبکه شطرنجی استفاده شده برای محاسبه‌ی مولفه‌های میدان الکتریکی..... ۴۱
- شکل (۱۰-۲): نمودار گردشی برای روش گرادیان مزدوج در حل معادلات نرمال خطی شده..... ۵۳
- شکل (۱۱-۲): اثر انحراف جریان عمودی روی مقاومت ویژه برای E عمودی در یک مدل دوبعدی..... ۵۹
- شکل (۱۲-۲): ابعاد یک توده با مقاومت ویژه ρ_2 در پریودها و عمق نفوذهای مختلف..... ۶۱
- شکل (۱۳-۲): اثر مقاومت ویژه ظاهری ناهمسانگرد لایه دوم در یک مدل سه‌بعدی..... ۶۴
- شکل (۱-۳): نمایش نموداری از ModEm..... ۷۵
- شکل (۲-۳): شبه کد برای رابط ارسال پیام (MPI) اجرای ماژول..... ۸۳
- شکل (۳-۳): شبکه تفاضل محدود شطرنجی برای مسئله پیشرو سه‌بعدی MT..... ۹۵
- شکل (۱-۴): محل سایت‌های جمع‌آوری شده داده‌های MT..... ۱۰۶
- شکل (۲-۴): نمودار خطای مراحل تکرار شونده در مقابل تعداد تکرارها..... ۱۰۷
- شکل (۳-۴): مدل مقاومت ویژه (Ωm) و فاز رسم شده برای عمق ۰ تا ۱۵۰ کیلومتر..... ۱۱۱
- شکل (۴-۴): مدل مقاومت ویژه (Ωm) و فاز رسم شده برای عمق ۲۰۰ تا ۴۰۰ کیلومتر..... ۱۱۴

فهرست جداول

- جدول (۱-۲): ورودی‌های تانسور امیدانس Z در برابر توزیع رسانندگی همسانگرد..... ۳۳
- جدول (۱-۳): فهرستی از علائم ۷۰
- جدول (۲-۳): روال کلی برای محاسبات حساس استفاده شده..... ۸۰
- جدول (۱-۴): نمایش مقادیر داده‌های باقی‌مانده مربوط به یک ایستگاه اندازه‌گیری..... ۱۱۵

فصل اول

کلیات

۱- ۱ تعریف مسأله

روش مگنتوتلوریک^۱ (MT) یک فن ژئوفیزیکی سطحی غیرفعال است که از میدان‌های سطحی غیرفعال الکترومغناطیسی طبیعی زمین برای بررسی ساختار مقاومت ویژه‌ی الکتریکی زیرسطحی استفاده می‌کند. عمق بررسی روش MT بسیار بیشتر از دیگر روش‌های الکترومغناطیسی است. این روش را می‌توان برای کاوش‌های زیرسطحی از اعماق ده‌ها متر تا اعماق ده‌ها کیلومتر به‌کاربرد برد. امروزه روش MT، به دلیل بهره‌مندی از بیشترین عمق تجسس در بین روش‌های ژئوفیزیکی الکترومغناطیسی و همچنین کم هزینه بودن مراحل جمع‌آوری داده نسبت به روش‌های لرزه‌نگاری، از اهمیتی روزافزون در امر پی‌جویی و اکتشاف منابع زیرزمینی برخوردار است.

از آن‌جا که در اکثر موارد زمین واقعی تحت مطالعه دارای پیچیدگی‌های ذاتی است لذا انجام مدل‌سازی‌های یک‌بعدی و یا حتی دوبعدی برای نیل به مقاصد اکتشافی کافی نبوده و نیاز به انجام مدل‌سازی سه‌بعدی به خوبی احساس می‌شود.

برای انجام مدل‌سازی از روش‌های گرادیان استفاده می‌شود. زیرا این روش‌ها مانند روش گرادیان مزدوج در هر تکرار نیاز به محاسبات کمتری دارد و نیازمند مشتقات دوم نمی‌باشند. این شرایط باعث می‌شوند که محاسبات به حافظه و زمان کمتری نیازمند باشند. استفاده اصلی از مجموعه روش‌های گرادیان این است که به عنوان یک روش تکراری روی یک سیستم خوش وضع اعمال می‌شوند. روش گرادیان مزدوج با روش‌های دیگر از این نظر تفاوت دارد که این روش برای مسائل غیرخطی پایه‌گذاری شده است. در واقع برای مینیمم کردن توابع غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

¹ MagnetoTelluric

۲-۱ سابقه تحقیق

از سال ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ روش MT به عنوان ابزار مقدماتی که می تواند تغییرات ضخامت را در حوزه های رسوبی بزرگ تعیین کند استفاده می شد. آنالیز داده ها به طور عمده محدود به مدل سازی پیشرو یک بعدی و معکوس سازی بود. اما این روش برای مناطقی با زمین شناسی پیچیده نمی توانست به کار برده شود. تلاش های اخیر در زمینه ی MT مشخص کرد که این روش می تواند به عنوان ابزاری برای مشخص کردن سنگ های رسوبی رسانی که در زیر صفحاتی با مقاومت ویژه ای بالا قرار گرفته اند مانند کربنات ها و ولکانیک ها به کار برده شود. به چند مورد از زمینه های مطالعاتی روش مذکور اشاره خواهد شد:

مطالعه ای در جنوب ترکیه انجام شد که در آن ساختارهای نزدیک سطحی باعث کیفیت پایین اطلاعات لرزه ای می شدند. در این مطالعه سنگ ذخیره ی هیدروکربن که یک سنگ آهک با مقاومت ویژه ای بالا بود از سنگ های رویی خود که مجموعه ای از سنگ های رسوبی آواری و افیولیت ها بودند تشخیص داده شد [Pince and watts, 1998]. یک مطالعه ی موردی در منطقه ی اپنینز^۱ در جنوب ایتالیا انجام و نشان داده شد که سنگ های رسوبی فرورانده شده با مقاومت ویژه ی پایین به خوبی با فواصل ایستگاهی ۲ تا ۳ کیلومتر در روش MT قابل شناسایی است [Dell Aversana, 2001]. همچنین روش MT برای اکتشافات نفتی در شرق اندونزی مورد استفاده قرار گرفت. مناطقی که ساختارها رورانده و پیچیده بودند با مدل سازی معکوس دوبعدی داده های MT مرز ساختارهای رورانده تعیین و نتیجه گیری شد که بهترین تباین مقاومت ویژه ۱۰۰۰ اهم متری تا ۱۰۰ اهم متر می باشد و داده مد الکتریکی عرضی^۲ بهترین نتیجه را می دهد [Hendra et al., 2004]. گروهی از محققین الگوریتم های مدل سازی پیشرو و وارون را با استفاده از روش های گرادیان مزدوج توسعه دادند. برای وارون سازی، گرادیان مزدوج در حل حداکثر معادلات وارون احتمالی استفاده شده

¹Apenines

²Transverse Electric Mode

است. در این روش به دلیل کاهش حجم محاسبات از طریق عدم نیازمندی به محاسبه ماتریس ژاکوبین، حافظه و زمان در انجام وارون سازی سه بعدی کاهش یافت. تصویر برداری توموگرافی سه بعدی داده های مقاومت ویژه با استفاده از آرایش قطبی-قطبی در طول یک آزمایش برای یک سیستم نظارت نشت در نزدیکی حوضچه های تبخیر در ایستگاه های تولید موهایی در لافلین صورت گرفت. در نتیجه به جای استفاده از تنها یک رویکرد وارونگی، برای به دست آوردن درک کامل از تکنیک های مختلف و مزایا و معایب روش های مختلف هر یک از روش ها را برای شکل سه بعدی تجزیه و تحلیل کردند [Mackie et al., 1995].

۱-۳ اهداف و ضرورت انجام تحقیق

روش لرزه نگاری بازتابی یا انعکاسی برای دهه های متوالی ابزار استاندارد برای اکتشافات نفت و گاز بوده است و تقریباً تمام مخازن نفت و گاز با استفاده از روش لرزه نگاری اکتشاف شده اند. در مورد هدف های اکتشافی دشوار که روش لرزه نگاری موفقیت کمی داشته محققان به فکر استفاده از دیگر روش های ژئوفیزیکی افتاده یکی از این روش های ژئوفیزیکی MT است. MT توانایی حل ساختارهای زمین شناسی را دارد که روش لرزه ای در آنها موفقیت کمی داشته است. مثلاً در مواردی که یک پوشش بازالتی یا ولکانیک با سرعت عبور موج بالا روی سنگ های زیرین را می پوشاند و یا در مورد ساختارهای راندگی که روش های لرزه نگاری نتیجه ی خوبی نمی دهد؛ می توان از روش MT استفاده کرد.

در دهه های اخیر روش MT به صورت گسترده تری در اکتشافات نفتی استفاده می شود و این امر به خاطر موارد زیر است:

- ۱) بهینه سازی روش های جمع آوری اطلاعات، پردازش و تفسیر آنها.
- ۲) در برخی موارد روش های اکتشافی لرزه ای و گرانش مغناطیسی با مشکلاتی مواجه می شوند و نتایج مبهمی را ارائه می دهند که در این گونه موارد استفاده از MT مفید و با ارزش است.

۳) اطلاعات MT می‌توانند تکمیل کننده‌ی اطلاعات حاصل از روش لرزه‌ای باشند.

۴-۱ روش انجام تحقیق

برای انجام مدل‌سازی وارون سه‌بعدی از سیستم مدولار ModEm استفاده خواهد شد. این سیستم مدولار توسط گاری اگبرت و آنا و مقبل^۱ تهیه شده است. پس از بررسی ساختار کد و رفع خطاهای آن و به‌دست آوردن سیستم مناسب، شرایط اجرا کردن برنامه فراهم شد. داده‌های امپدانس منطقه کسکدیا^۲ که شامل هشت دوره تناوب (۱۰۰ تا ۸۰۰۰ ثانیه) بودند به عنوان ورودی به کد وارد و پس از اجرای دوازده ساعته، خروجی‌ها در قالب داده‌های مقاومت ویژه و فاز به‌دست آمدند. در ادامه مقاطع لگاریتمی مقاومت ویژه و مقاطع فاز رسم شدند و در پایان مناطق مقاوم و رسانا مورد بررسی قرار گرفت.

۵-۱ ساختار پایان نامه

مقدمات و طرح مسأله در فصلی که گذشت (فصل ۱) بیان شد. در فصل دوم با عنوان مبانی نظری روش MT، تئوری روش و معادلات حاکم بر مسأله آورده می‌شود. در ادامه القای الکترومغناطیس در نیم فضای همگن و زمین یک، دو و سه‌بعدی بررسی می‌شود. مدل‌سازی پیشرو و وارون برای درک بهتر فرایند مدل‌سازی طرح خواهد شد. در ادامه‌ی فصل اثرات عوامل مختلف بر داده‌های مگنتوتلوریک شامل اثرات اعوجاج گالوانی، جابه‌جایی ایستا، اعوجاج القایی، سوق یافتگی جریان، توپوگرافی و ... عنوان خواهند شد و در پایان طراحی و اجرای پیمایش آورده شده است.

فصل سوم تحت عنوان برنامه مدل‌سازی ModEm سعی دارد که خواننده را با این سیستم مدل‌سازی بیشتر آشنا کند.

¹Gary Egbert and Anna and Meqbel

²Cascadia

در فصل چهارم نتایج وارون‌سازی داده‌های MT که توسط برنامه‌ی ModEm صورت گرفته است همراه با تفسیر آورده شده است. در نهایت، در فصل آخر نتیجه‌گیری و پیشنهادات حاصل از این تحقیق بیان شده است.

فصل دوم

مبانی نظری

روش مگنتو تلوریک

۲-۱ چشمه‌های روش MT

روش MT یک روش اکتشاف ژئوفیزیکی الکترومغناطیسی^۱ است که خواص الکتریکی زمین را در اعماق زیر سطحی (یا توزیع آن‌ها را) تصویر می‌کند. انرژی لازم برای روش MT از منبع طبیعی و منشأ خارجی تأمین می‌شود. هنگامی که این انرژی خارجی، به‌عنوان میدان الکترومغناطیسی اولیه شناخته شده، به سطح زمین می‌رسد، بخشی از آن منعکس می‌شود و بخش باقی‌مانده به زمین نفوذ می‌کند. زمین به‌عنوان یک رسانای خوب عمل می‌کند، در نتیجه جریان‌های الکتریکی (شناخته شده به‌عنوان جریان‌های تلوریک) به نوبه خود تولید یک میدان مغناطیسی^۲ ثانویه می‌کنند.

سیگنال‌های MT از دو منبع تولید می‌شوند:

الف) در فرکانس‌های پایین‌تر، به‌طور کلی کمتر از ۱ هرتز، منبع این سیگنال از تعامل باد خورشیدی با میدان مغناطیسی زمین سرچشمه می‌گیرد. به‌طوری‌که باد خورشیدی جریان‌هایی از یون‌ها ساطع می‌کند، که درون فضا حرکت و در میدان مغناطیسی محیط زمین اختلال ایجاد می‌کند و انرژی الکترومغناطیسی فرکانس پایین تولید و در زمین نفوذ می‌کند.

¹Electromagnetism

² Magnetic field



شکل (۲-۱): اعوجاج مگنتوسفر ناشی از تعاملات باد خورشیدی [Naidu, 2012]

ب) سیگنال فرکانس بالا، بیشتر از ۱ هرتز معمولاً در نزدیکی خط استوا و توسط فعالیت رعد و برق (طوفان تندر) در سراسر جهان ایجاد شده است. انرژی ایجاد شده توسط این طوفان‌ها دور زمین در یک راهنمای موج بین سطح زمین و یونوسفر حرکت می‌کند، با بخشی از انرژی که درون زمین نفوذ می‌کند. هر دو از این منابع، سیگنال امواج الکترومغناطیسی متغیر با زمان تولید می‌کند. اگر چه تغییرات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی کوچک هستند، آن‌ها قابل اندازه‌گیری هستند. این سیگنال در قدرت بیش از ساعت-ها، روزها، هفته‌ها و حتی بیش از چرخه لکه (که حدود ۱۱ سال است و یک افزایش در تعداد طوفان‌های خورشیدی ایجاد می‌کند) متفاوت است. ژئوفیزیک اندازه‌گیری MT برای اعماق بیشتر مجبور به اندازه‌گیری برای ساعت‌های طولانی در هر ایستگاه به‌منظور رسیدن به سیگنال خوب برای اطمینان از داده‌هایی با کیفیت بالا می‌باشد. به‌ویژه هنگامی که اندازه‌گیری برای فرکانس‌های پایین مورد نیاز است (حدود ۰,۰۰۱ هرتز) این صحیح است. در این فرکانس‌های کم، نیاز به جمع‌آوری به مدت ۱۶ دقیقه (۱۰۰۰ ثانیه) برای گرفتن یک نمونه داده می‌باشد! این بدان معناست که واقعا به ثبت برای چند ساعت فقط برای گرفتن چندین نمونه (۲۵-۵۰) برای متوسط آماری معنی دار از داده‌ها نیاز است [Naidu, 2012].

۲-۲ خواص الکتریکی سنگ‌ها

جریان الکتریکی القا شده در زمین به میدان الکترومغناطیسی و مقاومت ویژه الکتریکی سنگ‌ها مربوط است. مقاومت ویژه الکتریکی سنگ‌ها به چگالی حامل‌های بار موجود و هندسه مسیرهای جریان بستگی دارد. تخلخل^۱ بالا، مقادیر شوری بالای سیال‌ها، اشباع بالای سیال‌ها یا ذوب شدگی جزئی باعث ایجاد مقادیر بالای حامل‌های بار در سنگ‌ها و حضور مسیرهای ارتباطی مناسب میان حفرات باعث ایجاد چگالی بالای مسیرهای جریان الکتریکی می‌شود؛ بنابراین مقاومت ویژه الکتریکی سنگ‌ها ترکیبی از مؤلفه‌های بیان شده در بالاست [Telford et al., 1990].

قانون آرچی:^۲

$$\rho = a \rho_w \phi^{-m} S^{-n} \quad (۱-۲)$$

معادله (۱۴-۲) توصیف کننده یک راه تجربی جهت محاسبه مقاومت ویژه الکتریکی سازند سنگ (ρ) است.

در این معادله a و m ثابت‌های تجربی (وابسته به درجه استحکام^۳ سنگ‌ها)، ρ_w مقاومت ویژه الکتریکی

سیال سازند، Φ تخلخل و S اشباع سیال است. مقاومت ویژه الکتریکی سازند سنگ‌های رسوبی می‌تواند در

محدوده ۱ تا ۱۰۰۰ اهم متر (شکل ۲-۲) با تغییر در تراوایی^۴، تخلخل، درجه اشباع سیال سازند و میزان

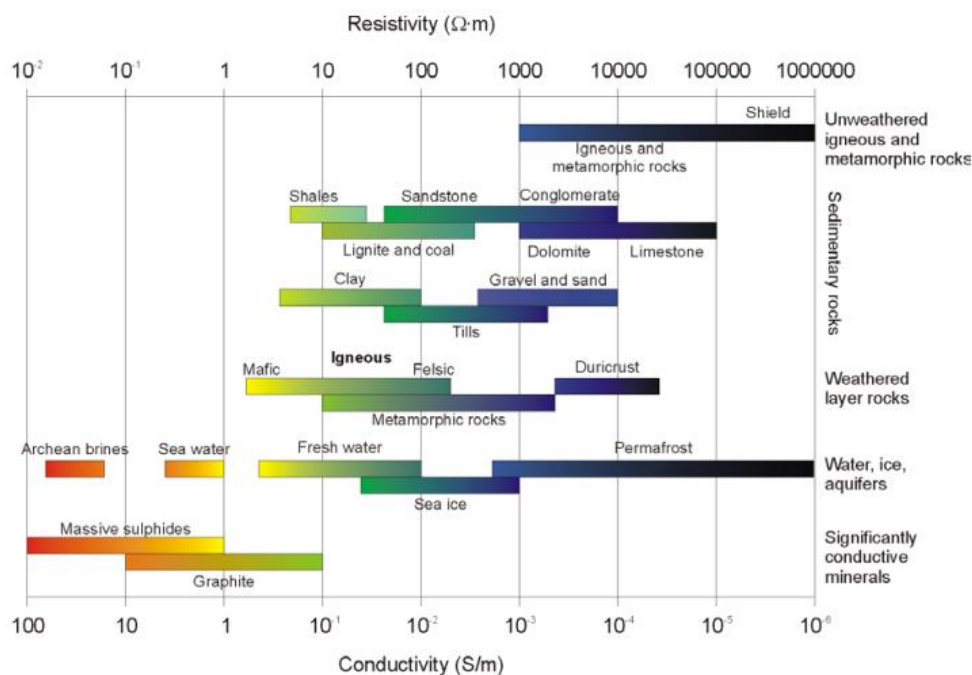
شوری تغییر کند.

^۱Porosity

^۲Archie Law

^۳Degree of Consolidation

^۴Permeability



شکل (۲-۲): رسانندگی الکتریکی سنگ‌های مختلف [palacky, 1987]

۳-۲ القای الکترومغناطیس^۱

هدف همه روش‌های الکترومغناطیس و الکتریک به نقشه درآوردن خاصیت‌های الکتریکی زیر سطحی از اندازه‌گیری‌های سطحی است. در تمایز با دیگر روش‌های الکترومغناطیسی، که در آن یک منبع فعال استفاده است روش MT با استفاده از انتشار و میرایی میدان‌های الکترومغناطیس طبیعی استفاده می‌شود. درک پردازش و روش تفسیر استفاده شده، ابتدا نیازمند یک دانش تئوری فیزیکی می‌باشد. به‌طور کلی، تئوری الکترومغناطیس روش‌های EM^۲ را شرح می‌دهد. این تئوری به قوانین ماکسول در شرح انتشار و اشاعه امواج الکترومغناطیس در فضای آزاد و همچنین در مواد بستگی دارد. در قسمت‌های زیر، مفهوم اساسی

^۱Electromagnetic induction

^۲Electromagnetic Method

روش MT و فرمول بندی اصلی مسائل القا از نقطه نظر فیزیکی برای پایان دادن با معادلات استفاده شده
 اخیر در حل مشکل مدل سازی مستقیم در دو و سه بعد بحث خواهد شد.

۲-۴ اساس معادلات القای الکترومغناطیس در زمین

انتشار و میرایی میدان های الکترومغناطیس (EM) به اختصار با قوانین ماکسول^۱ شرح داده شده است.
 این معادلات ارتباط بین زمان های مختلف میدان های مغناطیسی و الکتریکی را شرح می دهد. ابتدا دو
 معادله ی ماکسول در شکل دیفرانسیلی شان هستند:

$$\nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2-2) \text{ قانون فاراده }^2$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3-2) \text{ قانون آمپر }^3$$

در اینجا، E ($\frac{V}{m}$) میدان الکتریکی، B ($\frac{wb}{m^2}$) چگالی شار مغناطیسی، H ($\frac{A}{m}$) میدان مغناطیسی، D ($\frac{C}{m^2}$)
 جابه جایی جریان الکتریکی و J ($\frac{A}{m^2}$) چگالی جریان هستند.

معادله (۲-۲) قانون فاراده را که ناشی از میدان الکتریکی و برابر با نرخ زمان تغییر شار مغناطیسی است،
 نشان می دهد. در معادله (۳-۲) قانون آمپر مربوط به میدان مغناطیسی با چگالی جریان الکتریکی و جابه-
 جایی جریان الکتریکی می باشد.

می توان از معادلات ماکسول (۲-۲) و (۳-۲) با گرفتن دیورژانس و استفاده از بردار یکپه ($\nabla \cdot \nabla \times A = 0$)
 مشتق گرفت:

$$\nabla \cdot \nabla \times E = -\nabla \cdot \frac{\partial B}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot B) = 0 \rightarrow \nabla \cdot B = 0 \quad (4-2)$$

¹Maxwell's Law

²Faraday's law

³Amper's law

معادله (۴-۲) بیان می کند که تک قطبی مغناطیسی وجود ندارد (قانون گوس^۱ برای خاصیت مغناطیسی).

به طور مشابه، با گرفتن دیورژانس معادله (۳-۲) خواهیم داشت:

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{D}) + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad \rightarrow \quad \nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{D}) \quad (۵-۲)$$

با استفاده از معادله پیوستگی^۲ که بیان می کند دیورژانس چگالی جریان معادل با نرخ انباشتگی چگالی بار q است، معادله (۶-۲) به دست آمده است:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = -\frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \mathbf{D}) \quad (۶-۲)$$

بنابراین:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q \quad (۷-۲)$$

معادله (۷-۲) نشان می دهد که میدان الکتریکی نتیجه ی توزیع بار الکتریکی (قانون گوس برای الکتریسیته) است. معادلات (۲-۲)، (۳-۲)، (۴-۲) و (۷-۲) معادلات بنیادی الکترومغناطیس را نشان می دهند. برای مواد ایزوتروپ با رسانندگی الکتریکی σ ، نفوذپذیری مغناطیسی^۳ μ و ثابت دی الکتریک ϵ ، سه رابطه ی بیشتر نشان داده شده است:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (۸-۲)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (۹-۲)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (۱۰-۲)$$

^۱Gauss's law

^۲ Continuity equation

^۳Magnetic permeability

تغییرات گذردهی دی‌الکتریک ϵ و نفوذ پذیری مغناطیسی μ برای اغلب سنگ‌ها در مقایسه با تغییرات رسانایی الکتریکی σ خیلی کوچک هستند، بنابراین می‌توان $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ و $\epsilon = \epsilon_0 = \frac{F}{m} = 8.85 \times 10^{-12}$ را قرار داد. با استفاده از معادلات (۲-۸) و (۲-۹) و (۲-۱۰) می‌توان معادلات ماکسول را به صورت زیر نوشت:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2-11)$$

$$\nabla \times B = \mu_0 \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} + \mu_0 \sigma E \quad (2-12)$$

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2-13)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2-14)$$

برای استنتاج از القای الکترومغناطیس در زمین در زمان استفاده از روش MT مفروضاتی باید در نظر گرفته شود که در زیر آورده شده است:

- ۱- زمین انرژی الکترومغناطیسی تولید نمی‌کند بلکه فقط آن را جذب و یا پراکنده می‌کند.
- ۲- معادله حاکم بر امواج الکترومغناطیسی، معادلات ماکسول است.
- ۳- منبع میدان‌های الکترومغناطیسی طبیعی مورد استفاده که به وسیله سیستم جریان بزرگ مقیاس و نسبتاً دور از سطح زمین تولید می‌شود، می‌تواند به صورت یکنواخت باشد و فرض می‌کنیم که امواج الکترومغناطیسی به صورت موج تخت به زمین برخورد و در برخورد با سطح زمین تقریباً به صورت عمودی وارد زمین می‌شود.

برای امواج الکترومغناطیس صفحه‌ای، میدان مغناطیسی H و الکتریکی E با دامنه H_0 و E_0 در منشا و فرکانس زاویه‌ای ω^1 شکل ریاضی دارد:

$$E = E_0 e^{i\omega t} \quad (2-15 \text{ الف})$$

¹Angular frequency

$$H = H_0 e^{i\omega t} \quad (2-15b)$$

۴- زمین همچون یک رسانای اهمی رفتار و از معادله $J = \sigma E$ (J چگالی جریان، σ رسانندگی و E میدان الکتریکی) تبعیت می کند.

۵- میدان جابه جای الکتریکی در پریودهای سونداژ MT شبه ایستا است، بنابراین جریانات جابه جایی متغیر با زمان (ناشی از اثرات قطبش) در مقایسه با جریان های رسانایی متغیر با زمان قابل صرف نظر کردن و در نتیجه القاء الکترومغناطیسی در زمین صرفاً به صورت یک فرآیند پخش در نظر گرفته شده هستند. این معنی می دهد که معادله (2-12) به شکل زیر درمی آید:

$$\nabla \times B = \mu_0 \sigma E \quad (2-16)$$

۶- فرض می کنیم که هر تغییری در ثابت های دی الکتریک (ϵ) و نفوذپذیری مغناطیسی (μ) سنگ ها در مقایسه با تغییرات رسانایی (σ) سنگ ها قابل صرف نظر کردن است.

۷- در یک زمین لایه ای تجمع بار آزاد که به صورت پایدار باشد وجود ندارد؛ در یک زمین چند بعدی بار می تواند در طول ناپیوستگی ها انباشته و باعث ایجاد پدیده ای غیر القایی شود که آن را تحت عنوان جابه جایی ایستا^۱ می شناسیم.

$$\nabla \cdot J = \nabla \cdot (\sigma E) = \sigma \nabla \cdot E + (\nabla \sigma) \cdot E = 0 \quad (2-17)$$

همراه با معادله (2-13) می دهد:

$$q = - \epsilon_0 (\nabla \sigma) \cdot E / \sigma \quad (2-18)$$

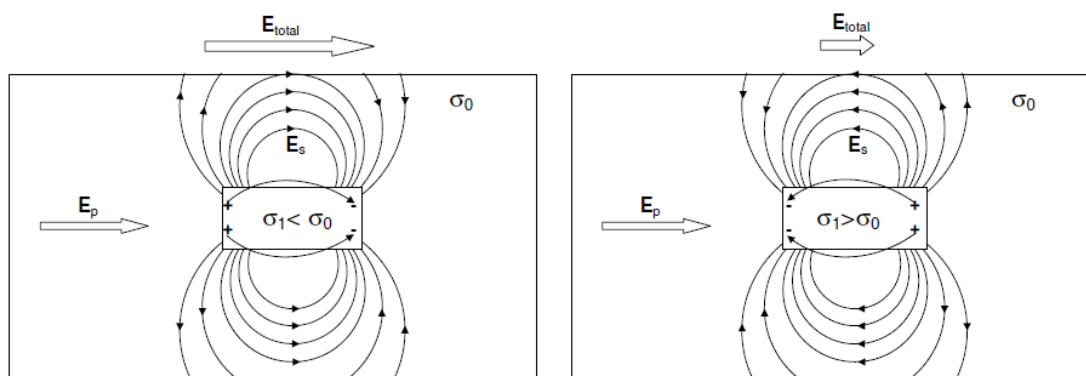
معادله (2-18) یک تباین رسانندگی بین دو رسانه ای مجاور با σ_0 و σ_1 را که باعث تجمع بار در رابط بین

آنها برای تضمین تداوم جریان (قانون پایداری جریان) می باشد را بیان می کند [Meqbel, 2009].

اثر گالوانیکی^۲ در شکل (2-3) تجسم شده است.

¹Static Shift

²Galvanic effect



شکل (۳-۲): اثر گالوانیک. تجمع بار مرزی سطح (a) یک جسم مقاومی جاسازی شده در پس زمینه رسانا (b) جسم رسانا جاسازی شده در پس زمینه مقاومی می‌باشد. در هر دو مورد، بارها میدان الکتریکی ثانویه‌ای E_s را فراهم می‌کنند. میدان‌های اولیه (E_p) و ثانویه (E_s) به‌طور مازاد میدان الکتریکی کلی (E_{total}) را در (a) تقویت می‌کند و در (b) کاهش می‌دهد [Jiracek, 1990].

معادلات (۱۱-۲) و (۱۳-۲) و (۱۶-۲) اساس معادلات القای الکترومغناطیس در یک منبع آزاد متوسط را نشان می‌دهند. میدان‌ها که آن‌ها را برآورد می‌کند وابسته به زمان هستند، اما آن‌ها به اندازه کافی آرام تغییر می‌کنند که توزیع فضایی رفتارشان مشابه یک میدان استاتیکی^۱ است. بنابراین، این میدان‌ها شبه استاتیک نامیده شده‌اند.

از بحث قبلی نتیجه می‌شود که برای میدان‌های شبه‌استاتیک معادله دیفرانسیلی E توجیه می‌شود با کرل معادله (۱۱-۲) و جایگزینی $\nabla \times B$ از معادله (۱۶-۲)، یعنی:

$$\nabla \times (\nabla \times E) = - \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times B) = - \mu \cdot \sigma \frac{\partial E}{\partial t} \quad (۱۹-۲)$$

معرفی بردار عملگر لاپلاس:

$$\nabla^2 = \nabla(\nabla \cdot) - \nabla \times (\nabla \times)$$

و جایگزین برای $\nabla \cdot E$ از معادله (۱۷-۲)، معادله (۱۹-۲) باید بازنویسی شود در جایگزینی به شکل:

$$\nabla^2 E = \mu \cdot \sigma \frac{\partial E}{\partial t} - \nabla[(\nabla \sigma) \cdot \frac{E}{\sigma}] \quad (۲۰-۲)$$

¹Static field

به طور مشابه، معادله دیفرانسیلی مربوطه B می تواند مشتق گرفته شود با گرفتن کرل معادله (۲-۱۶) و جایگزین کردن از معادله (۲-۱۱):

$$\nabla \times (\nabla \times B) = \mu \cdot \sigma (\nabla \times E) = -\mu \cdot \sigma \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2-21)$$

با استفاده از عملگر لاپلاسی بر دار و جایگزین برای $\nabla \cdot B$ از معادله (۲-۱۴) نتیجه می گیریم که:

$$\nabla^2 B = \mu \cdot \sigma \frac{\partial B}{\partial t} - [(\nabla \sigma) \times \frac{\nabla \times B}{\sigma}] \quad (2-22)$$

معادلات (۲-۲۰) و (۲-۲۲) در شرایط تغییر زمانی میدان های الکتریکی و مغناطیسی شکل معادله انتشار می گیرند. بنابراین، موج الکترومغناطیسی از طریق زمین منتشر می شود و به طور نمایی پراکنده می شود [Weaver, 1994].

با در نظر گرفتن فرض شماره ۱ و استفاده از یک موج صفحه ای با توجه به شرط وابستگی زمان هارمونیک ($e^{i\omega t}$) می توانیم مشتق E را با توجه به زمان در معادله (۲-۲۰) ارزیابی کنیم:

$$\nabla^2 E = i\omega \mu \cdot \sigma E - \nabla [(\nabla \sigma) \cdot \frac{E}{\sigma}] \quad (2-23)$$

به طور مشابه معادله (۲-۲۲) می دهد:

$$\nabla^2 B = i\omega \mu \cdot \sigma B - [(\nabla \sigma) \times \frac{\nabla \times B}{\sigma}] \quad (2-24)$$

داخل یک رسانای یکنواخت که $\nabla \sigma = 0$ ، معادلات (۲-۲۲) و (۲-۲۳) کاهش می یابند به:

$$\nabla^2 E = i\omega \mu \cdot \sigma E = k^2 E \quad (2-25)$$

$$\nabla^2 B = i\omega \mu \cdot \sigma B = k^2 B \quad (2-26)$$

که $K = \sqrt{i\omega \mu \cdot \sigma}$ عدد موج^۱ مختلط است. در مناطق غیر رسانا، به عنوان مثال لایه هوا، که $\sigma = 0$ ، می رسیم به :

$$\nabla^2 E = 0, \quad \nabla^2 B = 0$$

¹Wavenumber

حل ریشه دوم عدد موج مختلط:

$$\sqrt{\omega\mu.\sigma}\sqrt{ik} = \sqrt{(i\omega\mu.\sigma)} = \sqrt{\omega\mu.\sigma} \frac{1+i}{\sqrt{2}} = (+i1)\sqrt{\omega\mu.\sigma/2} \quad (27-2)$$

معادله (27-2) نشان می‌دهد که عدد موج با قسمت‌های موهومی و حقیقی برابر است [Keller, 1988].

قسمت حقیقی معادله (27-2) هست:

$$\text{Re}(k) = 1/p \quad (28-2)$$

که $P = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu.\sigma}}$ به عنوان عمق پوست^۱ شناخته شده است.

عمق پوست معمولاً به عنوان یک معیار برای نفوذ موج الکترومغناطیسی استفاده شده است. این توصیف

برای عمقی است که دامنه موج به $\frac{1}{e}$ مقدار اولیه‌اش (در سطح) کاهش پیدا می‌کند. برای مقاومت ویژه در

Ωm و دوره تناوب در s (ثانیه)، عمق پوست بر حسب متر به دست می‌آید:

$$P \approx 500 \sqrt{\rho T} \quad (29-2)$$

تانسور امپدانس^۲ MT (Z) ارتباط خطی بین مؤلفه‌های متعامد (راست گوشه قائم) میدان‌های الکتریک و

مغناطیس را شرح می‌دهد، از نسبت مؤلفه‌های میدان الکتریکی به مؤلفه‌های میدان مغناطیسی محاسبه

شده چنان‌چه:

$$Z(\omega) = \frac{E(\omega)}{B(\omega)} \quad (30-2)$$

با استفاده از تمام مؤلفه‌های افقی حساس برای هر دو میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی، امپدانس می‌تواند

در یک تانسور به شکل زیر نوشته شود:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix} \quad (31-2)$$

¹Skin depth

²Impedance tensor

تانسور امپدانس مختلط در معادله (۳۱-۲) می‌تواند به مقاومت ویژه ظاهری و فاز تبدیل شود:

$$\rho_a^{ij} = \left| \frac{E_i}{B_j} \right|^2 \quad 0.2 \text{ T} = 0.2 \text{ T} |Z_{ij}|^2 \quad (32-2)$$

$$\phi^{ij} = \arctan(\text{Im}(Z_{ij})/\text{Re}(Z_{ij})) \quad (33-2)$$

که $i, j = x, y$ و فرض که میدان الکتریکی در mv/km و میدان مغناطیسی در nT اندازه‌گیری شده است

[Weckmann et al., 2003].

ارتباط خطی دیگر میدان‌های الکترومغناطیس ارتباط بین مؤلفه‌های عمودی مغناطیسی B_z و مؤلفه‌های

افقی میدان مغناطیسی B_x و B_y است که نوشته می‌شود:

$$B_z = T_{zx} B_x + T_{zy} B_y \quad (34-2)$$

B_y

که T_{zy}, T_{zx} توابع انتقال مغناطیس عمودی را تشکیل می‌دهند. آن‌ها حد مؤلفه‌های مغناطیسی افقی را به

مؤلفه‌های عمودی تشریح می‌کنند. T_{zy}, T_{zx} تیپر^۱ نامیده شده‌اند.

یک مقدار مهم به‌دست آمده از توابع انتقال مغناطیس عمودی بردار القاست: با استفاده از قاعده

وایزکنوانسیون^۲ دامنه و زاویه بخش حقیقی بردار القا به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$\text{amplitude} = \sqrt{\text{Re}(T_{zx})^2 + \text{Re}(T_{zy})^2} \quad (35-2)$$

$$\left(\frac{\text{Re}(T_{zy})}{\text{Re}(T_{zx})} \right) \text{angle} = \arctan \quad (36-2)$$

¹ Tipper

² wise-convention

قسمت موهومی بر این اساس محاسبه شده است. در قاعده وایز کنوانسیون بردارهای القای حقیقی تمایل به نقطه دور از رساناهای طویل دارند. بردارهای القا معمولا در شناسایی تباین جانبی رسانندگی در زیر سطح زمین استفاده شده است [Vozoff, 1972].

۲-۵ القای الکترومغناطیسی در یک نیم فضای همگن

معادلات (۲-۱۱) و (۲-۱۲) و (۲-۱۳) و (۲-۱۴) می تواند برای تولید عبارتی جهت استنتاج اطلاعات در مورد زیرسطح بازآرایی شوند. کرل معادله (۲-۱۲) عبارت زیر را تولید می کند:

(۲-۳۷)

$$\nabla \times (\nabla \times B) = \nabla \cdot (\nabla \cdot B) - \nabla^2 B = \nabla \times \left(\mu \sigma E + \mu \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) = -\mu \sigma \frac{\partial B}{\partial t} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 B}{\partial t^2}$$

چون که $\nabla \cdot B = 0$ ، معادله (۲-۳۷) به معادله ی تلگرافر ساده سازی می شود که خصوصیات موج ساطع کننده را در یک ماده ی پراتلاف ($\sigma > 0$) توصیف می کند:

$$\nabla^2 B = \mu \left(\sigma \frac{\partial B}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} \right) \quad (۲-۳۸)$$

با فرض وابستگی زمانی $e^{i\omega t}$ برای B ($\omega = 2\pi f$) با فرکانس زاویه ای در هرتز و عدد موهومی ($i = \sqrt{-1}$)، معادله (۲-۳۸) معادله ی هلمهولتز^۱ را در حوزه ی فرکانسی تولید می کند:

$$(\nabla^2 - \gamma^2) B = 0 \quad (۲-۳۹)$$

که γ عدد موج موهومی را مشخص می کند.

^۱ Helmholtz equation

$$= i\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon = K^2 - k^2 \quad (40-2)$$

$$\gamma^2$$

موج بدون افت، که با سرعت $c = \frac{1}{\sqrt{\mu}}$ عبور می‌کند با k که طول موج آن $\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{c}{f}$ است،
توصیف می‌شود. در یک ماده‌ی همگن مثل زمین، فرکانس‌های پایین استفاده شده در MT باعث می‌شود
که ثابت انتشار k (در واحد m^{-1}) چون که $\sigma \gg \varepsilon\omega$ نقش مهم‌تری را بازی کند. این مفهوم به عنوان
فرض شبه استاتیک شناخته می‌شود و منجر به معادله‌ی پخش برای میدان B می‌شود:

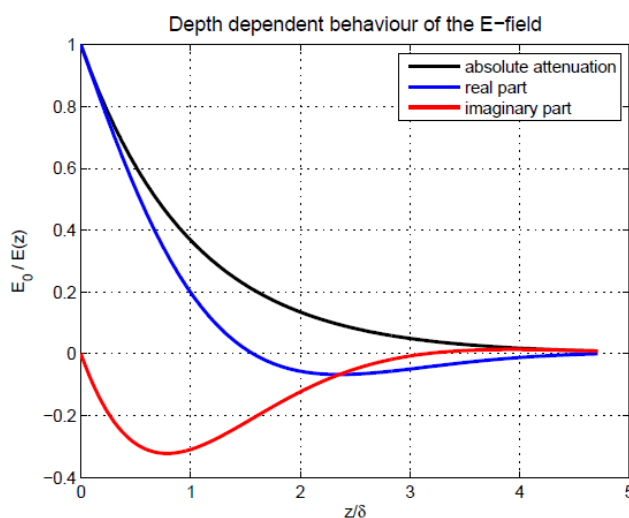
$$(\nabla^2 - k^2)B = 0 \quad (41-2)$$

با دنبال کردن روش استفاده شده در بالا، معادله‌ی پخش برای میدان E می‌تواند در حالت مشابه استنتاج
شود:

$$(\nabla^2 - k^2)E = 0 \quad (42-2)$$

معادلات (41-2) و (42-2) برای فهم روش MT و مقایسه با دیگر تکنیک‌های ژئوفیزیکی بنیادی هستند.
رفتار پخشی امواج الکترومغناطیس در محدوده فرکانسی MT این روش را بین تکنیک‌های اکتشافی
ژئوفیزیکی حاصل شده از معادله‌ی موج (رادار نفوذ کننده در زمین¹، لرزه) و روش‌های پتانسیلی (جاذبه،
مغناطیس، مقاومت DC) جای می‌دهد. برای یک سیستم مختصات جغرافیایی $\{x, y, z\}$ با x, y و z به
ترتیب رو به شمال، شرق و عمود رو به پایین، معادلات (41-2) و (42-2) تنها وابسته به رسانندگی σ و
فرکانس زاویه‌ای ω نیستند آن‌ها همچنین وابسته به عمق هستند $B = B(z)$. این وابستگی میدان‌ها به عمق
در شکل (4-2) نشان داده شده است.

¹Ground Penetrating Radar



شکل (۲-۴): رفتار میدان الکتریکی وابسته به عمق [Vozoff, 1972].

تعدیل عبارت $e^{-ikz} = e^{-iuz}e^{-uz}$ مختلط است (معادله (۲-۴۴-ب)) و قسمت‌های حقیقی و موهومی فروپاشی دامنه‌های مختلف را نشان می‌دهد. برای مقدار مطلق، تضعیف میدان الکتریکی به e^{-1} قدرت مقدار سطحی در عمق پوست δ است.

بنابراین معادلات پخش راه حل زیر را دارند:

$$B = B_0 e^{-ikz} + B_1 e^{ikz} \quad (۲-۴۳-الف)$$

$$E = E_0 e^{-ikz} + E_1 e^{ikz} \quad (۲-۴۳-ب)$$

B_0, B_1, E_0, E_1 میدان‌های الکترومغناطیسی در سطح زمین هستند. وقتی که $z \rightarrow \infty$ میدان B و E باید ناپدید شوند و بنابراین $B_1 = E_1 = 0$. بنابراین حل معادله (۲-۴۳) به صورت زیر ساده می‌شود:

$$B = B_0 e^{-ikz} = B_0 e^{-iuz} e^{-uz} \quad (۲-۴۴-الف)$$

$$E = E_0 e^{-ikz} = (۲-۴۴-ب)$$

$$E_0 e^{-iuz} e^{-uz}$$

با در نظر گرفتن $k^2 = i\omega\mu\sigma$

$$k = \sqrt{i}\sqrt{\omega\mu\sigma} = \sqrt{\omega\mu\sigma}e^{-i\frac{\pi}{4}} = (1+i)\sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} = (1+i)u \quad (45-2)$$

معادله‌ی (۴۴-۲) برهم‌نهی دو خصوصیت میدان را نشان می‌دهد. میدان‌ها با عمق به صورت سینوسی با عبارت e^{-ivz} تغییر می‌کنند اما تضعیف وابسته به عمق به صورت عبارت e^{-vz} را نشان می‌دهد. معکوس قسمت حقیقی k به عنوان عمق پوسته یا عمق نفوذ δ شناخته می‌شود.

$$\delta = \frac{1}{Rk} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (46-2)$$

چون که تراوایی مغناطیسی μ به صورت اساسی در زمین تغییر نمی‌کند، معادله‌ی (۴۶-۲) به عنوان فرمولی برای عمق پوست به متر تخمین زده می‌شود:

$$\delta(T) \approx 500 \sqrt{T \rho_a} \quad (47-2)$$

که $\rho_a = 1/\sigma_a$ مقاومت ظاهری یا مقاومت میانگین معادل نیم‌فضای یکنواخت (در واحد اهم متر) هست و $T = \frac{2\pi}{\omega}$ دوره در واحد ثانیه است. میدان‌های الکترومغناطیس تا مقدار $\frac{1}{e}$ دامنه‌ی سطحشان در یک عمق $\delta(T)$ کاهش می‌یابند (شکل ۴-۲). این ارتباط به عنوان معادله‌ی (۴۷-۲) حیاتی می‌باشند و بیان می‌کنند عمق پوست تنها ناشی از رسانندگی حجمی ماده‌ی رویی و محدوده دوره‌ی استفاده شده است.

۶-۲ مقاومت ظاهری و فاز

با بسط دادن عملگر کرل در نوشتن کامل، معادله‌ی (۱۶-۲) ارتباط پیشرو را بین مؤلفه‌های میدان‌های E و B نشان می‌دهد.

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = -i\omega B_x, \quad (48-2 \text{ الف})$$

$$\frac{\partial E_x}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial x} = -i\omega B_y, \quad (۲-۴۸-ب)$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = -i\omega B_z, \quad (۲-۴۸-ج)$$

چون که میدان B به صورت عمودی رو به پایین در جهت Z منتشر می شود، میدان الکتریکی القا شده یک مؤلفه ی Z ندارد ($E_z = 0$). فرض موج تخت بیان می کند که میدان مغناطیسی القایی مؤلفه های افقی دارد که ناشی از فاصله ی زیاد تا چشمه است و بنابراین برای دوره های بیشتر از 10^5 ثانیه معتبر است. همچنین این فرض بیان می کند که مؤلفه ی B_z برابر صفر است. بنابراین $\frac{\partial E_x}{\partial y}$ و $\frac{\partial E_y}{\partial x}$ باید صفر باشند. مشتق زمانی برای مثال مؤلفه ی B_x در سطح زمین برابر با مشتق مکانی مؤلفه ی E_y نسبت به محور Z است. معادله ی (۲-۴۴-ب) حل مشتق فضایی E_y است.

$$-\frac{\partial E_y}{\partial z} = kE_{y0}e^{-kz} = -i\omega B_x = -i\omega B_{x0}e^{-kz} \quad (۲-۴۹)$$

امپدانس MT نسبت میدان های الکتریکی و مغناطیسی اندازه گیری شده در سطح است:

$$Z(\omega) = \frac{E_{y0}}{B_{x0}} = -\frac{i\omega}{k} = -\frac{i\omega}{\sqrt{i\omega\mu\sigma}} = -\sqrt{\frac{\omega}{\mu\sigma}}\sqrt{i} \quad (۲-۵۰)$$

نسبت مؤلفه های متعامد میدان ها امپدانس مشابهی با علامت مخالف تولید می کند. دوباره مرتب کردن معادله ی (۲-۵۰) مقاومت نیم فضا را در واحد اهم متر می دهد.

$$\rho = \frac{\mu}{\omega} |Z|^2 \quad (۲-۵۱)$$

در حوزه ی فرکانس، $Z(\omega)$ موهومی است و فاز همراه $\emptyset$ دارد:

$$\emptyset = \arg Z = \arg \sqrt{\frac{\omega}{\mu\sigma}}\sqrt{i} = \arg \sqrt{\frac{\omega}{\mu\sigma}}e^{i\frac{\pi}{4}} = \frac{\pi}{4} = 45^0 \quad (۲-۵۲)$$

بنابراین بدون توجه به مقاومت زیر نیم‌فضا، فاز در ۴۵ درجه ثابت است. تابع تبدیل شوماخر به‌طور مستقیم مرتبط با عکس ثابت انتشار k است.

$$C := \frac{1}{k} = \frac{Z}{i\omega} \quad (۵۳-۲)$$

۲-۷ نیم‌فضای ناهمسانگرد

در یک ماده‌ی ناهمسانگرد، رسانندگی σ با یک تانسور سه‌بعدی مرتبه دوم نمایش داده، قانون اهم به شکل سه‌بعدی می‌تواند بیان شود [Heinson et al., 2006]:

$$\begin{pmatrix} j_x \\ j_y \\ j_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad (۵۴-۲)$$

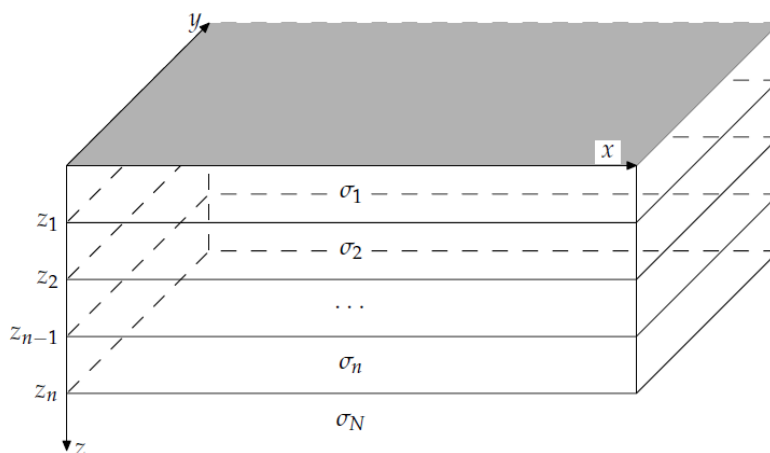
که σ متقارن ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$) و با مقادیر نامنفی است. با این خصوصیات، تانسور می‌تواند قطری شود و با سه رسانندگی اصلی $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ و سه زاویه‌ی چرخش $\{x', y', z'\}$ که مبدا محورهای اصلی تانسور را به چهارچوب مرجع $\{x, y, z\}$ مرتبط می‌کند. در ادامه با علامت‌گذاری، زوایای چرخش به عنوان زوایای اوایلر $\alpha_L, \alpha_D, \alpha_S$ ارجاع دهی می‌شوند.

(۵۵-۲)

$$\begin{aligned} \sigma &= \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \\ &= R_z(-\alpha_S) R_x(-\alpha_D) R_z(-\alpha_L) \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} R_z(\alpha_L) R_x(\alpha_D) R_z(\alpha_S) \end{aligned}$$

¹ Euler angles

که R_x و R_z ماتریس‌های چرخش ابتدایی حول محورهای هستند که آن محورها با زیروند مشخص می‌شود. زوایای اوپلر α_L , α_D , α_S زوایای استرایک، شیب و انحراف ناهمسانگردی هستند [Newman and Hoversten., 2000].



شکل (۵-۲): مدل شماتیک مدل مقاومت یکبعدی با σ متغیر در جهت z [Vozoff, 1972].

۸-۲ القای الکترومغناطیسی در زمین یکبعدی

برای ملاحظات پیشرو یک زمین افقی لایه‌بندی شده را فرض می‌کنیم که رسانندگی σ تنها با عمق در طول محور z تغییر می‌کند (شکل ۵-۲). هر لایه شامل مؤلفه‌های فرورونده و بالارونده انرژی است برای مثال مؤلفه‌ی x میدان E در لایه‌ی n ام به صورت زیر بیان می‌شود:

$$E_{x_n} = a_n(k_n, \omega)e^{-zk_n} + b_n(k_n, \omega)e^{+zk_n} \quad (۵۶-۲)$$

میدان مغناطیسی در جهت y متعامد معادل است با:

$$B_{y_n} = \frac{k_n}{i\omega} E_{x_n} \quad (۵۷-۲)$$

بنابراین، تابع تبدیل C برای لایه‌ی n ام به صورت زیر است:

$$C_n(z) = \frac{Ex_n(z)}{i\omega B_{yn}(z)} \quad (58-2)$$

وایت (۱۹۵۴) متذکر شد که تابع تبدیل به صورت آنالیزی برای هر لایه می تواند تعیین شود. با شروع از پایین ترین لایه N که مساوی با یک نیم فضای همگن است؛ فرمول بازگشتی وایت هر لایه ی مربوطه را در بالای لایه ی n ام محاسبه می کند:

$$C_n(z_{n-1}) = \frac{1}{k_n} \frac{k_n C_{n+1}(z_n) + \tanh[k_n(z_n - z_{n-1})]}{1 + k_n C_{n+1}(z_n) \tanh[k_n(z_n - z_{n-1})]} \quad (59-2)$$

مقاومت ظاهری ρ_a از ماده ی لایه بندی شده به وسیله ی تابع تبدیل موهومی C می تواند بیان شود (در مقایسه با معادله ی (۵۱-۲)):

$$\rho_a(\omega) = |C(\omega)|^2 \mu_0 \omega \quad (60-2)$$

بنابراین، فاز $\emptyset$ به عنوان تانژانت معکوس نسبت موهومی به حقیقی C داده می شود:

$$\emptyset = \tan^{-1}\left(\frac{IC}{RC}\right) \quad (61-2)$$

هر دوی مقاومت ظاهری و فاز بر اثر علیت با یک ارتباط پراکندگی جفت می شوند، همچنین به عنوان رابطه ی کرامر_کرونیگ شناخته می شوند [Prasanta et al., 2008].

$$\emptyset(\omega) = \frac{\pi}{4} - \frac{\omega}{\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\omega'^2 - \omega^2} \log \frac{\rho_a(\omega')}{\rho_0} d\omega' \quad (62-2)$$

بنابراین، فاز نیم فضای همگن یا زمین لایه بندی شده همیشه می تواند از مقاومت ظاهری به جز برای یک فاکتور مقیاس ρ_0 محاسبه شود. فاکتور مقیاس نقش مهمی را در توزیعات رسانندگی چند بعدی ایفا می کند که منجر می شود مقاومت ظاهری به صورت قراردادی شیفت بخورد. معادله ی (۶۲-۲) نشان می دهد که فاز برای یک فرکانس ω وابسته به مقاومت ظاهری برای تمام فرکانس های ω' است، که با تاثیر بزرگترین

$\rho_a(\omega')$ برای $\omega' = \omega$ ناشی از جمله‌ی مقیاسی $\frac{1}{\omega'^2 - \omega^2}$ است. بنابراین، فاز رفتار مقاومت ویژه ظاهری با دوره را پیش‌بینی می‌کند؛ اما آن موقعیت دقیقش را نمی‌تواند تعیین کند. در موقعیت‌های چندبعدی، روابط پراکندگی باید با توجه به بعدیت زیرسطح تنظیم شود.

در یک مدل دو لایه، اگر لایه‌ی بالایی رسانندگی کمتری نسبت به لایه پایینی داشته باشد (معادل با $\sigma_1 < \sigma_2$ در شکل ۲-۵) فاز بالای ۴۵ درجه خواهد بود. به‌طور مشابه، فاز برای $\sigma_1 > \sigma_2$ زیر ۴۵ درجه خواهد بود. برای یک زمین n لایه، منحنی مقاومت ظاهری یک رفتار مجانبی به سمت کم عمق‌ترین و عمیق‌ترین لایه در هر دوطرف محدوده دوره دارد. رزولوشن لایه‌های میانی، شدیداً به ضخامت و مقاومتشان وابسته است و لزوماً نمی‌تواند تعیین شود. بنابراین لایه‌های رسانا، بسیار آسان‌تر نسبت به لایه‌های مقاوم‌تر حس

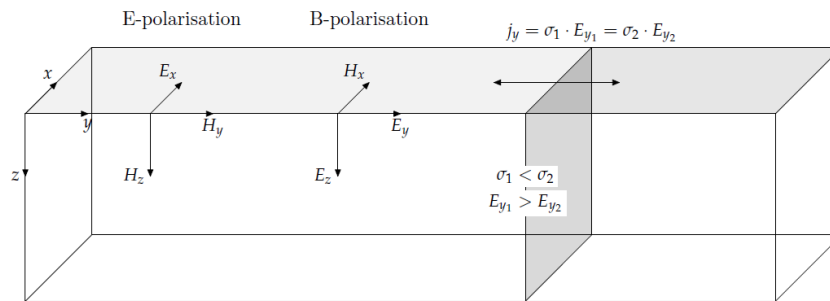
می‌شوند. اگر ρ_1 و ρ_2 ($\rho_2 > \rho_1$) مقاومت لایه‌ها باشد، رزولوشن لایه‌ی مقاوم $\sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}}$ زمان‌های لایه‌ی رساناست [Orange, 1989].

۲-۹ القای الکترومغناطیسی در زمین دوبعدی

شکل (۲-۶) یک مدل دوبعدی ساده شده با یک استرایک^۱ مرز مقاومت عمودی در جهت x را نشان می‌دهد. مرز مقاومت ممکن است یک گسل زمین‌شناسی یا دایک را نمایش دهد. جریان‌های الکتریکی در دو جهت تداخل باید با دنبال کردن معادله‌ی پیوستگی‌ای که مؤلفه‌های چگالی جریان در دو طرف پیوسته باشند؛ حفظ شوند. قانون اهم (معادله ۲-۱۰) می‌تواند برای ارتباط چگالی جریان به میدان الکتریکی استفاده شود. برای مؤلفه‌ی y:

¹Strike

$$j_{y_1} = \sigma_1 \cdot E_{y_1} = \sigma_2 \cdot E_{y_2} = j_{y_2} = \text{const} \quad (۶۳-۲)$$



شکل (۶-۲): مدل مقاومت دوبعدی با یک تماس جانبی استرایک در جهت X. مرز مقاوم دو ناحیه‌ی با رسانندگی متفاوت $\sigma_1 \neq \sigma_2$ را جدا می‌کند. میدان E در طول تماس عمودی به خاطر حفظ شدن جریان ناپیوسته است. مدهای قطبش E و B در خارج دو بعدیتی افزایش می‌یابند [Vozoff, 1972].

ناپیوستگی در مقاومت‌ها، پرسی را در میدان الکتریکی عمود بر مرز باعث می‌شود (مؤلفه‌ی E_y در شکل ۲-۶). مؤلفه‌های مماسی میدان E در هر دو جهت x و z پیوسته هستند: $E_{t_1} = E_{t_2}$. با فرض تراوایی مغناطیسی همگن، همچنین مؤلفه‌های نرمال و تماسی میدان مغناطیسی B پیوسته هستند. فرض دوبعدی نیاز دارد که طول استرایک به‌طور قابل توجهی طولانی‌تر از عمق پوسته باشد (معادله ۲-۴۶) و تمام تغییرات میدان‌های موازی با استرایک صفر هستند ($\frac{\partial}{\partial x} = 0$).

بنابراین، میدان‌های EM عمود هستند و می‌توانند به مؤلفه‌ی میدان E و میدان B موازی با استرایک تجزیه شوند. دو مد به ترتیب به‌عنوان قطبش E (مد الکتریک عرضی^۱) و قطبش B (مد مغناطیس عرضی^۲) ارجاع داده می‌شوند. قطب E از طریق ارتباط پیشرو می‌تواند توصیف شود:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_x}{\partial y} &= \frac{\partial B_z}{\partial t} = i\omega B_z \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} &= \frac{\partial B_y}{\partial t} = i\omega B_y, E \end{aligned} \quad (۶۴-۲)$$

¹Transverse electrical mode

²Transverse magnetic mode

$$\frac{\partial E_x}{\partial y} = \frac{\partial B_z}{\partial t} = i\omega B_z,$$

هیچ رفتار ناپیوسته‌ای برای قطبش E به‌عنوان مؤلفه‌ی E_y در این مد وجود ندارد. جریان‌ها عمود بر استرایک در مورد قطبش B شار می‌یابند.

$$\frac{\partial B_x}{\partial y} = \mu_0 \sigma E_z,$$

$$B - \frac{\partial B_x}{\partial z} = \quad (۶۵-۲)$$

$$\mu_0 \sigma E_y,$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega B_x$$

در مرز زمین-فضا، $E_z=0$. با توجه به بحث بالا، واضح است که ناپیوستگی در میدان الکتریکی برای قطبش B در طول مرز σ_2/σ_1 است. مقاومت ظاهری ρ_a یک انحراف $\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}\right)^2$ را داراست (معادله ۶۰-۲). بنابراین قطبش B به رزولوشن تیزتری از مرز مقاومت جانبی می‌رسد که ناشی از پرش در مقاومت ظاهری است. گرچه، مقاومت‌های نزدیک مرز برای ناحیه‌ای با مقاومت کم بسیار پایین و برای ناحیه‌ای با مقاومت بالا بسیار بالا تخمین زده می‌شوند. با در نظر گرفتن تخمین‌های مقاومت ظاهری، قطبش E پایدارتر است.

در طول جمع‌آوری داده صحرائی MT، مختصات اندازه‌گیری به ندرت با استرایک یک ساختار دوبعدی همزمان است. بنابراین، تانسور امپدانس MT، Z' شامل مؤلفه‌های غیرصفر است، مگر این که با یک زاویه‌ی α چرخانده شود، که آن را در یک چهارچوب مختصات موازی و عمود با استرایک مرز مقاومت بچرخاند.

$$\hat{Z} = \begin{pmatrix} \hat{Z}_{xx} & \hat{Z}_{xy} \\ \hat{Z}_{yx} & \hat{Z}_{yy} \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{pmatrix} R^T = RZ_{2D}R^T \quad (۶۶-۲)$$

با

$$R = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (۶۷-۲)$$

در معادله‌ی (۶۴-۲) نسبت مؤلفه‌های میدان مغناطیسی عمودی به افقی مرز مقاومت جانبی را نمایش می‌دهد. تابع انتقال τ سونداژ عمق ژئومغناطیسی^۱ یک بردار موهومی است که ارتباط بین دامنه و فاز میدان القا کننده‌ی افقی و میدان القا شده‌ی آنومالی عمودی برای فرکانس داده شده‌ی ω را نشان می‌دهد. ارتباط با $\tau = (\tau_{zx}, \tau_{zy})$ به‌طور کلی به‌صورت زیر است.

$$B_z = T_{zx}B_x + T_{zy}B_y \quad (۶۸-۲)$$

برای زمین مقاوم که به‌صورت جانبی یکنواخت است (برای مثال، بالای یک حوزه‌ی رسوبی) و با یک میدان چشمه‌ی افقی، هیچ میدان مغناطیسی B_z عمودی القا شده آنومالی دار وجود ندارد و بنابراین توابع تبدیل صفر هستند. در مقابل، نزدیک مرز بین ساختارهای با مقاومت پایین و بالا (برای مثال، مرز بین آب دریا و خشکی)، یک میدان B_z بزرگ وجود دارد و توابع تبدیل با بزرگی یک یا دو می‌توانند باشند.

پیکان‌های القایی پارکینسون، یک نمایش گرافیکی از مؤلفه‌های τ_{zx} و τ_{zy} تابع تبدیل GDS هستند [Parkinson, 1962].

پیکان‌های پارکینسون یک قسمت حقیقی (در فاز) و یک قسمت یک چهارم (خارج از فاز) دارند. طول پیکان‌های حقیقی (M_r) و یک چهارم (M_q) به‌صورت زیر داده می‌شوند:

$$M_r = (\Re T_{zx}^2 + \Re T_{zy}^2)^{1/2} \quad (۶۹-۲a)$$

$$M_q = (\Im T_{zx}^2 + \Im T_{zy}^2)^{1/2} \quad (۶۹-۲b)$$

^۱Geomagnetic Depth Sounding (GDS)

جدول (۱-۲): ورودی‌های تانسور امپدانس Z در برابر توزیع رسانندگی همسانگرد و بعدیت. ورودی‌ها به طور فزاینده‌ای برای بعدیت پیچیده‌تر مستقل هستند. $Z_{\parallel}$ و $Z_{\perp}$ به ترتیب معرف امپدانس موازی با E و امپدانس عمود بر E هستند [Vozof f, 1972].

	Dimensionality		
	1-D	2-D	3-D
tensor components	$Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ $Z_{xy} = -Z_{yx}$	$Z_{xx} = -Z_{yy}$ $Z_{xy} \neq -Z_{yx}$	$Z_{xx} \neq -Z_{yy} \neq Z_{xy} \neq Z_{yx}$
impedance tensor Z	$\begin{pmatrix} 0 & Z_n \\ -Z_n & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 & Z_{\parallel} \\ Z_{\perp} & 0 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix}$

جهت‌گیری پیکان‌ها به‌طور مشابه به‌صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{\Re T_{zy}}{\Re T_{zx}} \right) \quad (۷۰-۲) \text{ الف}$$

$$\theta_q = \tan^{-1} \left(\frac{\Im T_{zy}}{\Im T_{zx}} \right) \quad (۷۰-۲) \text{ ب}$$

در معادلات (۷۰-۲)، زوایای θ_r و θ_q مثبت در جهت ساعت‌گرد از جهت x هستند (معمولا شمال ژئومغناطیسی). وقتی که بر روی نقشه تصویر می‌شود، پیکان‌های پارکینسون باید به سمت مناطق با رسانندگی بالا اشاره کند و از بلوک‌های مقاوم دور باشد. وابسته به علامت مرسوم برای $e^{\pm i\omega t}$ در تبدیل فوریه‌ی سریع^۱، ۱۸۰° درجه احتمالا باید به θ_q اضافه شود تا به‌طور موثری پیکان‌های یک چهارم برعکس شوند.

^۱Fast Fourier transform

در هر موردی، ۱۸۰ درجه باید به θ_p اضافه شود. پیکان‌های القایی تنها با قطبش E در یک زمین دوبعدی همراه می‌شوند. قطبش B شامل هیچ مؤلفه‌ای میدان مغناطیسی عمودی نمی‌شود اما شامل یک میدان الکتریکی عمودی در زمین می‌شود [Siripunvaraporn and Egbert, 2007].

۲-۱۰ القای الکترومغناطیسی در زمین سه‌بعدی

در یک محیط سه‌بعدی تمام مؤلفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی به همدیگر متصل می‌شوند. تانسور امپدانس یا تابع تبدیل MT، Z مؤلفه‌های افقی مربوطه را متصل می‌کند.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \end{pmatrix} \quad (۷۱-۲)$$

در پیمایش‌های MT، میدان مغناطیسی در هر سه جهت و اغلب میدان الکتریکی در دو جهت افقی x و y اندازه‌گیری می‌شوند. بنابراین، تانسور امپدانس کامل می‌تواند محاسبه شود. Z موهومی است و می‌تواند به دو قسمت حقیقی و یک چهارم جدا شود:

$$\begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{xx} & X_{xy} \\ X_{yx} & X_{yy} \end{pmatrix} + i \begin{pmatrix} Y_{xx} & Y_{xy} \\ Y_{yx} & Y_{yy} \end{pmatrix} \quad (۷۲-۲)$$

Z بزرگی و فاز دارد.

$$\rho_{aij}(\omega) = \frac{1}{\mu_0 \omega} |Z_{ij}(\omega)|^2 \quad (۷۳-۲)$$

$$\phi_{ij} = \tan^{-1} \left(\frac{\Im Z_{ij}}{\Re Z_{ij}} \right) \quad (۷۴-۲)$$

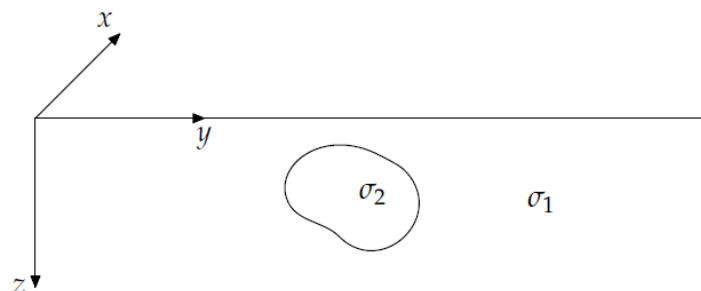
به‌منظور جلوگیری از اشتباه با معادله‌ی (۲-۶۰)، باید توجه شود که تابع تبدیل شوماخر ویدلت C، برای یک زمین یک‌بعدی معادل با مقدار مطلق مؤلفه‌های غیرقطری تانسور امپدانس مقیاس شده با مقادیر خصوصیت زمین است.

$$|Z_{yx_{1D}}| = |Z_{xy_{1D}}| = i\omega\mu_0 C \quad (۷۵-۲)$$

تنها در مواردی که توزیع رسانندگی درجه‌ی بالایی از تقارن دارد، فازهای مؤلفه به‌طور ساده با تفاوت فاز بین مؤلفه‌های قطبی شده‌ی خطی میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی افقی مرتبط است.

در موارد دیگر که پاسخ‌های منطقه‌ای منحرف می‌شوند، دامنه و فاز مؤلفه‌های تانسور امپدانس محلی در بین مؤلفه‌های تانسور امپدانس مشاهده شده مخلوط می‌شوند.

تانسور امپدانس Z اطلاعات ضروری را در مورد بعدیت زیرسطح (جدول ۲-۱) می‌دهد. اگر تمام چهار مؤلفه مستقل از یکدیگر باشند؛ زیرسطح به احتمال زیاد سه‌بعدی است، مگر این که تانسور امپدانس به-گونه‌ای بچرخد که $Z_{xx} = -Z_{yy}$. یک سناریوی زمین‌شناسی داده شده در شکل (۷-۲)، معمولاً یک تانسور امپدانس سه‌بعدی تولید می‌کند. گرچه، برای دوره‌های طولانی و عمق پوسته‌ی بزرگ، بدنه به‌عنوان یک ناهمگنی نزدیک سطحی محلی عمل خواهد کرد، که یک پاسخ غیرالقایی (گالوانیک) می‌دهد. این یک انحراف استقلال فرکانسی که استاتیک شیفتمایده می‌شود؛ تولید می‌کند [Simpson et al., 2005].



شکل (۷-۲): مدل مقاومت سه‌بعدی، که تانسور امپدانس Z کاملاً نسبت داده می‌شود و تمام مؤلفه‌ها نسبت به همدیگر مستقل هستند [Vozoff, 1972].

۲-۱۱ مدل سازی پیشرو^۱ داده MT

هدف مدل سازی پیشرو MT در حل معادلات ماکسول برای شبیه سازی توزیع مکانی و زمانی میدان های الکتریکی و مغناطیسی در زیر سطح برای یک توزیع رسانا در یک گستره ی فرکانسی می باشد. چندین روش در طول چهار دهه گذشته برای حل معادلات ماکسول برای یک مورد یک بعدی پیشنهاد شده است. برای مورد یک بعدی، حل تحلیلی^۲ برای محاسبه امپدانس در مرزهای بین لایه ها در یک مدل زمین لایه ای و در نتیجه در سطح وجود دارد. برای برخی مدل های زمین دو و سه بعدی، حل های تحلیلی یافت شده است. این حل ها معمولاً در بررسی دقت و صحت روش های حل عددی^۳ استفاده شده اند [Porsten, 1975 ; Weaver, 1994].

چندین روش عددی برای حل معادلات القا در دو و سه بعد وجود دارد. روش معادلات انتگرالی در سال های ۱۹۷۰ توسعه داده شده به عنوان مثال [Wannamaker et al., 1984]. مفهوم اصلی معادله انتگرالی رویکردی است برای حل معادلات ماکسول فقط در مناطق زیر مدل که آنومالی رسانایی وجود دارد (دوبعد و یا سه بعد). برای رسیدن به این منظور، آنومالی ساختمان های رسانا به سلول های مستطیلی (دوبعدی) یا مکعب ها (سه بعدی) تقسیم شدند در حالی که اطراف ساختارها یک بعدی در نظر گرفته شده است. بادر نظر داشتن تنها مناطق با آنومالی های رسانا ممکن است با یک سطح (دوبعدی) یا حجم (سه بعدی) معادلات ماکسول در پیوستگی با تئوری های گرین ادغام شوند. در نتیجه، حل کلی میدان الکترومغناطیس مجموع میدان نرمال که وابسته به ساختارهای رسانای زمینه دارد و میدان های آنومال ناشی از بخش آنومال، می باشد [Zhdanov et al., 1997]. محبوب ترین و به طور گسترده ترین روش های استفاده شده در حل معادلات

¹Forward Modeling

²Analytical Solution

³Numerical Solutio

ماکسول روش‌های معادله دیفرانسیلی^۱ هستند. در این روش‌ها تمام مدل زمین (نه فقط ساختار آنومال) به سلول‌های مستطیلی (دوبعدی) یا مکعبی (سه‌بعدی) تقسیم شده و به هر سلول/مکعب یک مقدار رسانایی اختصاص داده شده است. برای هر یک از این سلول‌ها/مکعب‌ها، معادلات ماکسول حل شده‌اند. مزیت اصلی روش‌های معادله دیفرانسیلی انعطاف پذیریشان در ساخت مدل زمین است. یک عیب این روش‌ها، نیازمند بودن به محاسبات بزرگ ناشی از گسسته‌سازی خوب مدل و در نتیجه نیاز به حل یک سیستم معادلات با یک تعداد زیادی معادلات خطی در دریافت نتایج دقیق می‌باشد.

حل معادلات مشتقات جزئی^۲ مرتبه دوم با استفاده از روش‌های تفاضل محدود و یا اجزا محدود انجام می‌شود. اجزا محدود از نظر طراحی مدل انعطاف پذیرتر است چون که سلول‌ها/مکعب‌ها نباید شکل مستطیلی داشته باشند که این برای روش تفاضل محدود نیاز است (روش تفاضل محدود سلول‌ها مستطیلی هستند). روش اجزا محدود اگر مدل زمین شامل توپوگرافی یا عمق سنجی باشد به‌طور ویژه مفید است.

۲-۱۲ مدل‌سازی پیشرو در سه‌بعد

حل مسئله القای الکترومغناطیس در سه‌بعد وقتی با حل مسئله در دوبعد مقایسه می‌شود، کار ساده‌ای نیست. زیرا، تغییر رسانایی زمین در سه جهت فضایی $(\sigma(x, y, z))$ است. به‌علاوه، تئوری القای سه‌بعدی اجازه می‌دهد که منبع میدان هندسه‌ی دلخواه داشته باشد. هندسه‌ی منبع میدان دارای یک اثر قابل توجه است وقتی که مدل زمین خیلی بزرگ است، به‌طوری که فرض این که میدان الکترومغناطیسی افقی و یکنواخت است دیگر معتبر نیست [Weaver, 1994].

به‌هرحال، برای ساده‌سازی در حل مسئله‌ی القای سه‌بعدی ما فرض خواهیم کرد که فقط تغییر رسانایی زمین در سه جهت است و منبع میدان افقی و یکنواخت نگه داشته می‌شود.

¹Differential equation

²Partial differential equations

حل معادلات ماکسول در سه بعد بهتر است عددی انجام شود توسط هر حل معادله درجه دوم:

$$\nabla \times \nabla \times E = i\omega\mu_0\sigma E - \nabla[(\nabla\sigma) \cdot \frac{E}{\sigma}] \quad (76-2)$$

برای E یا حل:

$$\nabla \times \nabla \times B = i\omega\mu_0\sigma B - [(\nabla\sigma) \times \frac{\nabla \times B}{\sigma}] \quad (77-2)$$

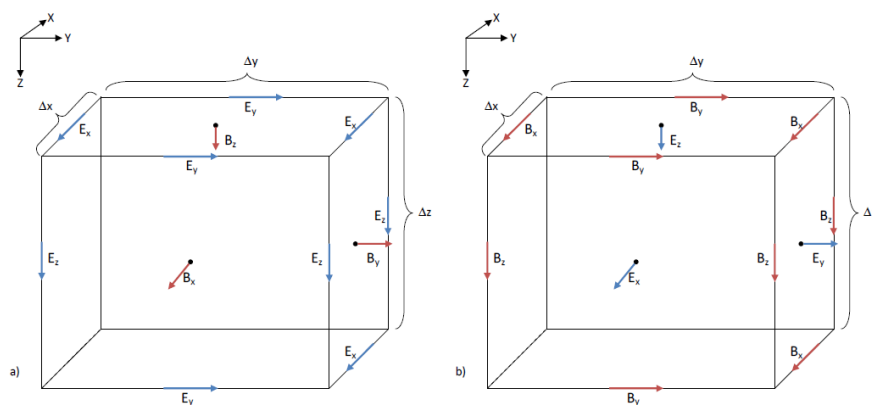
برای B. در مقایسه با حل مسئله القا در دوبعد، حل معادله (76-2) یا (77-2) در شرایط یک میدان برداری سه مؤلفه‌ای (E_x, E_y, E_z یا B_x, B_y, B_z) به جای یک مؤلفه اسکالر¹ به دست آمده است. به علاوه معادله (76-2) برای میدان الکتریکی شامل یک عبارت است که هدایت رسانندگی را درگیر می‌کند که در دوبعد ظاهر نمی‌شود. با این وجود، به کار بردن روش تفاضل محدود در تقریب معادله (76-2) یا (77-2) در یک شبکه سه بعدی همان مفهوم را که برای مورد دوبعدی دارد، پیروی می‌کند. این یعنی این که مدل زمین ابتدا در مکعب‌هایی گسسته است (به جای سلول‌هایی مانند در دوبعد) و به هر مکعب یک رسانایی ثابت اختصاص داده شده است. بعد از آن، یک تقریب میدان EM در هر لبه و درون مکعب‌ها به جای گره‌های سلول در دوبعد محاسبه شده است.

به طور کلی دو روش در مشخص کردن شبکه عددی برای تقریب تفاضل محدود وجود دارد. در نوع اول شبکه‌بندی عددی سه بعدی، سه مؤلفه میدان الکتریکی در لبه‌های مکعب تعیین می‌شود در حالی که سه مؤلفه میدان مغناطیسی درون مکعب‌ها (شکل ۲-۸-الف) تعیین می‌شود. در این مورد یک راه حل معادله (76-2) برای میدان الکتریکی پیگیری شده است و سپس میدان مغناطیسی ثانویه با استفاده از معادله اول ماکسول (معادله ۱-۲، قانون فاراده) از E مشتق شده است. این مشخصات میدان الکتریکی در شبکه شطرنجی توسط [Yee, 1996] برای حل مسائل مقدار مرزی معادلات ماکسول استفاده شده است؛ از آن جا که، این نوع شبکه عددی گاهی اوقات گرید یی نامیده شده. این نوع شبکه عددی قبلاً برای مدل سازی

¹Scalar components

پهنای باند سه‌بعدی الکترومغناطیس برای MT سه‌بعدی استفاده شده است [Alumbaugh et al., 1997]. در نوع دوم شبکه‌بندی عددی، مؤلفه‌های میدان مغناطیسی در لبه‌های مکعب‌ها و مؤلفه‌های میدان الکتریکی ثانویه درون مکعب‌ها (شکل ۲-۸-ب) تعیین شده‌اند. در این مورد، معادله (۲-۷۶) برای E و B مشتق شده از معادله دوم ماکسول (معادله ۲-۲، قانون آمپر) حل شده است. این نوع شبکه‌بندی سه‌بعدی برای مدل‌سازی سه‌بعدی MT استفاده شده است [Mackie et al., 1994].

به‌طور مستقل از شبکه عددی در حل هر یک از معادله (۲-۷۶) یا (۲-۷۷) با استفاده از روش تفاضل محدود استفاده می‌شود.



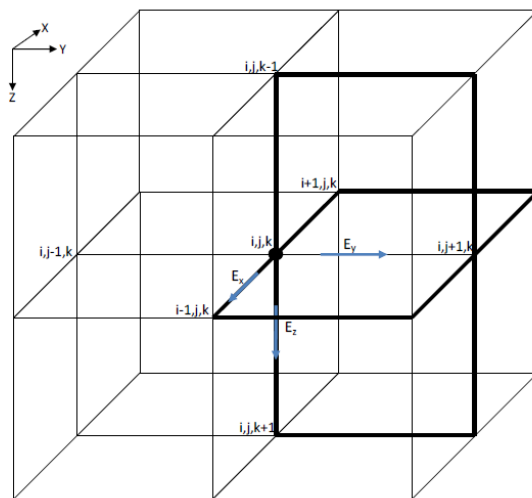
شکل (۲-۸): دو تعریف مختلف از شبکه‌های عددی استفاده شده در روش تفاضل محدود در نمونه: (a) مؤلفه‌های میدان الکتریکی اولیه در لبه‌های مکعب و مؤلفه‌های میدان مغناطیسی ثانویه در یال‌ها. (b) قرارداد استفاده شده در نمونه مؤلفه-های میدان مغناطیسی اولیه در لبه‌های مکعب و مؤلفه‌های میدان الکتریکی ثانویه در یال‌ها. X, Y و Z ابعاد مکعب در جهت‌های X, Y, Z هستند [Kelbert et al., 2014].

معمولاً یک سیستم معادلات خطی^۱ به‌دست می‌آوریم:

$$Ax = b \quad (۲-۷۸)$$

¹Systems of linear equations

که به سیستم معادله به دست آمده در دوبعد شبیه است. به هر حال، بعد A و x و b متفاوت هستند. ماتریس غیرهرمیتی و موهومی و پراکنده‌ی A شامل مقادیر ضرایب جفت شدگی بین یک لبه مرکزی و دوازده لبه‌های همسایه است. برای مثال، ضخامت خطی لبه‌ها در شکل (۲-۸) در شکل‌گیری معادله مربوط برای E_x در گره $^1(I, j, k)$ نیاز هستند. این یعنی، ردیف متناظر در ماتریس ضرایب A شامل سیزده عنصر غیر صفر (لبه‌های دوازده‌المان به علاوه‌ی مرکز یکی) است. یک روش مشابه برای لبه‌های دیگر در شبکه و مؤلفه‌های میدان الکتریکی دیگر استفاده شده است. این نتایج در یک ماتریس ضرایب، و از این رو یک سیستم معادله هستند، که بعد $N_x(N_y+1)(N_z+1) + (N_x+1)N_y(N_z+1) + (N_x+1)(N_y+1)N_z$ دارد، جایی که N_x, N_y, N_z اعداد پارامترهای مدل به ترتیب در جهات x, y, z هستند. جزئیات بیشتر در مورد چگونگی نشان دادن عملگرهای $\nabla \times E$ یا $\nabla \times B$ در یک شکل مجزا از محاسبات مربوط به ضرایب جفت شدگی در سه‌بعد و بنابراین ساخت ماتریس A به‌عنوان مثال در آورده شده است [Weaver., 1994].



¹ node

شکل (۲-۹): بخش کوچکی از شبکه شطرنجی استفاده شده برای محاسبه‌ی مؤلفه‌های میدان الکتریکی E_x , E_y در لبه-های مکعب‌ها. این شکل برای تاکید ارتباط بین لبه‌ها بر روی یکدیگر برای ساختن ضریب ماتریس a استفاده شده است. به-عنوان مثال برای ساختن معادلاتی که برای محاسبه مؤلفه‌های میدان الکتریکی E_y که با نودهای (I, j, k) متناظر است دوازده مؤلفه میدان الکتریکی در لبه‌ها که با خطوط ضخیم مشخص شده است مورد نیاز است [Meqbel, 2009].

معادله (۲-۷۸) برای نتایج x در مقادیر سه مؤلفه‌های میدان الکتریکی E_x و E_y و E_z در تمام لبه‌های شبکه حل می‌شود. با استفاده از قانون فاراده (معادله ۲-۱) مؤلفه‌های میدان مغناطیس از مؤلفه‌های میدان الکتریکی مشتق شده‌اند.

سه مؤلفه میدان الکتریکی برای یک سیستم جریان که در جهت N-S (مد اول) یا در E-W (مد دوم) دنبال می‌شود، محاسبه شده است. به‌دست آوردن همان مؤلفه‌های میدان الکتریکی، برای گرایش دیگری از سیستم جریانی، می‌توان مدل را ۹۰ درجه، برای ساختن سیستم معادلات (۲-۷۸) و حل دوباره آن برای x چرخاند [Weaver, 1994].

نیاز برای سه مؤلفه میدان الکتریکی با استفاده از دو گرایش سیستم جریان بر اساس این واقعیت است که پاسخ مدل در MT سه‌بعدی تانسور امپدانس کامل و تابع انتقال عمودی مغناطیس هستند. بنابراین، در ساخت تانسور امپدانس کامل دو جهت دهی سیستم جریان نیاز داریم، به‌طوری که :

$$\begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E_x^1 E_x^2 \\ E_y^1 & E_y^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_x^1 B_x^2 \\ B_y^1 & B_y^2 \end{pmatrix}^{-1} \quad (۲-۷۹)$$

زیر نویس ۱ و ۲ در معادله (۲-۷۹) مؤلفه الکتریکی یا مغناطیسی ناشی از به ترتیب مدهای اول و دوم را مشخص می‌کند.

سمت راست بردار b در معادله (۲-۷۹) شامل مقادیر شرایط مرزی است. برای مدل‌سازی پیشرو سه‌بعدی MT مقادیر مرزی آن‌هایی هستند که با شمالی، جنوبی، شرقی، غربی سطح و کف سلول‌های شبکه شطرنجی

مطابق است. برای توجیه شرایط مرزی در این سلول‌های شبکه سه‌بعدی، توزیع دوبعدی رسانندگی $\sigma(x, z)$ یا $\sigma(y, z)$ درون سلول‌ها و توزیع یک بعدی $\sigma(z)$ در لبه‌های این سلول‌ها انجام می‌شود. به عبارت دیگر، در حل مسئله مدل‌سازی پیشرو MT سه‌بعدی ابتدا باید مسئله در یک‌بعد و سپس در دوبعد حل شود و مقادیر محاسبه شده به ترتیب به گوشه‌ها یا درون شبکه سه‌بعدی اختصاص داده شوند. برای حل مسئله دوبعدی در پایان اشکال شبکه سه‌بعدی باید بین حل مسئله‌های مدهای TE یا TM بسته به سیستم جریان که در شبکه سه‌بعدی دنبال می‌شود، تمیز داده شود. برای مثال، اگر سیستم جریان در جهت شمال-جنوب ادامه یابد پس باید مسئله مد TE دوبعد در شکل‌های شمال جنوبی و مسئله مد TM در شکل‌های شرقی و غربی حل شود.

جدا از پیچیدگی که ممکن است از ساخت ماتریس A و بردار b در شکل‌گیری سیستم معادله نمایش داده شده در معادله (۷۸-۲) به وجود آید، علاقه‌مند به رعایت خواص معادله (۷۸-۲) در استفاده بعدی آن‌ها برای حل مسئله مدل‌سازی پیشرو MT سه‌بعدی در کامپیوترهای موازی انبوه هستیم.

سیستم معادلات در سه‌بعد (معادله ۷۸-۲) مشابه ویژگی‌هایی مانند سیستم معادلات در دوبعد است، به هر حال، ابعاد در هر دو معادله متفاوت هستند. در مورد سه بعد وضعیت متفاوت است: به‌منظور محاسبه پاسخ‌های مدل، نتیجه مؤلفه‌های میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی از دو جهت دهی سیستم جریان مورد نیاز هستند (معادله ۷۹-۲). به هر حال، این مهم است توجه کنید که این وابستگی مدها در مدل‌سازی پیشرو سه‌بعدی فقط وقتی که مدل پاسخ‌ها محاسبه می‌شود مورد نیاز است و زمانی که مؤلفه‌های مغناطیسی و الکتریکی برای هر مد محاسبه می‌شود مورد نیاز نیست. این یعنی که پردازش محاسبات در به‌دست آوردن مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی مورد نیاز از هر حالت (مد) را می‌توان به‌صورت موازی انجام داد.

۲-۱۳ وارون سازی^۱ داده های MT

هدف نهایی تئوری وارون سازی فراهم کردن یک چهارچوب کار ریاضی برای تبدیل داده های اندازه گیری شده از فضای داده^۲ به فضای مدل^۳ به منظور تخمین پارامترهای مدل است. حل مسائل وارون سازی در شعبه های مختلف علوم پزشکی، فیزیکی و ژئوفیزیکی مورد استفاده است. در ژئوفیزیک، حل مسئله وارون سازی با هدف مشخص کردن ساختار زمین مورد استفاده است. وابسته به روش ژئوفیزیکی استفاده شده، ساختار زمین می تواند با استفاده از توزیع مقاومت ویژه الکتریکی (ژئوالکتریک و الکترومغناطیس) سرعت صوتی (لرزه و زلزله شناسی)، چگالی (گرانی سنجی) و ... توضیح داده شود. خصوصیات فیزیکی سنگ ها بازتابی از تشکیلات زمین شناسی است، که ساختار زمین را تعیین می کند. رایج ترین و گسترده ترین روش وارون سازی می تواند طبقه شوند در دو دسته اصلی:

- وارون سازی خطی^۴: یک تابع غیرخطی پارامترهای مدل را از فضای مدل به فضای داده نگاشت می کند (عملگر مدل سازی پیشرو) است. ابتدا خطی قبل از مسئله معکوس حل شده است.

¹Inversion

²Data space

³Model Space

⁴ Linear inversion

- وارون سازی غیر خطی^۱: مسئله‌ی وارون مستقیماً با استفاده از عملگر غیرخطی مدل سازی پیشرو حل شده است.

هر یک از طرح‌های وارونگی بالا را می‌توان در مدل یا در فضای داده حل کرد. تفاوت بین هر دو روش‌ها، در اندازه مسئله معکوس است، زمانی که داده ژئوفیزیکی در دو و سه بعد معکوس می‌شود به‌طور قابل توجهی مهم می‌شود.

۲-۱۳-۱ وارون سازی خطی در فضای مدل

در فرآیند وارون سازی داده الکترومغناطیس، به‌خصوص MT، برخی داده اندازه‌گیری شده در شکل توابع انتقال افقی و یا عمودی یا مقاومت ویژه ظاهری و فاز هستند که سعی می‌شود پارامترهای مدل (مقاومت) که می‌تواند داده‌های اندازه‌گیری شده را توضیح دهد، به‌دست آید. قبل از توصیف فرمول‌بندی ریاضی برای فرآیند وارون سازی، اجازه دهید که مجموعه‌ای از نمادهایی که در سراسر متن استفاده خواهد شد، ارائه شود:

می‌توان N داده اندازه‌گیری شده را به‌عنوان عناصر بردار داده d مورد بحث قرار داد،

$$d = [d_1, d_2, d_3, \dots, d_N]^T$$

بردار داده N بعدی در فضای داده قرار می‌گیرد. معمولاً، همه‌ی داده‌های اندازه‌گیری شده با یک بردار خطا e آلوده شده‌اند. مدل m که شامل M پارامتر مدل است و می‌توان ارائه داد مانند:

$$m = [m_1, m_2, m_3, \dots, m_M]^T$$

¹Nonlinear inversion

بردار مدل در فضای مدل قرار گرفته است.

تبدیل از فضای مدل به فضای داده با عملگر مدل سازی پیشرو F به دست آمده است؛ که تابع m هست. تابع $F(m)$ تولید داده های پیش بینی شده یا مصنوعی می کند. بردار پارامتر مدل m و بردار داده d به یکدیگر مرتبط هستند از طریق:

$$F(m) = d + e$$

فرآیند وارون سازی در پیدا کردن یک مدل که باز داده های اندازه گیری شده را در خطای خود تولید کند، تلاش می کند. به عبارت دیگر، فرآیند وارون سازی در بهینه کردن (مینیمم سازی) باقی مانده بین داده های اندازه گیری شده و پیش بینی شده تلاش می کند. برای ارزیابی کیفیت تطابق، یک وزن معیار حداقل مربعات استفاده شده است [Jackson, 1972 and Constable, 1987].

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(d_i - F_i(m))^2}{e_i^2} \quad (۸۰-۲)$$

که e_i خطای داده ی نقطه ی i ام است. در یک معنا حداقل مربع، تابع به حداقل رسیده شناخته شده به عنوان تابع غیرمتجانس با محیط، تابع هزینه، تابع هدف، تابع مجازات یا تابع انرژی که تعیین می شود به صورت:

$$\psi_d(m) = \|Wd - WF(m)\|^2 = [d - F(m)]^T W^T W [d - F(m)] \quad (۸۱-۲)$$

که W قطر ماتریس $N \times N$ هست که شامل خطای داده ی وارون سازی است،

$$W = \text{diag} \left\{ \frac{1}{e_1}, \frac{1}{e_2}, \dots, \frac{1}{e_N} \right\}$$

پس W یک ماتریس قطری است، عبارت WW^T می تواند از تعریف $\Psi_d(m)$ توسط تغییر مقیاس داده اندازه گیری شده یا پیش بینی شده حذف شود [Egbert, 2000].

از نقطه نظر ریاضی، تابع $\Psi_d(m)$ می‌تواند با استفاده از یک روش حداقل مربعات^۱ مینیمم شود. به هر حال، این برای توابع خطی تعیین شده است. عملگر F یک تابع m است، به هر حال این عملکرد خطی نیست. از این رو، یک روش حداقل مربعات غیرخطی باید به کار برده شود. این یعنی که تابع $F(m)$ باید ابتدا خطی شود. خطی سازی عملگر مدل سازی پیشرو را می‌توان توسط یک سری تیلور مرتبه اول در حول نقطه شروع به دست آورد، یا یک به اصطلاح مدل حدس اولیه (m_0). در این مورد، تابع خطی $F(m)$ می‌تواند نوشته شود به عنوان:

$$F(m_0 + \Delta m) = F(m_0) + \frac{\partial F(m_0)}{\partial m_0} \Delta m = F(m_0) + J \Delta m \quad (۸۲-۲)$$

که J حساسیت یا ماتریس ژاکوبین است و Δm یک تغییر کوچک در اطراف m_0 است. همان‌طور که از نامش پیداست، J چگونگی حساسیت داده پیش‌بینی شده را به دست یک تغییرات کوچک در پارامترهای مدل توصیف می‌کند. همان‌طور که در معادله (۸۲-۲) نشان داده شده است عناصر این ماتریس با مشتق اول داده پیش‌بینی شده با توجه به پارامترهای مدل مطابقت دارد،

$$(۸۳-۲)$$

^۱Least Squares Method

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1(m)}{\partial m_1} & \frac{\partial F_1(m)}{\partial m_2} & \frac{\partial F_1(m)}{\partial m_M} \\ \frac{\partial F_2(m)}{\partial m_1} & \dots & \dots \\ \vdots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial F_N(m)}{\partial m_1} & \dots & \frac{\partial F_N(m)}{\partial m_M} \end{pmatrix}$$

بازگشت به مسئله وارون سازی، اختلاف m_0 با Δm ، تابع جریمه $\Psi_d(m)$ در معادله (۸۱-۲) به شکل زیر در می آید:

$$\psi_d(m_0 + \Delta m) = [d - F(m_0 + \Delta m)]^T [d - F(m_0 + \Delta m)] \quad (۸۴-۲)$$

جایگزینی معادله (۸۲-۲) در معادله (۸۴-۲):

$$\psi_d(m_0 + \Delta m) = [d - F(m_0) - J\Delta m]^T [d - F(m_0) - J\Delta m]$$

$$= [d' - J\Delta m]^T [d' - J\Delta m]$$

(۸۵-۲)

که،

$$d' = d - F(m_0)$$

تطابق بین داده اندازه گیری و پیش بینی شده توصیف شده است.

یک نقطه اکسترمم ثابت (مینیمم و یا ماکسیمم) تابع خطا $\Psi_d(m)$ را با گرفتن مشتق معادله (۸۵-۲) با

نسبت به Δm و مساوی قرار دادن با صفر می توان یافت:

¹Penalty function

$$\frac{\partial \Psi_d(m_0 + \Delta m)}{\partial \Delta m} = \frac{\partial}{\partial \Delta m} \left([d^* - J\Delta m]^T [d^* - J\Delta m] \right) = 0 \quad (۸۶-۲)$$

$$= \frac{\partial}{\partial \Delta m} (d^{*T} d^* - d^{*T} J \Delta m - \Delta m^T J^T d^* + \Delta m^T J^T J \Delta m) = 0$$

$$= 2J^T d^* - 2J^T J \Delta m = 0$$

$$J^T J \Delta m = J^T d^*$$

$$\Delta m = (J^T J)^{-1} J^T d^*$$

معادله (۸۶-۲) به اصطلاح معادلات نرمال^۱ می‌باشند؛ که همچنین به‌عنوان گوس-نیوتن^۲ یا حل حداقل مربعات نامحدود شناخته شده است. در این الگوریتم معادله (۸۶-۲) برای مدل به روز شده Δm و اضافه کردن به مدل شروع (m_0) حل شده است. چون سری تیلور^۳ در عملگر مدل‌سازی پیشرو خطی در معادله (۸۲-۲) فقط یک تقریب هست، یک روش تکرار شونده به دنبال بهبود m_0 درخواست شده است. روش معمول استفاده شده در الگوریتم گوس-نیوتن می‌تواند به شرح زیر باشد:

۱. حل مسئله مدل‌سازی پیشرو و محاسبه‌ی x^2 با استفاده از معادله (۸۰-۲).

۲. اگر x^2 بزرگتر از یک مقدار مطلوب است، پس ماتریس حساسیت و حل معادلات نرمال (معادله ۸۶-۲) محاسبه شود.

^۱Normal Equations

^۲Gauss -Newton

^۳Taylor

۳. گام‌های ۱ و ۲ تا همگرایی رسد (به‌عنوان مثال مقدار مطلوب از x^2 یا تعداد تکرار تجاوز کرده باشد).
تکرار می‌شوند.

همگرایی الگوریتم گوس-نیوتن در نقطه ثابت $\Psi_d(m)$ (مینیمم کلی) اگر در کل همگرا شود خیلی آهسته است، این ناشی از این واقعیت است که:

مدل اولیه خیلی دور از مدل واقعی است. برای غلبه بر این مشکل وجود اطلاعات زمین شناسی مختلف و اطلاعات ژئوفیزیکی دیگر که اجازه می‌دهد ساخت یک مدل مناسب شروع شود، لازم است.

اگر $J^T J$ تکین باشد ($\det(J^T J) = 0$)، وارون $J^T J$ وجود ندارد، و از این‌رو، هیچ حلی برای معادله (۲-۸۶) وجود نخواهد داشت به‌علاوه، اگر ($\det(J^T J) < 1$) باشد تقریباً تکین است پس، حل همگرا نخواهد بود.

مسئله ناشی از تکینگی $J^T J$ تقریباً برای همه روش‌های ژئوفیزیکی مشترک است، زیرا معمولاً برای توصیف بردار داده N بعدی ($N \ll M$) نیازمند تعداد زیادی پارامتر مدل هستیم. این یعنی که بسیاری از ستون‌های J صفر یا تقریباً صفر هستند. برای دور زدن مشکل سخت مطرح شده در روش گوس-نیوتن، محدودیت‌ها اغلب در معادله‌ی نرمال تحمیل می‌شوند. استفاده از شرط (محدودیت) در معادلات نرمال نشان می‌دهد که مدل باید ویژگی‌های خاصی داشته باشد. شرط‌ها ممکن هستند:

بردار مدل به روز شده Δm باید یک هنجار کوچک داشته باشد،

$$\min. \|\Delta m\|^2 \quad (۲-۸۷)$$

این شرط همچنین اطمینان می‌دهد که سری تیلور همیشه برای مقادیر کوچک Δm معتبر است.

مدل محدود است به‌طوری‌که تفاوت بین دو پارامترهای مدل مجاور در آن مینیمم خواهد بود. این می‌تواند با استفاده از ماتریس سختی R به‌دست آید.

$$\min. \|Rm\|^2 \quad (۸۸-۲)$$

مدل باید یک اطلاعات پیشینی در قالب مدل (m^{apri}) در نظر بگیرد،

$$\min. \|m - m^{apri}\|^2 \quad (۸۹-۲)$$

این شرط اطمینان می‌دهد که مدل نهایی نزدیک به مدل پیشین خواهد بود.

استفاده از هر شرایط قبلی را باید همراه با تابع جریمه $\Psi_d(m)$ در نظر گرفت. در این مورد، می‌توان یک تابع جریمه که مسئله مینیم سازی اصلی (معادله ۸۱-۲) و یکی از محدودیت‌های قبلی را در نظر گرفته، نوشت. برای مثال:

$$\min. \|d - F(m)\|^2 \text{ and } \min. \|\Delta m\|^2$$

یا

$$\psi = \psi_d(m) + \lambda \psi_m(m) \quad (۹۰-۲)$$

که λ به اصطلاح پارامتر تنظیم و یا بده بستان است. یک مقدار مناسب λ اطمینان می‌دهد که هیچ یک از $\Psi_d(m)$ و نه $\Psi_m(m)$ در تابع جریمه Ψ فزونی نخواهد داشت یعنی هر دو به‌طور مساوی و هموار مینیم خواهند شد و یک λ متفاوت از یک منحنی L گرفته می‌شود اگر $\Psi_d(m)$ در مقابل $\Psi_m(m)$ در یک پلات log-log رسم کنیم. از نظر ریاضی، این می‌تواند به شرح زیر توصیف شود:

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} \psi_d \rightarrow \min \text{ and } \lim_{\lambda \rightarrow 0} \psi_m \rightarrow \max$$

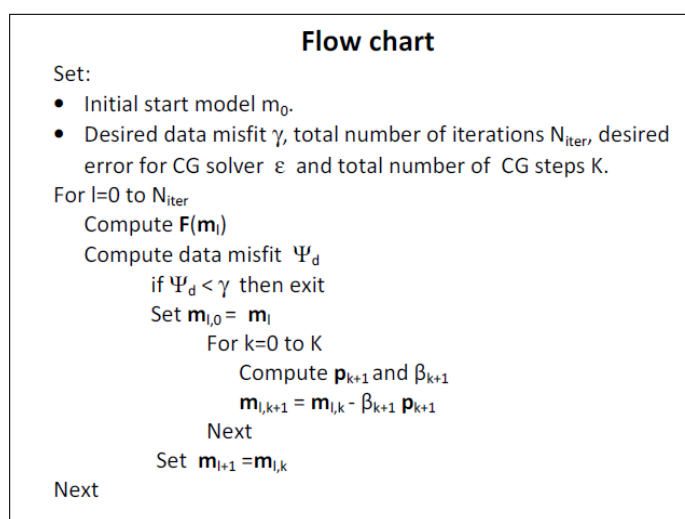
$$\lim_{\lambda \rightarrow \infty} \psi_d \rightarrow \max \text{ and } \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \psi_m \rightarrow \min$$

این نشان می‌دهد که مسئله کمینه سازی اصلی با توجه به پارامتر تنظیم به مینیم سازی و بهینه‌سازی تبدیل می‌شود.

۲-۱۳-۲ وارون سازی غیرخطی با استفاده از روش گرادیان مزدوج غیرخطی^۱

گرادیان مزدوج غیرخطی وابسته به روش خطی گرادیان مزدوج در زمینه حل مسئله وارون سازی خطی است. به هر حال، روش گرادیان مزدوج غیرخطی مسائل کمینه سازی که درجه دوم نمی باشد را به طور مستقیم حل می کند و از روش وارونگی خطی تکرارشونده مورد استفاده در سبک وارونگی گوس-نیوتن اجتناب می کند [Rodi, 2001].

گرادیان مزدوج غیرخطی در حل مسئله وارون سازی در MT دوبعدی [Rodi, 2001] و در MT سه بعدی [Newman and Alumbaugh, 2000] استفاده شده است. آزمون های عددی نشان داده که گرادیان مزدوج غیرخطی از نظر حافظه مورد نیاز کامپیوتر و زمان CPU مورد نیاز در حل مسئله کارآمدتر از گوس نیوتن است [Rodi and Mackie, 2001].



شکل (۲-۱۰): نمودار برای روش گرادیان مزدوج در حل معادلات نرمال خطی شده [Meqbel, 2009].

¹NonLinear Conjugate Gradient Method:NLGG

برای مسائل مقیاس بزرگ، مانند مورد سه بعدی، وارونگی بر اساس الگوریتم‌های گوس نیوتن ممکن است امکان پذیر نباشد با توجه به این واقعیت که در این الگوریتم‌ها باید ماتریس حساسیت (J) وجود داشته باشد و در حل معادله نرمال نتیجه متقابل $J^T J$ باید محاسبه شود، زیرا گرادیان مزدوج غیرخطی از استفاده صریح J اجتناب می‌کند و در نتیجه، نتیجه متقابل $J^T J$ ، یک گزینه واقع بینانه برای حل مسئله معکوس در مورد MT سه بعدی به نظر می‌رسد. به هر حال، در مقایسه با گوس نیوتن، گرادیان مزدوج غیرخطی نیاز به مراحل گرادیان مزدوج بیشتری برای همگرایی دارد. دلیل این است که گوس نیوتن همگرایی از درجه دوم ارائه می‌دهد و فقط نیاز به تعداد اندکی تکرار برای همگرایی دارد [Egbert, 2006].

گرادیان مزدوج غیرخطی با بهره‌گیری از اساساً همان مراحل محاسباتی اصلی مورد نیاز برای حل مسائل خطی سازی با استفاده از یک روش گرادیان مزدوج عمل می‌کند. با روش گرادیان مزدوج غیرخطی باید گرادیان معادله (۲-۹۰) نسبت به پارامترهای مدل m ارزیابی شود. به هر حال، یک نفر باید شکل غیرخطی آن را در نظر بگیرد.

$$\nabla \psi = \nabla \psi_d + \lambda \nabla \psi_m \quad (۹۱-۲)$$

ارزیابی گرادیان تابع هموارسازی مدل ψ_m ارائه شده در معادله (۲-۸۸) منجر می‌شود به:

$$\nabla \psi_m = 2R^T Rm \quad (۹۲-۲)$$

گرادیان تابع (۲-۸۱) گرفته می‌شود توسط:

$$\nabla \psi_d = -2J^T (d - f(m)) \quad (۹۳-۲)$$

به هر حال، هدف اصلی با روش گرادیان مزدوج غیرخطی مینیمم سازی تابع جریمه Ψ می‌باشد.

از معادلات (۲-۹۲) می‌توانیم استنباط کنیم که وظیفه محاسبات اصلی نتیجه بردار ماتریس $J^T(d-f(m))$ است. به هر حال، همان‌گونه که در بالا بحث شد، J برای به انجام رساندن این ضرب نباید وجود داشته باشد [Meqbel, 2009].

۲-۱۴ اعوجاج داده‌های MT

۲-۱۴-۱ اثرات اعوجاج گالوانی^۱

توابع پاسخ MT می‌توانند توسط جریان‌های مستقیم متأثر شوند، در MT به این حالت انحراف گالوانیکی اطلاق می‌شود که توسط اجسام رسانای محلی، ساختارهای سه‌بعدی کوچک، ایجاد می‌شوند. این انحراف می‌تواند اکتشاف منطقه‌ای زیر زمین را دچار خدشه کند. در این حالت دلایلی برای انحراف میدان‌های منطقه‌ای وجود دارد و بنابراین هدف، حذف این اثر و بازیابی اطلاعات منطقه‌ای است. چنین ساختارهای غیرعادی (با آنومالی‌های محلی) باید در اعماق خیلی کمتر از عمق پوست میدان‌های الکترومغناطیسی القایی مورد نظر باشند، تا اثرات القایی آن‌ها قابل صرف نظر باشد و در نتیجه تنها اثر الکترواستاتیکی DC آن‌ها وجود داشته باشد. در نتیجه میدان‌های منطقه‌ای داخل جسم کوچک می‌تواند یکنواخت فرض شود، و به همین علت میدان‌های الکترومغناطیسی غیرعادی هم‌فاز با میدان منطقه‌ای خواهند بود. جریان‌های DC به تفاوت رسانایی بین فضای منطقه‌ای و آنومالی‌های محلی و همچنین هندسه آن‌ها بستگی دارد.

تحت فرض‌های اشاره شده در بالا، انحراف میدان‌های الکتریکی منطقه‌ای توسط ناهمگنی‌های محلی در رسانایی، در MT به عنوان انحراف گالوانیکی تلوریک شناخته می‌شود که مستقل از فرکانس می‌باشند. پس انحراف‌های تلوریک می‌توانند به‌طور قابل توجهی دامنه‌های میدان الکتریکی اندازه‌گیری شده را در باند

¹Galvanic Distortion Effects

فرکانسی مورد نظر تحت تأثیر قرار دهد که این تأثیر به ویژه در فرکانس‌های پایین‌تر که دامنه‌های میدان-های منطقه‌ای کاهش می‌یابد چشمگیرتر می‌شود. اثر جابه‌جایی استاتیکی در MT مربوط به این نوع انحراف است.

جریان‌های DC، همچنین میدان‌های مغناطیسی غیرعادی القاء می‌کنند که متناسب و هم‌فاز با میدان-های الکتریکی منطقه‌ای می‌باشند. دامنه این میدان‌های مغناطیسی متناسب با ریشه دوم کاهش می‌یابد بنابراین، این اثر مغناطیسی در MT به نام انحراف گالوانیکی مغناطیسی شناخته می‌شود که در فرکانس‌های پایین‌تر با افزایش قابل ملاحظه عمق‌های نفوذ میدان EM در مقایسه با ابعاد ساختار محلی، از اثر انحراف تلوریکی خیلی کوچک‌تر می‌شوند. بنابراین اثر مغناطیسی را در فرکانس‌های پایین‌تر می‌توان صفر در نظر گرفت. البته تحت انحراف‌های گالوانیکی مغناطیسی غیر قابل چشم‌پوشی، توابع پاسخ مغناطیسی نیز توسط ساختارهای محلی متأثر می‌شوند [Groom and Bailey, 1991].

۲-۱۴-۲ جابه‌جایی ایستا

نقطه ضعف روش MT این است که ناهمگنی‌های موجود در لایه‌های بالایی، میدان الکتریکی، تانسور امپدانس و مقاومت‌ویژه‌ی ظاهری را به شدت آشفته می‌کنند. جابه‌جایی ایستا به علت وجود ناهمگنی‌های سطحی الکتریکی و یا به علت وجود توپوگرافی ایجاد می‌شود. دلیل ایجاد این پدیده ناپیوستگی میدان الکتریکی افقی به هنگام عبور از ناهمگنی‌های جانبی است. این آشفته‌گی‌ها دارای طبیعت گالوانی هستند و روی کل بازه‌ی بسامدهای پایین ادامه می‌یابند و جابه‌جایی ایستا مقاومت‌ویژه‌ی ظاهری را ایجاد می‌کنند. اثرات ایستا به این معنی است که بر اثر آن یک جابه‌جایی عمودی در منحنی‌های مقاومت ظاهری بین ایستگاه‌های مجاور و یا بین دو منحنی در یک ایستگاه، بدون هیچ تفاوت شکلی در منحنی‌ها و فاز آن‌ها

اتفاق می‌افتد. در صورتی که فاصله بین ایستگاه‌ها خیلی زیاد باشد تفاوت‌های بین منحنی‌های مقاومت‌ویژه ظاهری ممکن است به اشتباه به پیچیدگی‌های ساختاری نسبت داده شود.

منشأ اثرات جابه‌جایی ایستا می‌تواند دوبعدی و سه‌بعدی باشند؛ در حالت دوبعدی، تجمع سیمپسون و بار در مد TM اگر ضخامت توده بسیار کمتر از عمق پوست در میزبان و خود توده باشد، باعث تغییر مقاومت ظاهری با ضریب ثابتی می‌شود که به صورت یک تغییر عمودی در منحنی مقاومت‌ویژه ظاهری، ظاهر شود. مقاومت ظاهری TM به پهنا و موقعیت توده بستگی دارد، اما برای یک توده بسیار نازک اینجا به‌جایی را می‌توان پیش‌بینی کرد. برای مد TE جابه‌جایی بسیار کمتری انتظار داریم و اگر توده به اندازه کافی نازک باشد قاعدتاً هیچ جابه‌جایی رخ نمی‌دهد.

در برداشت‌های MT وجود ناهمگنی‌های سطحی که غالباً به صورت توده‌های محلی سه‌بعدی می‌باشند اثر نامطلوبی را در تفسیر ساختارهای ناحیه‌ای (بی‌هنجاری‌های عمیق) حاصل از برداشت دارند، که در سونداژهای MT اثر آن‌ها به صورت جابه‌جایی ایستای مقاومت‌ویژه بسته به مقاومت‌ویژه‌ی توده‌های محلی سه‌بعدی، به سمت بالا یا پایین است. از آن‌جایی که در تمامی فرکانس‌ها و مقاومت‌ویژه‌ها، اندازه‌ی عمق پوست از ابعاد ناهمگنی الکتریکی^۱ سطحی بزرگتر است، میدان الکتریکی در داخل توده‌ی رسانای سطحی، به‌طور یکنواخت کاهش می‌یابد. این کاهش در میدان الکتریکی، نمودار مقاومت‌ویژه‌ی محاسبه شده را در محل سونداژ نسبت به نمودار سونداژ کاهش می‌دهد. این اثر بر روی تمام فرکانس‌ها ثابت است و وقتی داده‌های سونداژ مقاومت‌ویژه^۲ را در مقیاس لگاریتمی کامل ترسیم کنیم منحنی مقاومت‌ویژه مستقل از

^۱Electrical heterogeneity

^۲Resistivity sounding

فرکانس، به سمت پایین جابه‌جا می‌شود و اگر مقاومت‌ویژه‌ی جسم نسبت به محیط اطراف بیشتر باشد منحنی به سمت بالا جابه‌جا می‌شود.

به‌طور کلی با دو نوع اعوجاج ایستا روبه‌رو هستیم. اثر S که توسط تغییر در رسانش لایه بالایی و اثر P توسط ناهمگنی‌های کوچک مقیاس زیر سطحی ایجاد می‌شود. مشخصه اثر P این است که جابه‌جایی در شاخه بالارونده (درکل محدوده فرکانسی) نیز وجود دارد. در پشت هر دو اثر ساز و کار فیزیکی یکسانی قرار دارد. ولی در فواصل متفاوت و در مقیاس‌های متفاوتی عمل می‌کنند. تنها با ملاحظه منحنی‌های ρ_a مشکل است اثر P را از S تفکیک کنیم. منحنی‌های فاز در این مورد شاخص‌های مفیدتری هستند.

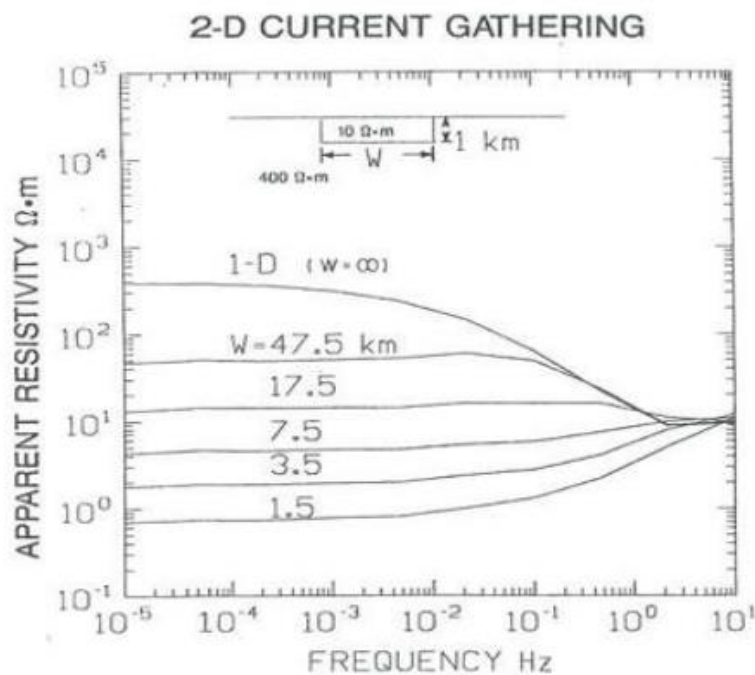
چنان‌چه اثر این آنومالی‌های محلی به‌گونه‌ای اصلاح و یا تعدیل نشود، تفسیر داده‌های MT برای اکتشاف ساختارهای اصلی ناحیه‌ای ممکن است منجر به نتایج گمراه‌کننده شود، از این رو لازم است اثر جابه‌جایی ایستا قبل از مدل‌سازی و تفسیر داده‌ها به‌گونه‌ای حذف و یا حداقل تعدیل شود.

۲-۱۴-۳ اثرات اعوجاج القائی، سوق یافتگی جریان

عملاً مشکلات ساختارهای سه‌بعدی از اثرات بی‌هنجاری‌های رسانای منفرد کوچک تا ساختارهای بزرگ مقیاس همچون خطوط ساحلی و رشته کوه‌ها متفاوت است، آن‌چه بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرد، درک آثار توده‌های سه‌بعدی نزدیک سطحی است؛ به دلیل جابه‌جایی قائمی که می‌تواند در منحنی‌های مقاومت ظاهری ایجاد کنند.

توانایی ما در تفسیر مناطق با ساختارهای سه‌بعدی خیلی کمتر از مناطق با ساختارهای دوبعدی پیشرفت داشته است، تفکیک مدهای TM و TE که کمک زیادی به ساده‌سازی موردهای دوبعدی می‌کرد در سه‌بعد قابل اعمال نیست، چرا که در این حالت صرف‌نظر از جهت جریان، در سطح تجمع بار وجود دارد، ضمناً میدان مغناطیسی قائم در غیاب شرایط گفته شده کوچک‌تر و در نتیجه کار برای تفسیر سخت‌تر است.

اثرات توده‌های سه‌بعدی روی میدان MT به سه دسته تقسیم می‌شوند: سوق یافتگی عمودی جریان، سوق یافتگی افقی جریان و القای محلی، سوق یافتگی جریان همچنین جریان کاناله نیز نامیده می‌شود. سوق یافتگی عمودی جریان در یک مدل دوبعدی و در مد TM نیز اتفاق می‌افتد. شکل (۲-۱۱) تأثیر عرض (تغییرات عرض) یک حجم دوبعدی را بر روی سطح یک نیم فضای همگن نشان می‌دهد، و می‌بینیم که با کوچک‌تر شدن عرض (یا نازک‌تر شدن) توده دوبعدی، در بسامدهای کم، مقاومت ظاهری به‌طور قابل توجهی کوچک‌تر می‌شود، در نتیجه می‌توان فهمید که چگونه رساناهای کوچک سطحی باعث تغییرات مهمی (جابه‌جایی ایستا) در مقاومت ظاهری می‌شوند. لازم به ذکر است که سوق یافتگی افقی جریان تنها می‌تواند در توده‌های سه‌بعدی رخ دهد [Nabighian, 1991].



شکل (۲-۱۱): اثر انحراف جریان عمودی روی مقاومت ویژه ظاهری برای E عمودی در یک مدل دوبعدی W. عرض توده رسانا است [Nabighian, 1991].

اثر اسلب^۱ سه بعدی مورد مطالعه قرار گرفت و نشان داده شد که اثرات میدان الکتریکی ناشی از سیمپسون و بارهای تولید شده بر روی لبه و بنابراین جابه جایی ایستا در فاصله های بسیار بزرگ نیز باقی می ماند .

در فرکانس های به قدر کافی پایین اثرات سوق یافتگی جریان مستقل از فرکانس می شوند؛ اما اثرات القاء محلی وابسته به فرکانس باقی می ماند و در نتیجه اساساً با تجمع جریان متفاوت هستند [Parker, 1981]

مطالعات نشان داده که میدان الکتریکی ثانویه درصد ثابتی از میدان اولیه است. بنابراین اثر سیمپسون و بارهای سطحی بر روی میدان الکتریکی (E) و در نتیجه بر روی ρ_a به صورت DC وجود دارد.

در سطحی که محیط لایه ای شامل یک توده سه بعدی است، داریم [Mackie and Rodi, 2001]:

$$E_h = [I + \tilde{P}]E_i, \quad H_h = [I + \tilde{Q}\tilde{Z}_l]H_i \quad (94-2)$$

که $\tilde{Z}_l$ امپدانس محیط لایه ای بدون حضور توده های سه بعدی، $\tilde{P}$ و $\tilde{Q}$ تانسورهای پراکنش، I ماتریس 2×2 واحد و اندیس های h و i مؤلفه های افقی و تابشی میدان ها را نشان می دهند و در این صورت:

$$\tilde{Z} = [I + \tilde{P}]\tilde{Z}_l[I + \tilde{Q}\tilde{Z}_l]^{-1} \quad (95-2)$$

که Z تانسور کامل امپدانس است و زمانی که توده سه بعدی نسبتاً رسانا و فرکانس به اندازه کافی کم باشد به طوریکه عمق پوست از توده سه بعدی بزرگ تر باشد در این حالت P و Q تبدیل به ثابت های حقیقی مستقل از فرکانس می شوند $\tilde{Q}\tilde{Z}_l$ و نیز $\tilde{Z}_l$ در فرکانس های یک به سمت صفر میل می کند، ناپدید می شود و در نتیجه معادله بالا به صورت زیر می شود:

$$\tilde{Z} = [I + \tilde{P}]\tilde{Z}_l \quad (96-2)$$

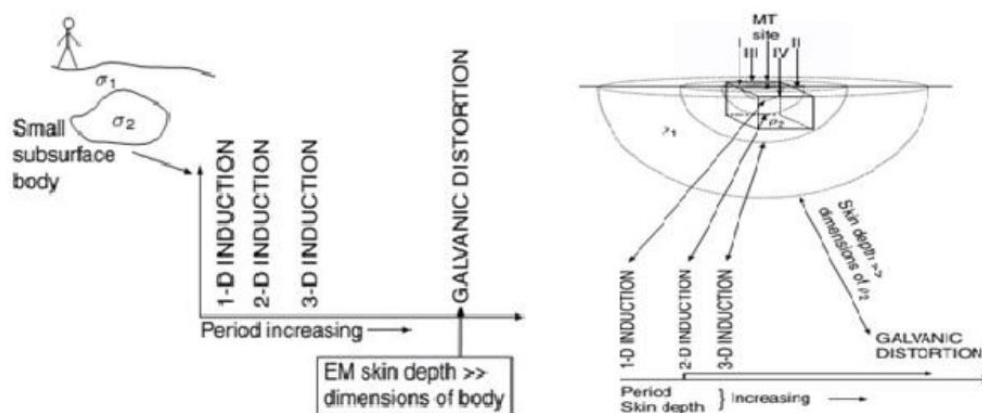
¹The effect of slabs

و بنابراین چهار مقاومت ظاهری^۱ به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{cases} \rho_{xx} = \rho_l P_{xy}^2 & , \quad \rho_{xy} = \rho_l (1 + P_{xx})^2 \\ \rho_{yx} = \rho_l (1 + P_{yy})^2 & , \quad \rho_{yy} = \rho_l P_{yx}^2 \end{cases} \quad (۹۷-۲)$$

ضرایب ρ_l (مقاومت ظاهری محیط لایه‌ای) همیشه مثبت‌اند، در نتیجه مقاومت ظاهری نیز مثبت است و بسته به علامت‌های P_{xx} و P_{yy} مقاومت‌های به دست آمده ρ_{xy} و ρ_{yx} می‌تواند بزرگ‌تر یا کوچک‌تر و یا برابر با ρ_l باشند.

هنگامی که عارضه سطحی دوبعدی و در جهت x است هیچ توزیع سیمپسون و باری در سطح ایجاد نمی‌شود و P_{xx} صفر است، سپس با وارون‌سازی یک‌بعدی از ρ_{xy} (E موازی با استرایک) نتیجه کمتر معوج شده‌ای نسبت به مؤلفه ρ_{yx} (E عمود بر استرایک) را حداقل در فرکانس‌های پایین به دست می‌آوریم.



شکل (۱۲-۲): ابعاد یک توده با مقاومت ویژه ρ_2 (σ_2) در پریرودها و عمق نفوذهای مختلف [Simpson et al., 2005].

شکل (۱۲-۲) مقیاس وابستگی به ابعاد را نشان می‌دهد. یک توده سه‌بعدی با رسانایی σ_2 در یک نیم‌فضایی با رسانایی σ_1 واقع شده است. در پریرودهای به قدر کافی کوتاه که عمق پوست در مقایسه با

^۱Apparent Resistivity

کوچک‌ترین بعد توده سه‌بعدی کوچک‌تر است، پاسخ‌های القایی سونداژ MT را به‌صورت یک‌بعدی دریافت می‌کنیم. در صورتی که پریود سونداژ افزایش یابد به طوری که حداقل یکی صفحات ناهنجاری را در برگیرد توابع پاسخ القایی MT به سمت پاسخ‌های دوبعدی می‌روند. اگر به همین صورت باز پریود افزایش یابد به طوری که اثر همه صفحات ناهنجاری را بگیریم در نتیجه توابع پاسخ به صورت سه‌بعدی ظاهر می‌شوند. برای پریودهای به اندازه کافی بلند که عمق پوست امواج الکترومغناطیسی خیلی بزرگ‌تر از ابعاد ناهنجاری است پاسخ القایی ناشی از ناهنجاری خیلی ضعیف می‌شود و پاسخ گالوانی آن که مستقل از فرکانس است باقی می‌ماند.

۲-۱۴-۴ اثرات توپوگرافی

اثرات توده‌های سه‌بعدی از طریق معادله (۲-۹۷) قابل پیش‌بینی است. به این معنی که اگر فرکانس به اندازه کافی کوچک باشد P مقداری ثابت و حقیقی است. به‌طور مستقیم بزرگی اثرات استاتیکی حاصل از توده‌های سه‌بعدی کوچک‌تر از اثرات ایستا توده‌های دوبعدی با سطح مقطع یکسان است چرا که جریان می‌تواند توده سه‌بعدی را دور بزند.

عوارض توپوگرافی باعث شارش جریان‌ها در الگوهای متفاوت نسبت به سطح هموار می‌شوند. ب‌نابراین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در سطح و در نتیجه امپدانس را متأثر خواهند کرد.

در حالت دوبعدی تفاوت آشکاری بین مدهای TM و TE وجود دارد، اثرات TM بیشتر به‌صورت اثرات گالوانی، وابسته به شیب با وابستگی کم به فرکانس ظاهر می‌شوند؛ در مقایسه با اثرات TE که رفتاری القایی دارند و به‌طور کلی کوچک‌تر و هموارتر هستند و به‌طور کلی در وضعیت‌های سه‌بعدی، مشخص شده که در هر قطبشی اثرات گالوانی وجود دارد، اگرچه اثرات آن‌ها از نظر بزرگی از حالت دوبعدی کوچک‌تر است. اثرات القایی به دلیل محدود بودن ابعاد رسانا، کوچک خواهد بود.

۲-۱۴-۵ ناهمسانگردی

در ساختارهای ناهمسانگرد در صورتی که میدان الکتریکی در جهتهای مختلفی اعمال شود، مقاومت یا رساناییهای مختلفی را در جهتهای مختلف اندازه گیری می کنیم، به عنوان مثال اگر میدان الکتریکی در راستای طول ساختار اعمال شود یک مقدار مشخص از چگالی جریان و رسانایی را نتیجه می دهد ($\sigma = j/E$) در صورتی که اگر میدان الکتریکی در راستای عمود بر ساختار اعمال شود مقدار دیگری از σ و چگالی جریان را به ما می دهد و اگر میدان در جهتی اعمال شود که نه موازی و نه عمود بر ساختار باشد چگالی جریان مؤلفه هایی در هر دو جهت که موازی با میدان نخواهد بود، دارد.

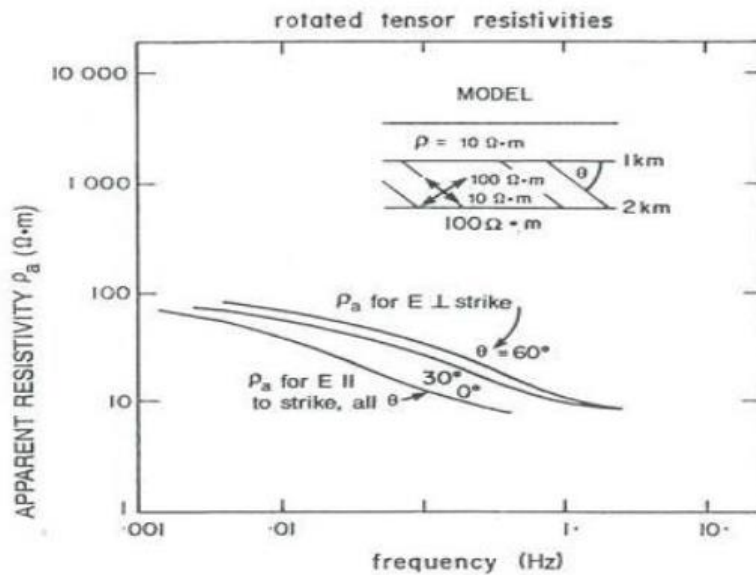
تا حدودی تمام سنگ ها ناهمسانگرد می باشند، به طوری که ناهمسانگردی را به خوبی در گمانه چاه ها می توان دید، پس در سه بعد داریم:

$$j = \sigma E \quad , \quad \begin{pmatrix} j_x \\ j_y \\ j_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{pmatrix} \quad (2-98)$$

اگر به طور مثال میدان الکتریکی در یک جهت از محیط ناهمسانگرد اعمال شود مثلاً $E=E_x$ و $H=H_y$ در هر سه جهت چگالی جریان داریم $j_x = \sigma_{xx} E_x$ ، $j_y = \sigma_{xy} E_x$ ، $j_z = \sigma_{xz} E_x$ و از آن جا که فرض کردیم موج تخت^۱ برخوردی، میدان مغناطیسی در جهت y دارد، چگالی جریان عمود بر H نیست.

با توجه به شکل (۲-۱۳) نتیجه می گیریم که در یک محیط ناهمسانگرد مقاومت ظاهری وابسته به جهت اندازه گیری است.

¹Plane wave



شکل (۲-۱۳): اثر مقاومت ویژه ظاهری ناهمسانگرد لایه دوم در یک مدل سه بعدی [Vozoff, 1997].

۲-۱۵ روش اجرای پیمایش

دو مؤلفه‌ی افقی میدان الکتریکی، E_x و E_y با استفاده از دو دایپل الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود که هر کدام بیش از ۱۰۰۰ متر در طول هستند؛ گرچه چند ده تایی از متر معمول تر است. الکترودهای^۱ غیر قطبی استفاده می‌شود. دو یا احتمالاً سه مؤلفه‌ی میدان مغناطیسی یعنی مؤلفه‌های افقی H_x و H_y و مؤلفه‌ی عمود H_z با کویل‌ها^۲ یا برای اندازه‌گیری‌های فرکانس پایین‌تر با مگنتومترها اندازه‌گیری می‌شود. در

^۱Electrode

^۲Coyle

روش AMT و MT فرستنده‌ی طبیعی به‌طور موثر در فاصله‌ای نامحدود از منطقه‌ی پیمایش واقع شده است. موج الکترومغناطیسی در منطقه‌ی پیمایش وجود دارد بنابراین یک موج تخت یعنی خطوط میدان مستقیم و موازی با یکدیگر هستند برخلاف میدان خمیده که نزدیک‌تر به منبع پیدا می‌شود (مربوط به روش‌های EM دیگر روش‌های الکتریکی مرسوم). این روش ریاضیات محاسبه‌ی مقاومت زیرسطح و تفسیر داده‌های پیمایش را ساده‌سازی می‌کند. سری‌های زمانی^۱ تغییرات میدان E و H ضبط می‌شوند. فرکانس‌های پایین‌تر یعنی عمق بیشتر ارزیابی، زمان ضبط طولانی‌تری نیاز دارد. برای پیمایش‌های AMT ضبط از ده‌ها دقیقه تا چندین ساعت می‌باشد. اندازه‌گیری‌های MT نوعاً دوره‌ی ثبتي چند روزه به‌منظور تشخیص تا اعماق گوشته نیاز دارد و ممکن است برای هفته‌ها یا حتی ماه‌ها برای مطالعات اعماق بیشتر ادامه یابد. اندازه‌گیری‌های MT بر روی مقیاس محلی با اندازه‌گیری‌هایی که به‌طور تخمینی شبکه یا مسیر منظم را شکل می‌دهد؛ به دسترس بودن موقعیت وابسته است. اندازه‌گیری‌های AMT در اندازه‌گیری‌های کوچک مقیاس‌تر ایجاد می‌شود و معمولاً شامل اندازه‌گیری‌هایی است که در فواصل منظم در طول پیمایش در فضا چندین برابر فواصل ایستگاه گردش می‌کند.

۲-۱۶ رزولوشن (تفکیک پذیری)^۲

رزولوشن عمودی معمولاً در حدود ۵ تا ۲۰ درصد عمق تشخیص است که به پیچیدگی تغییرات الکتریکی زیرسطحی و به سطوح نوفه‌ی محلی وابسته است. رزولوشن جانبی با طول دوقطبی گیرنده میدان E کنترل

¹time series

²Resolution

می‌شود که به‌طور تخمینی رزولوشن برابر با طول دوقطبی است. گرچه دامنه‌ی سیگنال اندازه‌گیری شده به طول دوقطبی وابسته است؛ بنابراین طول واقعی بده بستانی بین رزولوشن ماکزیمم حاصل شده و حفظ کردن اندازه‌گیری نسبت سیگنال به نوفه است. رزولوشن جانبی در عمق به سائز آرایه و فرکانس وابسته است. با کاهش رزولوشن، فرکانس کاهش می‌یابد (طول موج افزایش می‌یابد).

۲-۱۷ روش‌های MT در برابر دیگر روش‌های الکتریکی و EM

CSAMT نسبت به روش‌های قطبش القایی و روش‌های مقاومت‌ویژه‌ی مرسوم مزایای منحصر به‌فردی دارد. پارامترهای اندازه‌گیری شده از تأثیرات هندسی الکترودها (ویژگی شبه‌مقاطع آرایه‌های مختلف الکترودی) آزاد هستند. چون که گیرنده در CSAMT تنها زمینی را نمونه‌برداری می‌کند که نزدیک آن فرستنده‌های دور مستقل هستند. در مقایسه با دیگر روش‌های EM، CSAMT به‌طور قابل توجهی می‌تواند از طریق اندازه‌گیری‌های میدان الکتریکی، مقاومت‌ویژه را درست مانند مناطق رسانا که پاسخ‌های EM تنها به عوارض رسانا مرتبط است؛ متمایز کند. CSAMT به تباین مقاومت نسبت به رساناهای مجزایی که به انواع دیگر پیمایش EM به‌خوبی پاسخ می‌دهد؛ به بهترین شکل ممکن پاسخ می‌دهد. CSAMT موقع پیمایش شبکه‌های محلی به‌طور لجستیکی ساده‌تر است اما در پیمایش اکتشاف در منطقه‌ی گسترده، نیاز برای حرکت دوقطبی فرستنده فاصله دور، آن را ناکافی می‌کند. CSAMT نسبت به دیگر روش‌های الکتریکی گالوانیکی و EM مؤثرتر است وقتی که نواحی کوچک در زمین‌های تپه ماهور و مناطق با پوشش متراکم پیمایش می‌شوند زمانی که نیازی برای حرکت حلقه‌های فرستنده و دوقطبی‌ها، وجود نداشته باشد. از طرف دیگر، در مناطق صاف باز، روش‌های مقاومت‌ویژه گالوانیک و EM سریع‌تر هستند و می‌توانند قدرت تفکیک یا رزولوشن بالاتری را تولید کنند.

مزیت اصلی روش‌های MT/AMT عمق نفوذ بیشترشان در مقایسه با روش‌های فعال EM است. استفاده‌ی تنها از گیرنده‌ها به این منظور است که عملیات‌ها نسبتاً ارزان هستند؛ گرچه رزولوشن کمتری را نسبت به روش‌های EM و مقاومت فعال پیشنهاد می‌دهند [Alumbaugh et al., 1996].

فصل سوم

برنامه مدل سازی

ModEm

۳-۱ مقدمه

فرمول‌سازی مجزایی برای مسایل وارون خطی الکترومغناطیسی در حوزه‌ی فرکانس وجود دارد که محدوده‌ای از روش‌های وارون‌سازی و تکنیک‌های ژئوفیزیکی EM در یک چهارچوب نشانه‌گذاری یک‌پارچه را دربرمی‌گیرند. این چهارچوب اجزا و وابستگی بین اجزا را مشخص می‌کند؛ که در میان کاربردها و الگوریتم‌های وارون‌سازی، مشترک هستند و پایه‌ای برای یک سیستم مدولار کلی کدهای کامپیوتری برای مسائل وارون‌سازی ژئوفیزیکی EM را فراهم می‌کند. تلاش‌های اخیر در مورد وارون‌سازی، توسعه‌ی چهارچوب‌های وارون‌سازی منعطف‌تری را منجر شده است که باعث می‌شود یک الگوریتم وارون‌سازی به تنهایی بر روی طیفی از انواع داده‌ها پیاده‌سازی شود [Egbert and Kelbert, 2012].

۳-۲ نظریه و نمادها

اصول کلی محاسبات ماتریس حساسیت گسسته برای مسائل معکوس‌سازی الکترومغناطیس غیرخطی در ژئوفیزیک بحث شده است [Newman and Hoversten, 2000].

جدول (۱-۳): فهرست علائم از [Egbert , kelbert 2012]. در این جا M به فضای مدل، D به فضای داده و SP به فضای میدان های EM که بر روی مش های اولیه و دوگانه همان طور که توسط Egbert and kelbert 2012 تعریف شده، اشاره می کند.

Symbol	Represents
$\mathbf{m}, \mathbf{m}_0 \in \mathcal{M}$	Model parameter vectors
$\pi(\mathbf{m}) : \mathcal{M} \mapsto \mathcal{S}_{P,D}$	Mapping from model parameter to primary or dual grid
$\Pi_{\mathbf{m}_0} : \mathcal{M} \mapsto \mathcal{S}_{P,D}$	$\partial\pi/\partial\mathbf{m}$, evaluated at $\mathbf{m}_0$
$\mathbf{C}_m : \mathcal{M} \mapsto \mathcal{M}$	Model covariance
$\mathbf{e}, \mathbf{e}_0 \in \mathcal{S}_P$	Solution vectors on the primary grid
$\mathbf{d} \in \mathcal{D}$	Data vector
$\psi_j(\mathbf{e}(\mathbf{m}), \mathbf{m}) : \mathcal{S}_P \mapsto \mathbb{C}$	j 'th data functional, in general non-linear
$\mathbf{l}_j \in \mathcal{S}_P$	$\partial\psi_j/\partial\mathbf{e}$, evaluated at $\mathbf{e}_0, \mathbf{m}_0$; j 'th row of $\mathbf{L}$
$\mathbf{q}_j \in \mathcal{M}$	$\partial\psi_j/\partial\mathbf{m}$, evaluated at $\mathbf{e}_0, \mathbf{m}_0$; j 'th row of $\mathbf{Q}$
$\mathbf{L} : \mathcal{S}_P \mapsto \mathcal{D}$	Sparse matrix constructed from $\mathbf{l}_j$
$\mathbf{Q} : \mathcal{M} \mapsto \mathcal{D}$	Sparse matrix constructed from $\mathbf{q}_j$
$\mathbf{S}_m^{-1} : \mathcal{S}_P \mapsto \mathcal{S}_P$	Forward solver; $\mathbf{S}_m \mathbf{e} = \mathbf{b}$
$\mathbf{P} : \mathcal{M} \mapsto \mathcal{S}_P$	Operator $-\partial(\mathbf{S}_m \mathbf{e}_0)/\partial\mathbf{m}$, evaluated at $\mathbf{m}_0$
$\mathbf{J} : \mathcal{M} \mapsto \mathcal{D}$	Full Jacobian $\partial\psi/\partial\mathbf{m}$; $\mathbf{J} = \mathbf{L}\mathbf{S}_{m_0}^{-1}\mathbf{P} + \mathbf{Q}$
$\mathbf{T} : \mathcal{S}_P \mapsto \mathcal{S}_D$	Linear mapping from the primary to dual grid
$\tilde{\mathbf{T}}_{\pi(\mathbf{m}_0), \mathbf{e}_0} : \mathcal{S}_{P,D} \mapsto \mathcal{S}_D$	$\partial(\mathbf{T}_{\pi(\mathbf{m})}\mathbf{e}_0)/\partial\pi$, evaluated at $\pi(\mathbf{m}_0)$
$\lambda^P \in \mathcal{S}_P$	Primary grid interpolation coefficients (sparse)
$\lambda^D \in \mathcal{S}_D$	Dual grid interpolation coefficients (sparse)

در کل این مبحث، از علامت گذاری EK12 استفاده می شود، که در جدول (۱-۴) خلاصه شده است. به طور کامل در این جا نکات کلیدی خلاصه شده اند. ModEm چارچوبی کلی برای حل مسائل منظم وارون الکترومغناطیس فراهم می کند؛ یعنی، مینیمم سازی یک تابع جریمه که به صورت زیر است؛ مدل رسانندگی زمین را بازیابی می کند و یک انطباق کافی با بردار داده $\mathbf{d}$ فراهم می کند.

$$\phi(\mathbf{m}, \mathbf{d}) = (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_d^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})) + \mathbf{v}(\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)^T \mathbf{C}_m^{-1} (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0) \quad (1-3)$$

در معادله (۱-۳)، C_d کوواریانس^۱ خطاهای داده است، $f(m)$ نگاشت پیشرو^۲ را تعریف می‌کند، m_0 پارامتر مدل اولین تخمین یا تخمین پیشین است، v یک پارامتر تنظیم است و C_m (یا به‌طور دقیق‌تر $v^{-1}C_m$)^۱ کوواریانس مدل یا جمله‌ی تنظیم را تعریف می‌کند.

نگاشت پیشرو نیازمند حل معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی (PDE) در حوزه فرکانس^۳ EM است، که در شکل گسسته به‌طور کلی به‌صورت زیر نوشته شده است:

$$S_m e = b \quad (۲-۳)$$

در این‌جا زیرنویس m علامت وابستگی عملگر PDE بر روی یک پارامتر خاص مدل است و در ادامه اغلب حذف شده است؛ e نشان دهنده حل گسسته میدان EM است؛ و b اعمال کننده است (شرایط مرزی و/یا شرایط چشمه). به‌طور معمول e فقط میدان اولیه را نشان خواهد داد (به‌عنوان مثال، الکتریک) که در واقع حل شده برای؛ میدان‌های دوگانه دیگر (به‌عنوان مثال مغناطیس) و سپس از طریق یک عملگر تبدیل ساده $h=Te$ محاسبه شده است. مشاهدات شبیه سازی شده از حل e (و احتمالاً m) محاسبه می‌شوند از طریق؛

$$d_j = f_j(m) = \psi_j(e(m), m) \quad (۳-۳)$$

با استفاده از قاعده زنجیره‌ای، یک عبارت کلی برای ژاکوبین (یا ماتریس حساسیت) J می‌توان معین کرد، که در شکل برداری، به‌صورت زیر است:

$$\left. \frac{\partial f_j}{\partial m} \right|_{m=m_0} = \left[\left. \frac{\partial \psi_j}{\partial e} \right|_{e=e_0, m=m_0} \right] \left. \frac{\partial e}{\partial m} \right|_{m=m_0} + \left. \frac{\partial \psi_j}{\partial m} \right|_{m=m_0} \quad (۴-۳)$$

که در آن e_0 راه حلی در واسطه‌ی (۲-۳) برای پارامتر مدل m_0 است. یک محاسبه ساده نشان می‌دهد:

¹ Covariance

²Forward Mapping

³Frequency domain

$$\left. \frac{\partial e}{\partial m} \right|_{m=m_0} = -S_{m_0}^{-1} \left[\frac{\partial}{\partial m} (S_m e_0) \right]_{m=m_0} = S_{m_0}^{-1} P \quad (5-3)$$

بنابراین، در نماد ماتریس ژاکوبین می‌توان بیان شود مانند:

$$J = LS_{m_0}^{-1} P + Q \quad (6-3)$$

ماتریس P به جزئیات پیاده‌سازی مدل عددی و پارامترسازی رسانندگی بستگی دارد. یک فرمول صریح و روشن برای P می‌تواند ارائه شود، با فرض عملگر پیشرو که به صورت زیر نوشته شده است:

$$S_m e \equiv S_0 e + U(\pi(m)_o V e) \quad (7-3)$$

که در آن S_0 ، U و V برخی از عملگرهای خطی هستند که به بردار پارامتر مدل m بستگی ندارد، $\pi(m)$ یک نگاشت (احتمالا غیرخطی) از فضای پارامتر مدل به شبکه‌بندی عددی است، و (o) نشان دهنده ضرب مؤلفه‌های برداری است. پس داریم:

$$P = -U \text{diag}(V e_0) \Pi_{m_0} \quad (8-3)$$

که در آن Π_{m_0} ژاکوبین نگاشت پارامتر مدل است و $\pi(m)$ پارامتر مدل زمینه (m_0) را ارزیابی می‌کند. همه فرم‌های معمول برای عملگرهای القایی EM دوبعدی و سه‌بعدی می‌تواند مانند معادله (7-3) بیان شود؛ به عنوان مثال، برای معادله تفاضل محدود مرتبه دوم شبکه‌بندی شطرنجی^۱ برای میدان الکتریکی (با شرط منبع احتمالی J_s) داریم:

$$\nabla \times \nabla \times E + i\omega\mu\sigma E = j_s \quad (9-3)$$

S_0 مربوط به عملگر کرل-کرل گسسته می‌باشد، $V \equiv IU \equiv i\omega\mu I$ ، و $\sigma \equiv \pi(m)$ یک نگاشت از فضای پارامتر مدل به لبه‌های سلول است، که در آن اجزاء میدان الکتریکی تعریف می‌شوند.

ماتریس L در معادله (6-3) تابعی‌های داده خطی شده را نشان می‌دهد. این می‌تواند به دو ماتریس جدا به صورت $L = A^T \Lambda^T$ تجزیه شود؛ جایی که ستون‌های Λ بردارهای تنک هستند که نشان دهنده تابعی‌های

¹staggered-grid

ارزیابی برای نقطه‌های مشاهده‌ای از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی است. عملگر T به‌طور کلی در ارزیابی اجزای میدان دوگانه درگیر می‌شود. ماتریس A به جزئیات (به‌طور کلی غیرخطی) تابعی‌های قابل مشاهده (به‌عنوان مثال امپدانس، مقاومت ظاهری) بستگی دارد، که ممکن است اندازه‌گیری مغناطیسی و الکتریکی از یک یا چند مکان ترکیب شود. به‌طور واضح‌تر، هر سطر از L به‌صورت زیر است:

$$(I_j)^T = \left(\frac{\partial \psi_j}{\partial e} \Big|_{e_0, m_0} \right)^T = \sum_{k=1}^{k_p} a_{jk}^p \lambda_k^p + \sum_{k=1}^{k_D} a_{jk}^D [T^T \lambda_k^D] \quad (10-3)$$

که λ_k^p و λ_k^D بردارهای تنک هستند که در شبکه‌های اولیه و دوگانه تعریف شده است، و I_j بردار تنک شبکه اولیه است. زمانی که تابعی‌های ارزیابی یا عملگر تغییر میدان (T) یک وابستگی صریح و روشن به پارامتر مدل دارد یک جمله‌ی اضافی در ماتریس حساسیت وجود دارد، که با Q در معادله (۳-۶) نشان داده می‌شود. سطرهای این ماتریس با سیستم نشانه‌گذاری جدول ۳-۱ می‌تواند با استفاده از عبارت زیر به‌طور موثر محاسبه شوند:

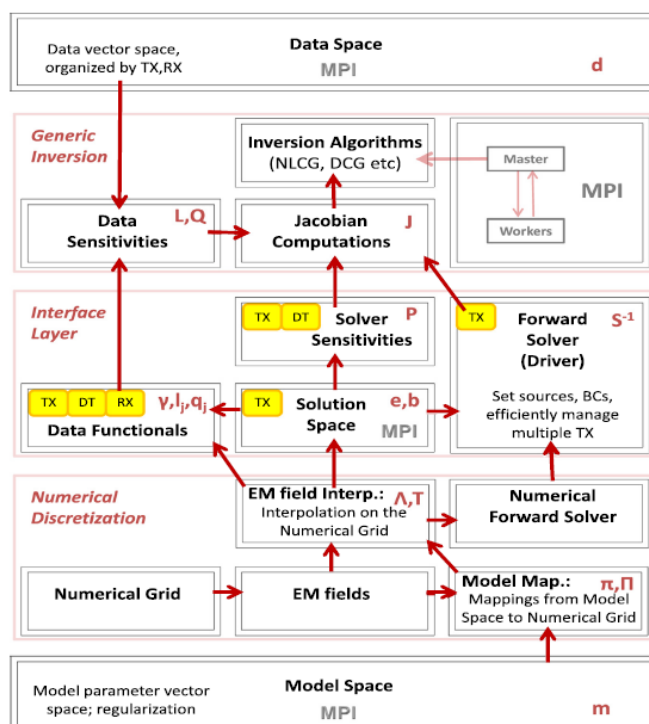
$$(q_j)^T = \left(\frac{\partial \psi_j}{\partial m} \Big|_{e_0, m_0} \right)^T = \Pi_{m_0}^T \left[\sum_{k=1}^{k_D} a_{jk}^D T_{\pi(m_0), e_0}^T \lambda_k^D \right] \quad (11-3)$$

توجه داشته باشید که عبارت داخل براکت در (۱۱-۳) نیز یک بردار تنک در شبکه‌بندی‌های اولیه و یا دوگانه است، بسته به جایی که $\pi(m)$ هدایت الکتریکی (یا مقاومت) تعریف می‌شود. ژاکوبین نشان دهنده یک نگاشت خطی است، آشفتگی در داده از آشفتگی در پارامتر مدل نتیجه می‌شود ($\delta d = J \delta m$). طیف گسترده‌ای از الگوریتم‌های وارون‌سازی مبتنی بر گرادیان همراه با ترانهاده و یا الحاقی ($J^T \delta d = \delta m$) از این عملگر استفاده می‌کنند. ModEm لزوماً (و یا حتی نوعاً) ژاکوبین یا ماتریس‌های مولفه در معادله (۳-۶)، را شکل نمی‌دهد، اما ترجیحاً حل‌کننده برای سیستم گسسته S_m^{-1} ، عملگرهای P ، L ، Q و عملگر ژاکوبین ترکیب J همراه با الحاقی‌ها پیاده‌سازی می‌شود. این عملگرها، همراه با کوواریانس مدل و داده، برای پیاده‌سازی طیف وسیعی از الگوریتم‌های وارون‌سازی مبتنی بر گرادیان استفاده می‌شوند. در اکثر مسائل

وارون‌سازی الکترومغناطیسی ساختار قابل توجهی در بردار داده وجود دارد، که توسط تعدد فرستنده‌ها و گیرنده‌ها به کار برده شده است. این ساختار نیز در ژاکوبین و مؤلفه ماتریس‌ها، و در نتیجه در تشکیلات ModEm منعکس شده است.

۳-۳ ساختار تشکیلاتی برنامه‌ی ModEm

تشکیلات ModEm در شکل (۱-۳) خلاصه شده است، که در آن سه سطح کلی متمایز شده است. در بالاترین قسمت اجزای عمومی هستند که الگوریتم‌های وارون‌سازی موازی و محاسبات ماتریس حساسیت را پیاده‌سازی می‌کنند که می‌تواند در طیف گسترده‌ای از مسائل وارون‌سازی EM به کار برده شود.



شکل (۱-۳): نمایش نموداری از ModEm. طرح مفهومی که در بخش‌های مجزای عددی توضیح داده شده، توسط جعبه-هایی که ارتباطشان توسط فلش نمایش داده شده است، مشخص گردیده است.

برخی از جعبه‌ها با نشانه‌هایی برای نمایش بردارها و عملگرها از [Egbert, kelbert 2012] که آن‌ها پیاده‌سازی کردند مشخص شده است (به جدول (۳-۱) نگاه کنید). جعبه‌های کوچک سایه‌دار مشخص می‌کند که کدام دیگشنری در هر ماژول استفاده شده است. ماژول واسط ارسال پیام (اختیاری) MPI که برای پیاده‌سازی موازی استفاده شده است در رنگ-های روشن‌تر مشخص شده است. ماژول MPI به زیرروال‌هایی اضافی برای انتقال انواع داده‌های مشتق شده که در ماژول‌ها بین پردازنده‌ها تعریف شده است نیاز دارد [Kelbert et al., 2014].

در پایین‌ترین سطح مؤلفه‌هایی هستند که روش حل عددی و گسسته اساسی استفاده شده برای مسائل پیشرو را تعریف می‌کنند. این روال ممکن است برای انواع مسائل حوزه فرکانس EM، با تغییر تنظیمات منبع و گیرنده استفاده شود. لایه میانی یک واسط که جزئیات خاصی از اجرای عددی ماژول‌های وارونگی کلی را پنهان می‌کند، فراهم می‌سازد و جزئیات خاص مسئله (به عنوان مثال تنظیمات منبع و گیرنده) را تعیین می‌کند. در این بخش، خواننده از طریق تشکیلات کلی کد ModEm هدایت می‌شود، و بحث در مورد سطح اول است، که هسته اصلی ModEm است. لایه واسط بیشتر در بخش (۳-۵)، و لایه گسسته عددی در بخش (۳-۶) بحث خواهند شد.

همان‌طور که در بخش (۳-۲) خلاصه شده است، موضوع داده‌های اولیه هستند که در هر روش وارون شامل بردارهای مدل (m) و بردارهای داده (d)، و راه حل EM و میدان‌های منبع (e و b) می‌باشند. برای هر هدفی، باید یک سری روش‌های استاندارد (ایجاد، تخریب، روش‌های فضای برداری، ضرب نقطه‌ای و ...) با واسط‌های استاندارد شده، تعریف کرد. پارامتر مدل m بیشتر به‌طور مستقیم با سطح گسسته عددی تعامل دارد، و در بخش (۳-۶) بیشتر بحث خواهد شد. ماتریس حل‌کننده‌ی الکترومغناطیسی (e) و موضوعات میدان چشمه (b) موضوعات خاص کاربردی هستند، و پیاده‌سازی واقعی این طبقه‌های انتزاعی که در لایه واسط تعریف شده است، در بخش (۳-۵) بحث خواهد شد. توجه داشته باشید که از بردار تنک برای مؤلفه‌های فضای جواب EM استفاده گسترده‌ای شده است تا منجر به ارائه کارآمدی از توابع مشاهده‌ای شود.

برخلاف دیگر اهداف داده‌ی اولیه، بردارهای داده d که با یک ساختار ثابت پیاده‌سازی شده‌است توسط سطح بالای وارون‌سازی و روال‌های ماتریس حساسیت قابل دسترسی است و به شدت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این کار برای عملکرد موثر مجموعه داده‌های چند فرستنده/چند گیرنده که در روش‌های EM مرسوم هستند؛ انجام می‌شود. به‌عنوان مثال، برای MT سه‌بعدی فرکانس‌های چندگانه وجود دارد که هر یک نیاز به راه حل‌های پیشرو مجزایی دارند. برای هر فرکانس سایت‌های دوگانه وجود خواهد داشت، و در هر یک از سایت‌ها ۸ مؤلفه حقیقی در تانسور امپدانس وجود دارد، که به حل‌هایی برای دو قطبش مستقل منبع برای ارزیابی آن‌ها نیاز می‌باشد. مسائل منبع کنترل شده یک تعداد چشمه و گیرنده دارد، که ممکن است به روش‌های مختلف تعامل کند. بردارهای داده توسط سه نشانگر یعنی فرستنده، نوع داده‌ها و گیرنده سازماندهی می‌شوند. نشانگر فرستنده به‌طور یکتایی مسئله پیشرو را تعیین می‌کند که باید حل شود و شامل دو معادله است؛ یکی معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی خاص (به‌طور کلی این به فرکانس وابسته خواهد بود) و معادله‌ی چشمه و شرایط مرزی است که باید حل شود. نشانگر گیرنده که مرتبط با نوع داده است؛ برای تعیین فرایند اندازه‌گیری باید روی مسئله‌ی پیشرو پیاده‌سازی شود که منجر به مقایسه‌ی بین داده‌ی اندازه‌گیری شده و پیش بینی‌شده می‌شود. این عوامل برای تعیین بردار داده کامل d استفاده می‌شود، که در خشن‌ترین سطح، شامل آرایه‌ای از ساختارهای مرتبط با فرستنده‌های مختلف TX می‌باشد. هر کدام از این‌ها به نوبه خود شامل یک یا چند زیرساخت برای انواع مختلف داده DT هستند، که تمام مؤلفه‌ها برای تمام گیرنده‌ها برای جفت TX / DT ذخیره می‌شوند.

سه نشانگر (فرستنده، نوع داده و گیرنده) TX، DT و RX به‌طور خلاصه در سطح وارون‌سازی و مازول-های ماتریس حساسیت عمل می‌کنند که به آن‌ها دیکشنری می‌گوییم. دیکشنری فرستنده (TX) یک ورودی برای هر مسئله پیشرو منحصر به فرد دارد، اطلاعاتی مانند فرکانس یا هندسه چشمه که برای راه-اندازی و حل مسئله پیشرو مورد نیاز است، فراهم می‌کند. ورودی‌ها در دیکشنری نوع داده (DT) انواع

تابعی‌های داده را مشخص می‌کنند که در وارون‌سازی شامل می‌شوند؛ مانند امیدانس، تابع انتقال میدان عمودی، تانسور فاز و مقاومت ویژه ظاهری. دیکشنری گیرنده (RX) اطلاعاتی در مورد مکان‌های سایت، و در صورت درست بودن، اطلاعاتی در مورد جهت‌گیری/پیکربندی سیستم مشاهده‌ای را فراهم می‌کند. دیکشنری تنها با مازول‌های سطح واسط به کار می‌رود (استفاده از آن‌ها با جعبه در گوشه‌ی شکل (۳-۱) مشخص شده است). مؤلفه‌های برچسب‌دار d با این نشانگرهای عمومی اطلاعات کافی در مورد ساختار فرستنده/گیرنده فراهم می‌کند به‌طوری که مدل‌سازی پیشرو و محاسبات ماتریس حساسیت می‌تواند به‌طور موثری سازمان‌دهی شود. به‌عنوان مثال، نشانگر فرستنده می‌تواند برای اطمینان از این به کار رود که هر مسئله پیشرو مورد نیاز یک بار (و تنها یک بار) حل شده است، و سپس در محاسبه داده‌های پیش‌بینی شده (یا پیاده‌سازی مناسب محاسبات ماتریس حساسیت) برای تمام گیرنده‌های لازم و انواع داده استفاده شده است.

یک قابلیت کلیدی ModEm توانایی پیاده‌سازی آسان هر روش وارون‌سازی خطی شده است که می‌تواند به‌وسیله‌ی اهداف داده‌ی اصلی e, dm و b همراه با نگاشت پیشرو $f(m)$ ، ژاکوبین J ، و کوواریانس داده‌ها C_d و مدل C_m بیان شود. از دیدگاه الگوریتم‌های وارون‌سازی تنها چند عملیات ساده برای عملگرهای کوواریانس نیاز به پیاده‌سازی داشته است: ضرب موارد پارامتر مدل توسط $C_m, C_m^{1/2}$ و شاید $C_m^{-1/2}$ ، و ضرب موارد بردار داده توسط $C_d^{1/2}$ و $C_d^{-1/2}$. واسط‌ها برای این عملگرهای کوواریانس متقارن، ساده هستند، با هر دو ورودی‌ها و خروجی‌ها پارامترهای مدل یا بردارهای داده، مناسب بودند. تاکنون تنها کوواریانس خطای داده قطری درون کلاس بردار داده پیاده‌سازی شده است. کوواریانس مدل، که به‌طور کلی پیچیده‌تر است؛ در واسطه با کلاس پارامتر مدل در زیر بیشتر مورد بحث قرار گرفته است. پیاده‌سازی کلی روال‌های سطح بالا برای عملگرهای پیشرو و ژاکوبین در مازول ماتریس حساسیت انجام شده است. در ادامه قراردادهایی در جدول (۳-۲) داده شده است.

با استفاده از این مؤلفه‌ها تاکنون چندین الگوریتم وارون‌سازی از جمله گرادیان مزدوج غیر خطی (NLCG برای مثال [Rodi and Mackie, 2001])؛ گرادیان مزدوج فضای داده (DCG برای مثال [Siripunvaraporn and Egbert, 2007]) و چند فرستنده روش ترکیبی CG-Occam پیاده‌سازی شده است [Egbert, 2012].

روال‌های ژاکوبین، با استفاده از تجزیه کلی (۳-۶) (و یا ترانهاده آن) برای اجرای ضرب توسط J (یا J^T)، با استفاده از حل کننده برای سیستم گسسته S_m^{-1} و عملگرهای P , L , Q (و یا الحاقی آن‌ها) بیشتر مدوله می‌شوند. برای بهره‌وری، و ساده‌تر کردن موازی‌سازی، این محاسبات توسط فرستنده سازمان‌دهی می‌شود. بنابراین، روال کلی در ماژول حساسیت (جدول (۳-۲) را نگاه کنید) پیاده‌سازی ضرب L و Q برای تک فرستنده است. هر سطر از این عملگرها (I_j و q_j در جدول (۲-۱)) مربوط به تنها یک نوع داده/گیرنده است و مشتق یک تابعی منفرد ψ_j (به‌طور کلی غیرخطی و چند مؤلفه‌ای) با توجه به حل $EMe(I_j)$ ، و در صورت لزوم، پارامتر مدل $m(q_j)$ را تعریف می‌کند. سطرهای مشخص، که می‌توانند به‌طور کلی (اما نه همیشه) توسط بردارهای تنک در فضای مناسب نشان داده شوند، توسط روال‌ها در لایه واسط ساخته می‌شوند. L و Q (یا الحاقی‌های مربوطه) همراه با ماتریس حل کننده و اپراتور P (و یا P^T)؛ به بخش (۴-۵) مراجعه کنید) برای تکمیل محاسبات ژاکوبین برای یک تک فرستنده نیاز می‌باشند. روال‌های سطح بالاتر (J_{mult} , J_{multT} در جدول (۳-۲)) پس از آن چرخش پیرامون فرستنده‌ها انجام می‌شوند تا ضرب توسط ژاکوبین کامل، تکمیل شود. ماژول ماتریس حساسیت نیز روال‌هایی ($fwdPred$) را فراهم می‌کند که این روال‌ها مسائل پیشرو کامل $d=f(m)$ را پیاده‌سازی می‌کند؛ و برای محاسبه ژاکوبین کامل ($calcJ$) است. توجه داشته باشید که $fwdPred$ به‌صورت اختیاری آرایه‌ای از حل‌های EM ، ماتریس e محاسبه شده برای همه فرستنده‌های منحصر به فرد را برمی‌گرداند، به‌طوری که این‌ها را می‌توان ذخیره کرد (به‌عنوان مثال،

پس از ارزیابی فیت شدن داده‌ها) و برای محاسبات ماتریس حساسیت بعدی از آن استفاده کرد (به‌عنوان مثال، برای ارزیابی گرادیان تابع جریمه).

جدول (۳-۲): روال کلی برای محاسبات حساسیت استفاده شده. قراردادهای مورد استفاده در نام گذاری آرگومان‌ها iDt = نوع داده؛ iRx = گیرنده؛ iTx = فرستنده؛ نمادهای دیگر در جدول (۳-۱) هستند، زیر نویس صفرها بر پارامترهای مدل زمینه و بردارهای جواب برای خطی‌سازی استفاده شده است و برای بردار داده الگو دلالت دارد. بردار داده‌ی الگوی d_0 با بردار محاسبه شده d در خروجی، جایی که مناسب باشد؛ دو مرتبه نوشته می‌شود. Z نشان دهنده آرایه‌ای از پاسخ‌های واقعی است. ورودی‌ها یا خروجی‌های اختیاری در پرانتز هستند؛ m مؤلفه موهومی از خروجی پارامتر مدل با $PmultT$ است. al , [Kelbert et 2014].

Routine name	Inputs	Outputs	Used for	Module
initSolver	iTx, m	$e_0 (e, b)$	fwdPred, Jmult, JmultT, calcJ	Forward solver (driver)
exitSolver	$e_0 (e, b)$		fwdPred, Jmult, JmultT, calcJ	Forward solver (driver)
fwdSolver	$iTx (FWDorADJ, b)$	e	fwdPred, Jmult, JmultT, calcJ	Forward solver (driver)
Pmult	e_0, m_0, m	b	Jmult	Solver sensitivities
PmultT	e_0, m_0, e	$m(m')$	JmultT, calcJ	Solver sensitivities
Qmult	e_0, m_0, d_0, m	d	Jmult	Data sensitivities
QmultT	e_0, m_0, d	$m(m')$	JmultT	Data sensitivities
Lmult	e_0, m_0, d_0, e	d	Jmult	Data sensitivities
LmultT	e_0, m_0, d	b	JmultT	Data sensitivities
Qrows	e_0, m_0, iDt, iRx	m	Qmult, QmultT, calcJ	Data functionals
Lrows	e_0, m_0, iDt, iRx	l	Lmult, LmultT, calcJ	Data functionals
dataResp	e, m, iDt, iRx	Z	fwdPred	Data functionals
fwdPred	m, d_0	$d(e)$	Parallel inversion algorithms	Jacobian computations
calcJ	m_0, d_0	J	Parallel inversion algorithms	Jacobian computations
Jmult	$\delta m, m_0, d_0 (e)$	δd	Parallel inversion algorithms	Jacobian computations
JmultT	$m_0, \delta d (e)$	δm	Parallel inversion algorithms	Jacobian computations

تشکیلاتی از محاسبات ماتریس حساسیت که شرح داده شد تا کنون ساده و کلی است، اما ممکن است برای همه مسائل کارآمد نباشد. در برخی موارد محاسبات با ژاکوبین می‌تواند "عاملی" برای تاثیرپذیری مؤلفه‌هایی که به گیرنده و فرستنده بستگی دارند، باشد. ساده‌ترین مثال مسئله تصویربرداری چشمه کنترل شده cross-well، با تعداد N_T فرستنده و N_R گیرنده است.

ژاکوبین کامل برای این مسئله از جواب‌های پیشرو برای هر فرستنده و جواب‌های الحاقی برای هر گیرنده می‌تواند ساخته شود. بنابراین اگر $N_T \sim N_R$ باشد موثرترین راه برای پیاده‌سازی یک طرح گاوس-نیوتن پیش محاسبه و ذخیره این $N_R + N_T$ راه حل و استفاده از این‌ها در پیاده‌سازی ضرب توسط J و J^T است. اجرای یک چنین طرحی در ModEm مستقیم و ساده است-روال‌های پیاده‌سازی اساسی Jmult و JmultT که در بالا شرح داده شد، با استفاده از یک پیاده‌سازی از پیش محاسبه شده و ذخیره‌ی حل‌های

پیشرو و الحاقی مناسب، جایگزین شده‌اند. همه محاسبات در این گونه‌ها به آسانی با همان مؤلفه‌های مورد نیاز برای نسخه اصلی مشخص شده در بالا پیاده‌سازی شده است [Newman and Alumbaugh, 1997].

به‌طور خلاصه، روال‌ها، واکنش بین مؤلفه‌های محاسبات ماتریس حساسیت را (تابع داده L و Q؛ حل کننده S_m^{-1} ؛ p) با ساختار بردار، مدیریت می‌کنند. همان‌طور که بحث خواهد شد، یک موازی سازی سنگین فرستنده‌های بیشتر، یا مسائل پیشرو منحصربه‌فرد، در سطح ماژول ماتریس حساسیت پیاده‌سازی شده است، و به‌طور کامل از جزئیات مسئله خاص معکوس EM ای که ModEm بر روی آن کار کرده فاصله گرفته است [Siripunvaraporn and Egbert, 2009].

۳-۴ موازی سازی^۱

ModEm مجموعه‌ای از موازی‌سازی درشت مقیاس را در مسائل پیشرو در چهارچوب روش مقبل فراهم می‌کند که در واقع این چهارچوب گونه‌ای از روش موازی‌سازی مستر ورکر^۲ است؛ چهارچوب روش مقبل، ارتباط بین پردازنده‌های کارگر و استاد را در روش مستر ورکر به حداقل می‌رساند و حافظه مورد نیاز را کاهش می‌دهد؛ بدین صورت که پردازنده‌های کارگر نتایج محاسبات پیشرو را برای استفاده مجدد در حل مسئله الحاقی ذخیره می‌کنند. و از روال‌های سطح بالاتر موازی شده جهت محاسبات ژاکوبین می‌توان بهره برد (Jmult, JmultT calcJ) در جدول (۳-۲)، همچنین جهت راندمان بیشتر، ذخیره سازی درگره‌های کارگر اصلاح شده است [Meqbel, 2009].

قابل ذکر است جهت پیاده‌سازی کلی موازی سازی، بدون ارجاع به جزییات داخلی ساختار داده واقعی، لازم است از روال‌های مجزایی برای ماژول‌های فضای داده، فضای جواب و فضای مدل استفاده شود. توجه

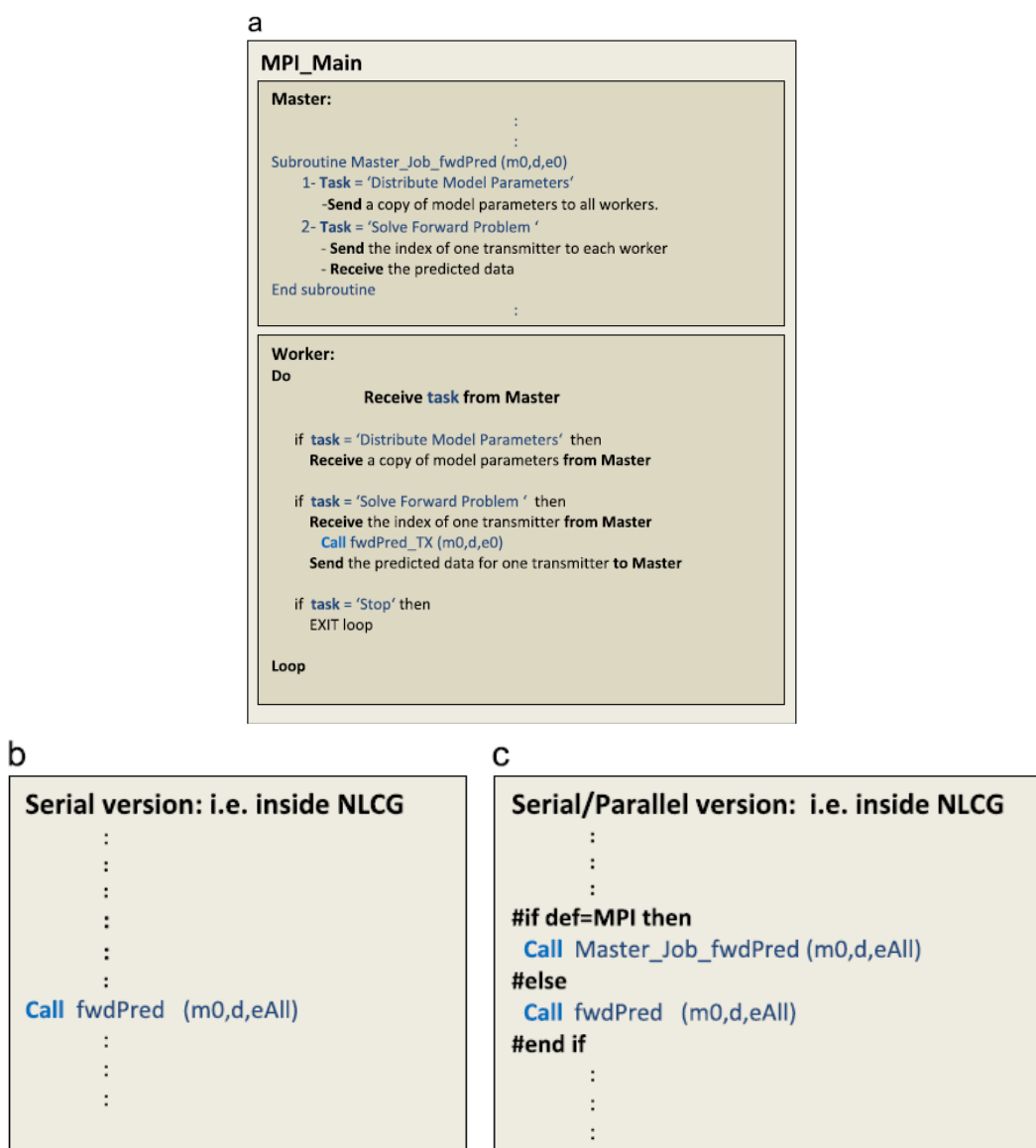
¹Parallel

²master-worker

³Messaging Passing Interface:MPI

داشته باشید که تغییرات نسبتاً جزئی در هر روال وارون‌سازی خاص مورد نیاز است، مخصوصاً در مسیر فراخوانی مدل‌سازی پیشرو و محاسبات ژاکوبین از طریق نسخه‌های موازی یا سریالی این روال‌ها، مناسب هستند. برای جلوگیری از داشتن دو نسخه کپی از این روال‌ها از دستورالعمل‌های کامپایلر استفاده می‌شود. ارتباط کلی ماژول اصلی MPI^۲ با بقیه ModEm در شکل (۳-۱)، و مروری کلی از پیاده‌سازی MPI در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. به‌طور خلاصه، بعد از مقداردهی اولیه پردازنده، یک پردازنده به‌عنوان استاد اختصاص داده شده است و بقیه به عنوان کارگران. پردازنده‌های کارگر وارد یک صف می‌شوند (در روال Worker_Job می‌گویند) و در انتظار پیام از پردازنده‌ی استاد می‌مانند، در حالی که مراحل اصلی از طریق الگوریتم وارون‌سازی واقعی رسیده باشد منتظر می‌مانند تا زمانی که یک مرحله از حل مسئله پیشرو یا الحاقی مورد نیاز است. در این نقطه پردازنده‌ی استاد پیام‌ها را به تمام پردازنده‌های کارگر توزیع می‌کند، تعیین می‌کند چه کاری انجام شود، و هر گونه داده ورودی لازم را فراهم می‌کند. پردازنده‌ی کارگر کار درخواست شده را پیاده‌سازی می‌کند، به‌طور معمول برای یک فرستنده منفرد، توسط فراخوانی ماتریس حساسیت مناسب یا زیرروال‌های لایه واسط - همان کد که در پیاده‌سازی سریالی اجرا خواهد شد. بنابراین، به جز برای تبدیل نوع داده‌ها، مخصوصاً تمام روال‌های خاص MPI در داخل یک ماژول MPI منفرد، میزبان هستند.

این روش موازی برای به حداقل رساندن ارتباطات بین پردازنده‌ها طراحی شده است. در نظر بگیرید برای مثال ضرب ماتریس - بردار در JmultT پیاده‌سازی شده است. همان‌طور که در جدول (۳-۲) ذکر شده است.



شکل (۳-۲): شبه کد برای واسط ارسال پیام (MPI) اجرای ماژول [Kelbert et al., 2014].

این روال جواب EM زمینه (که به طور معمول پیش از این برای ارزیابی تطابق مدل محاسبه شده است) را به عنوان یک ورودی اختیاری می گیرد. جواب برای یک فرستنده مشخص بر روی پردازنده ای که آن را محاسبه می کند نگه داشته می شود و فرستنده ی مشابهی نسبت به این پردازنده برای محاسبه ی ضرب $J^T d$ (برای یک فرستنده ی منفرد) اختصاص داده می شود. بنابراین جمع آوری جواب های EM برای همه فرستنده ها بر روی پردازنده اصلی و سپس توزیع دوباره این ها به پردازنده های کارگر لازم نیست. پردازنده ی

استاد تنها یک فرستنده شاخص و بردار داده (d) به هر پردازنده‌ی کارگر برای انجام ضرب در حالت موازی می‌فرستد. البته نتیجه پارامترهای مدل هنوز هم باید به پردازنده‌ی استاد بازگشت شود که در تکمیل محاسبه $J^T d$ برای بردار مدل کامل خلاصه می‌شود.

۳-۵ لایه واسط^۱

گروه‌بندی مرکزی در شکل (۱-۳) یک واسط بین ماتریس حساسیت کلی و ماژول‌های وارون‌سازی مورد بحث در بخش قبلی را فراهم می‌کند و جزئیات خاص از ماژول‌های گسسته عددی^۲ را پیاده‌سازی می‌کند. به‌طور خاص، جواب EM و شرایط چشمه e و b در این سطح در ماژول فضای جواب تعریف می‌شود؛ به‌عنوان حل‌کننده پیشرو انتزاعی است (که b را به e نگاشت می‌کند)، تابع‌های مشخص مسئله (که e را به d نگاشت می‌کند) و عملگر P ، ماتریس حساسیت حل‌کننده پیشرو را با پارامتر مدل تعیین می‌کند. همه این اهداف به‌طور گسترده توسط ماتریس حساسیت کلی و روال‌های وارون‌سازی استفاده می‌شود و در نتیجه باید نام‌ها و واسط‌های استاندارد داشته باشد، همان‌طور که در جدول (۲-۳) آمده است.

از دیدگاه برنامه نویسی شیء‌گرا، لایه واسط، موارد خاص از کلاس‌های مجزا را تعیین می‌کند؛ تا روش‌هایی را که به‌وسیله‌ی روال‌های ماتریس حساسیت سطح بالای عمومی مورد نیاز است؛ پیاده‌سازی کند. علاوه بر پنهان کردن جزئیات پیاده‌سازی عددی از روال‌های وارون‌سازی کلی، لایه واسط است که در آن جزئیات چشمه و گیرنده برای کاربردهای خاص EM تعیین می‌شوند. همان‌طور که در بخش (۳-۷) ملاحظه می‌کنید، وارون‌سازی برای روش‌های مختلف EM (به‌عنوان مثال MT و CSEM) ممکن است با

¹Interface layer

²Discrete Numeric

استفاده از همان ماژول‌های گسسته عددی پایه و همان ماژول‌های وارون‌سازی کلی از طریق تغییرات در لایه واسط توسعه یابد.

قسمت مهم لایه واسط، ماژول فضای جواب است؛ که انواع داده‌ی حاصل شده در نمایش بردار جواب e ، بردار چشمه b از مسئله پیشرو گسسته معادله $(2-3)$ برای یک فرستنده منفرد را تعیین می‌کند. این دو نوع داده مشخص، نشان دهنده اهدافی هستند که در فضای مشابه هستند؛ اما آن جهت تمایز بین بردارهای مورد استفاده برای چشمه‌ها و جواب‌ها مفید در نظر گرفته شده است. نوع داده بردار تنک برای نشان دادن عناصر این فضای مشابه نیز استفاده می‌شود که در این مورد یک ذخیره سازی کارآمد از تابعی‌های داده تنک که سطرهای عملگر L را تشکیل می‌دهند فراهم می‌شود. روش‌های عمومی برای دست‌کاری همه این اهداف، از جمله ایجاد، تخریب، کپی، عملیات جبرخطی و ضرب نقطه‌ای، در سراسر محاسبات ژاکوبین به‌طور گسترده استفاده می‌شود و در نتیجه باید با واسط‌ها و نام‌های استاندارد شده پیاده‌سازی شود.

توجه داشته باشید که بردار حل کامل به‌کار گرفته شده در یک مسئله معکوس به‌طور کلی آرایه‌ای از اهداف بردار حل خواهد بود، یک برای هر فرستنده. عناصر این آرایه در کل می‌تواند کاملاً متفاوت باشد، برای مثال در مورد وارونگی مشترک، برای مثال، وارونگی مشترک MT سه‌بعدی و $CSEM$ می‌تواند به راحتی با ذخیره یک جواب برای مسئله MT در $e(1)$ محدود کردن راه حل برای دو قطبش منبع برای یک دوره تناوب جایگزین شود، در حالی که $e(2)$ می‌تواند یک راه حل برای یک فرستنده با منبع کنترل شده نشان دهد. برای مسئله MT دوبعدی، آرایه از اهداف بردار جواب به‌طور کلی شامل حل‌های پیشرو هر دو مد TE (میدان الکتریکی) و مد TM (میدان مغناطیسی) می‌باشند. لایه واسط مانند پیچیدگی ناشی از حساسیت کلی و روال‌های وارون‌سازی پنهان می‌شود، گرچه بدیهی است این جزئیات در اجرای محاسبات حقیقی مهم هستند.

۳-۶ حل کننده پیشرو

هدف از این ماژول ارائه یک واسط یکنواخت بین روال‌های مدل‌سازی پیشرو پیاده‌سازی شده در لایه عددی گسسته، و وارون‌سازی عمومی و روال‌های ماتریس حساسیت از بخش (۳-۳) است. روال‌های عمومی کلیدی در این ماژول شامل مقداردهی اولیه^۱، آزادسازی و تصفیه^۲ و حل کننده حقیقی^۳، با واسط‌هایی که در جدول (۳-۲) تعریف شده است، می‌باشد. عملکرد داخلی این روال‌ها وابسته به کاربرد است و توسط شاخص در دیگشتری فرستنده iTx، کنترل شده است. به عنوان مثال، در مورد MT سه بعدی (نگاه کنید به بخش (۳-۷)) خروجی fwdSolver، یعنی ماتریس e شامل جواب‌هایی برای دو قطبش چشمه می‌باشد، که نیاز به فراخوانی‌های جداگانه در حل کننده عددی حقیقی با شرایط مرزی مختلف، برای فرکانس تعریف شده توسط iTx دارد.

مقداردهی اولیه به صراحت از جواب واقعی جدا می‌شود تا امکان استراتژی‌های محاسباتی کارآمدتر فراهم شود. برای مثال، اگر تجزیه مستقیم یک ماتریس LU عملی است، این می‌تواند در روال اولیه (مقداردهی اولیه) پیاده‌سازی شود؛ و تنها اگر ماتریس ضرایب از حل کننده قبلی تغییر کرده باشد، می‌تواند پیاده‌سازی شود. به طور کلی‌تر، تکرار مراحل راه‌اندازی عملگر نیز می‌تواند با حفظ مسیرهای نشانگر (فرکانس، پارامتر رسانندگی) استفاده شده برای جواب قبلی به حداقل برسد. مسئولیت برای این بازدهی کاذب با روال مقداردهی اولیه است – روال‌های سطح بالاتر که نیازمند جواب‌های حاکم بر PDE (مشتقات جزئی) است؛

¹ initSolver

² exitSolver

³ fwdSolver

همیشه در اولین روال مقداردهی فراخوانی می‌شود. روال پاک‌سازی exitSolver است تنها وقتی فراخوانی می‌شود که آن در آزاد کردن تمام آرایه‌های عملگر و بازگشت داده ماژول جواب به حالتی که قبل از اولین فراخوانی در initSolver دارد، مورد نظر باشد. در نهایت، fwdSolver حل‌کننده عمومی را پیاده‌سازی می‌کند، اعمال نیروی قراردادی و شرایط مرزی^۱، و جواب‌هایی برای هر دو مسئله پیشرو معمول و ترانواده آن، و یا الحاقی را منجر می‌شود. به‌طور پیش فرض، نیرو برای مسئله پیشرو، با ارجاع به دیکشنری فرستنده، داخلی محاسبه می‌شود. برای محاسبه‌ی ماتریس حساسیت، نیرو به‌عنوان یک آرگومان اختیاری، فرض می‌شود که توسط آن، یک سویچ اختیاری عملگر الحاقی یا حل‌کننده‌ی پیشرو را معین می‌کند.

۷-۳ توابع داده

این ماژول تابعی‌های داده $\psi_j(e, m)$ در جدول (۳-۱)، و نیز خطی‌کننده‌ها با توجه به ماتریس e (۱)؛ سطرهای L هستند) و در صورت لزوم ماتریس m (q_j سطرهای Q هستند) را پیاده‌سازی می‌کند. این تابعی‌ها را می‌توان به‌وسیله‌ی (۱) نگاشتی بیان کرد؛ که این نگاشت میدان اولیه (به‌عنوان مثال الکتریکی) را به میدان‌های دوگانه (به‌عنوان مثال مغناطیسی) تبدیل می‌کند؛ (۲) این تابعی‌ها را می‌توان به‌وسیله‌ی عملگرهای درونیابی برای میدان‌های اولیه و دوگانه تعریف کرد؛ که فرآیند اندازه‌گیری مؤلفه‌های EM را در مکان‌های خاص شبیه‌سازی می‌کند؛ (۳) این تابعی‌ها می‌توانند به‌وسیله‌ی تابعی‌هایی از مؤلفه‌های میدان اندازه‌گیری شده، به‌عنوان مثال، یک امپدانس یا مقاومت ویژه ظاهری بیان شوند (به معادلات (۳-۱۰) و (۳-۱۱) نگاه کنید). اولین دومؤلفه به دقت به شبکه عددی گره خورده است، و در سطح گسسته عددی پیاده‌سازی می‌شوند که در بخش (۳-۶) مورد بحث قرار می‌گیرد. این تجزیه‌ی خطی شده از تابعی‌های داده به مجموعه‌ای از نگاشت‌های اولیه به پیاده‌سازی مدولار کاملاً خطی از تابعی‌های داده منجر می‌شود، ساخت

¹ Boundary Conditions

(ترکیب) آن مخصوصا در نوشتن مشتقات ماتریس حساسیت برای هر تابعی داده کلی به وسیله عملگرهای اولیه‌ی از قبل موجود، آسان است.

سه روال عمومی با نام‌ها و واسط‌های استاندارد شده (به جدول (۲-۳) رجوع کنید) تابعی‌های داده را برای استفاده در محاسبات ماتریس حساسیت و وارون‌سازی پیاده‌سازی کرده است. dataResp (احتمالا غیرخطی) تابعی‌های داده $\psi_j(e,m)$ را برای یک تک گیرنده دلخواه/نوع داده ارزیابی می‌کند. اطلاعات در مورد نوع داده (به‌عنوان مثال امپدانس، مقاومت ویژه ظاهری یا فاز) با ارجاع به دیکشنری نوع داده (نشان‌گذاری شده با idt) به‌دست آمده است در حالی که متا-داده مانند موقعیت سایت از دیکشنری گیرنده (نشان‌گذاری شده با irt) به‌دست آمده است. از طریق فراخوانی به سطح پایین‌تر (به‌طور خاص پیاده‌سازی عددی) روال‌ها همه‌ی عملگرهای درونیابی لازم را ایجاد کرده‌اند و مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی در محل‌های مشاهده ارزیابی می‌شوند. هر محاسبات اضافی (به‌عنوان مثال، امپدانس، دامنه و فاز) در لایه واسط تکمیل می‌شوند. توجه داشته باشید که تمام روال‌های تابعی داده، محاسباتی را برای محدوده کامل انواع داده و فرستنده‌ها پیاده‌سازی می‌کنند.

Lrows خطی‌سازی تابعی داده را با توجه به تغییرات در جواب EM یعنی ماتریس e پیاده‌سازی می‌کند. در ساده‌ترین حالت، که در آن داده فقط یک مؤلفه اندازه‌گیری شده میدان است (به‌عنوان مثال در روش‌های CSEM) و $\psi_j(e,m)$ از قبل در ماتریس e خطی است، این روال به سادگی تابعی ارزیابی مناسب را محاسبه می‌کند (دقیقا در dataResp)؛ و این را باز می‌گرداند و به‌عنوان یک بردار تنک در فضای جواب EM بسته‌بندی می‌شود. برای حالت کلی‌تر تابعی‌های خطی z ترکیبات خطی از مواردی هستند تا مؤلفه میدان پایه را با ضرایبی که وابسته به جواب EM زمینه یعنی ماتریس e_0 است؛ نشان دهند. (به معادله (۳-۱۰) نگاه کنید) این بردارهای تنک در Lmult استفاده می‌شوند (جدول (۲-۳)) تا ضرب‌های نقطه‌ای مورد نیاز

برای بردار داده یعنی $Le=d$ جمع آوری شود. $LmultT$ این بردارها را با مؤلفه‌های مربوطه ضرب می‌کند و جمع می‌کند تا نیرویی را برای سیستم الحاقی L^Td شکل دهد.

عملکرد $Qrows$ مشابه است، اما به جای تابعی‌های داده، این روال، یک یا چند پارامتر مدل یعنی qj را برمی‌گرداند. عبارت کلی برای سطرهای Q در معادله (۳-۱۱) با جزییات بیشتر نشان داده می‌شود. اینجا توجه داشته باشید تنها هر یک از این پارامترهای مدل را می‌توان به‌عنوان یک نتیجه از یک بردار تنک در فضای جواب EM (تشکیل شده برای I_j با ارجاع به نوع داده و دیگشتری‌های گیرنده)، و (ترانهاده) نگاشت پارامتر مدل خطی شده $\Pi_{m0} T$ (بخش (۳-۶) را نگاه کنید) بیان کرد. اگر چه در بسیاری از موارد نتیجه در فضای پارامتری مدل، تنک خواهد بود اما استثنایی وجود دارد، بنابراین $ModEM$ نشان دهنده qj به‌عنوان پارامترهای مدل کامل می‌باشد. همچنین، توجه داشته باشید در حالی که پارامترهای مدل، حقیقی فرض می‌شود، بردارهای تنک که در فضای جواب EM ضرب می‌شوند؛ پیچیده هستند. در برخی شرایط (به‌عنوان مثال محاسبه ژاکوبین کامل) هر دو قسمت‌های حقیقی و موهومی مورد نیاز هستند؛ در حالی که برای دیگر شرایط (به‌عنوان مثال محاسبه مشتق تطابق داده) تنها بخش حقیقی مورد نیاز است. در $Qmult$ (جدول (۳-۲))، ضرب نقطه‌ای با پارامتر مدل ورودی تشکیل می‌شود و به بردار داده $d=Qm$ جمع‌آوری می‌شود. برای ترانهاده $QmultT$ ، پارامترهای مدل qj با مؤلفه‌های داده مربوطه ضرب شده و جمع می‌شود تا $Q^Td=m$ حاصل شود [Meqbel, 2009].

۳-۸ حل کننده ماتریس حساسیت

مؤلفه نهایی لایه واسط، ماتریس P را پیاده‌سازی می‌کند، که به‌طور موثری ضرایب ماتریس حساسیت S_m مسئله پیشرو را در پارامتربندی مدل تعیین می‌کند (معادله (۳-۵) را نگاه کنید). همان‌طور که در معادله (۳-۸) دیده می‌شود این عملگر را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: $Ve(diagU)$ ، که به فرمولاسیون مسئله بستگی دارد (یعنی شکل PDE که استفاده می‌شود)، و پیاده‌سازی عددی، اما نه پارامتربندی خاص

مدل و Π_{m_0} که نگاشت خطی از پارامتر مدل به شبکه است. عملگر $P\delta m$ ، $Pmult$ را با اعمال اولیه‌ی Π_{m_0} بر روی پارامتر مدل δm ، محاسبه می‌کند و سپس $(Ve(diagU.))$ را بر روی نتیجه اعمال می‌کند. این روال بردار چشمه را از نوع درست برمی‌گرداند تا نیرویی را برای حل کننده در محاسبه‌ای مانند $LS^{-1}P\delta m = J\delta m$ فراهم کند. $PmultT$ بردار جواب را با معکوس کردن این مراحل و اعمال آن در یک بردار پارامتر مدل، ماتریس P^T را ضرب می‌کند. همان‌طور که با $QmultT$ ، خروجی از $PmultT$ ذاتا مختلط است، و در برخی موارد (به‌عنوان مثال، محاسبه ماتریس حساسیت کامل) هر دو بخش‌های حقیقی و موهومی ذخیره می‌شوند. بنابراین، تجزیه عملگر ماتریس حساسیت حل کننده‌ی P در معادله $((4-8))$ به مؤلفه‌های اولیه‌ی مسئله پیشرو، که در معادله $((3-7))$ مشخص شده است؛ پیاده‌سازی محاسبات ماتریس حساسیت را برای طیف گسترده‌ای از مسائل EM ساده‌سازی می‌کند. از لحاظ نظری یک‌بار که حل کننده پیشرو به ترکیبی از عملگرهای گسسته اصلی تجزیه شده باشد، ماتریس‌های حساسیت ممکن است بلافاصله به‌وسیله‌ی این مؤلفه‌های اصلی بیان شوند و به چهارچوب وارون‌سازی متصل شوند تا مشتق عددی گسسته‌ی درست را فراهم کنند.

۳-۹ گسسته‌سازی عددی

گروه نهایی از ماژول‌ها (شکل $((3-1))$) شبکه‌بندی پایه‌ی عددی و ساختارهایی که نشان دهنده میدان‌های اولیه و ثانویه هستند؛ فراهم می‌کنند؛ یعنی حل کننده پیشرو عددی واقعی و یک مجموعه ابتدایی از تابع‌های درونیابی برای ارزیابی نقطه‌ای میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی. برای اهداف بحث در اینجا ماژول پارامتر مدل در این گروه شامل شده است؛ گرچه، همان‌گونه که در بخش $((3-3))$ بحث شد؛ این نیز می‌تواند با اهداف سطح بالاتر در نظر گرفته شود که به‌طور مستقیم توسط روال‌های وارون‌سازی و ماتریس حساسیت دست‌کاری شده است و در نتیجه باید با استانداردهای واسط کلی ModEM مطابقت کند. گرچه، ساختار درونی ماتریس m (و کوواریانس مدل) می‌تواند کاملاً مستقل از شبکه و دیگر جزئیات پیاده‌سازی عددی

باشد؛ پارامتر مدل نقش مهمی در تعریف عملگر عددی گسسته بازی می‌کند و در نتیجه باید به شدت با دیگر مؤلفه‌های گسسته عددی تعامل یابد.

ماژول‌های گسسته‌سازی عددی باقی‌مانده هیچ تعامل مستقیمی با روال‌های وارون‌سازی و ماتریس حساسیت عمومی ندارند؛ بنابراین یک طیف گسترده‌ای از پیاده‌سازی‌های مشخص را می‌توان از طریق تغییرات در لایه واسط جایگزین کرد. بنابراین مفیدترین حالت این است که این ماژول را در قالب یک مثال خاص بحث کرد. این کار در بخش (۳-۷) انجام می‌شود. پس از ارائه دستورالعمل‌های عمومی بر عوارض، برای اطمینان از تابعیت مورد نیاز مؤلفه‌های عمومی تر و نمایی عمومی از چگونگی سازماندهی ماژول‌ها (همان‌طور که در شکل (۳-۱) مشخص شده است) برای ساده کردن ارتباط با بقیه ModEM مطابقت صورت می‌گیرد. اهداف داده گسسته‌شده‌ی عددی پایه، شبکه و ساختارهایی هستند که نشان دهنده میدان‌های الکتریکی و یا مغناطیسی گسسته شده است. دومی اجزای فضاهاى اولیه و دوگانه یعنی S_D و S_P هستند. در این جا یک نوع داده میدان EM (در اینجا نام نوع بی اهمیت است)، همراه با جبر خطی مربوطه و دیگر عملیات پایه داده‌های هدف تعریف می‌شود. به‌طور مشابه، تعیین نمایش بردار تنک برای اجزای S_P ، ساخت تابع‌های داده را ساده‌سازی می‌کند. یک ساختار داده که شبکه عددی را تعریف می‌کند؛ باید تعریف شود. اگر چه در شکلی که این داده می‌گیرد هیچ نیازمندی خاصی وجود ندارد. برخی از روال‌ها در ماژول ماتریس حساسیت، اشاره‌گر را به شبکه انتقال می‌دهد، به‌عنوان مثال، اجازه می‌دهد مکان‌های سایت داده به شبکه حل عددی ارجاع داده شود.

مدل‌سازی پیشرو البته که هسته وارون‌سازی است. که در اصل یک کد پیشرو موجود را می‌توان مورد استفاده قرارداد؛ اما برای استفاده مفید از ModEM چندین شرایط مختلف باید لحاظ شود. اول، حل کننده باید عمومی باشد؛ به این معنا که راه حل می‌تواند به درستی برای چشمه‌های قراردادی و داده‌های مرزی محاسبه شود، حتی اگر نیروهایی که درگیر مسئله پیشرو هستند؛ بیشتر محدود شوند. برای مثال، برای

مسئله پیشرو MT معمول قید به مرزها محدود می‌شود، اما در شرایط کلی‌تر جملات چشمه برای محاسبه ماتریس حساسیت باید در نظر گرفته شود. دوم، قابلیت حل سیستم ترانزاده مورد نیاز است. از آنجا که معادلات EM اساساً خود الحاقی^۱ هستند، کدهای مسئله پیشرو می‌تواند به‌طور عمومی برای پیاده‌سازی الحاقی محاسبات اصلاح شوند. در نهایت، حل کننده باید یک واسط ساده داشته باشد که اجازه می‌دهد تا با روال سطح بالاتر تعامل داشته باشد. حداقل این باید شامل مقداردهی اولیه از جواب باشد، و ضرایب PDE به روز رسانی شوند (که به پارامتر مدل و فرکانس بستگی دارد). همچنین معادلات پیشرو یا ترانزاده برای یک مجموعه خاص از منابع و شرایط مرزی حل می‌شوند.

توسعه یک ماژول جداگانه با قابلیت‌های استاندارد برای تابع‌های درونیابی برای ارزیابی میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در یک نقطه دلخواه در حوزه مدل استفاده شده است (به‌عنوان مثال درونیابی میدان EM در شکل (۳-۱))؛ که این توسعه تا حد زیادی پیاده‌سازی تابع‌های داده در سطح واسط را ساده‌سازی کرده است. احتیاج ضروری برای روال‌ها محاسبه تابع‌های درونیابی λ برای هر دو مؤلفه‌های میدان اولیه و ثانویه است و بازگشت این به‌عنوان بردارهای تنک در فضای میدان اولیه S_P است. در مورد میدان اولیه (به‌عنوان مثال، الکتریکی) روشن است؛ مؤلفه‌های غیر صفر از λ وزن‌های درونیابی محلی هستند. برای میدان دوگانه (به‌عنوان مثال میدان مغناطیسی $Te=h$)، λ باید اپراتور تبدیل (T) مورد استفاده برای محاسبه میدان دوگانه را ترکیب کند؛ به‌طوری که تابع هنوز هم می‌تواند به‌طور مستقیم بر بردار میدان اولیه اعمال شود. توجه داشته باشید که لازم نیست اپراتور تبدیل کامل باشد؛ تنها چند مؤلفه به شکل تابع‌های ارزیابی میدان دوگانه برای هر مکان مورد نیاز بوده است. اگر تابع‌های درونیابی و یا اپراتور تبدیل، به‌طور واضح به پارامتر مدل وابسته باشد؛ چند بردار تنک اضافی برای ساخت سطرهای Q لازم می‌شود.

¹Self-adjoint

بردارهای تنکی که با روال‌های درون‌یابی میدان EM برگشت داده می‌شوند؛ بلوک‌های ساختمان اصلی برای تابع‌های داده غیر خطی Ψ_z هستند (به‌عنوان مثال امپدانس‌ها).

ارزیابی تابع‌های دوره‌ای به جزئیات شبکه‌بندی عددی بستگی دارند؛ در حالی که به محاسبه چیزی مثل امپدانس یا مولفه‌های میدان الکتریکی و مغناطیسی درون‌یابی‌شده بستگی ندارد. بنابراین یک مسئله گسسته عددی متفاوت (به‌عنوان مثال، المان محدود با شبکه غیر ساخت یافته) نیازمند روال‌های درون‌یابی متفاوت است. با این حال اگر این‌ها دوباره به‌عنوان بردارهای تنک در فضا‌های میدان EM گسسته نشان داده شود؛ روال‌های تابع داده‌های سطح بالاتر (به‌عنوان مثال، برای محاسبه عناصر امپدانس) و یا ساخت تابع‌های داده شده‌ی خطی شده‌ی مربوطه، بدون تغییر باقی خواهد ماند. در مقابل، برای اضافه کردن انواع داده‌های جدید (به‌عنوان مثال، تابع‌های انتقال مغناطیسی بین ایستگاهی) نیاز به بررسی دوباره جنبه‌های درون‌یابی از مسئله وجود ندارد.

ماژول پارامتر مدل شامل سه مؤلفه قابل تشخیص است: (۱) یک ساختار داده که نشان دهنده ماتریس m است، همراه با روش‌هایی برای پیاده‌سازی فضای برداری اپراتورها، از جمله ضرب نقطه‌ای؛ (۲) کوواریانس پارامتر مدل یا اپراتور منظم‌ساز؛ (۳) نگاشت بین پارامتر مدل و شبکه عددی. توجه داشته باشید که تا حدی این مؤلفه‌ها می‌تواند به‌طور مستقل اصلاح شود؛ به‌عنوان مثال، یک اجرای کوواریانس متفاوت می‌تواند بدون تغییر در دو مؤلفه دیگر استفاده شود و اگر گسسته‌ساز عددی تغییر داده شد؛ تنها مؤلفه نقشه برداری را باید اصلاح کرد. سومین مؤلفه روال سه را که با لایه واسط تعامل دارد تعیین می‌کند. اولین روال $\pi(m)$ ، نگاشت پارامتر مدل که مقاومت ویژه یا رسانندگی بر روی شبکه‌های عددی است را مشخص می‌کند که در تعیین عملگر پیشرو مورد نیاز است. این به‌طور عمومی با روال مقداردهی اولیه‌ی پیشرو (initSolver) نام‌گذاری خواهد شد. روال دوم و سوم، ضرب را با ژاکوبین نگاشت پارامتر مدل یعنی $\Pi = \partial\pi/\partial m$ و الحاقی آن Π^T پیاده‌سازی می‌کند. این روال‌ها جهت پیاده‌سازی ضرب ماتریس P و Q و الحاقی آن‌ها مورد نیاز

می‌باشند. در ادامه که تابع‌های درونیابی اولیه به پارامتر مدل بستگی دارند، تعیین محدوده‌ی $\pi(m)$ در اجزای شبکه خاص مفید است [McCrory et al., 2003].

۳-۱۰ مثال: EM سه‌بعدی

۳-۱۰-۱ گسسته سازی عددی

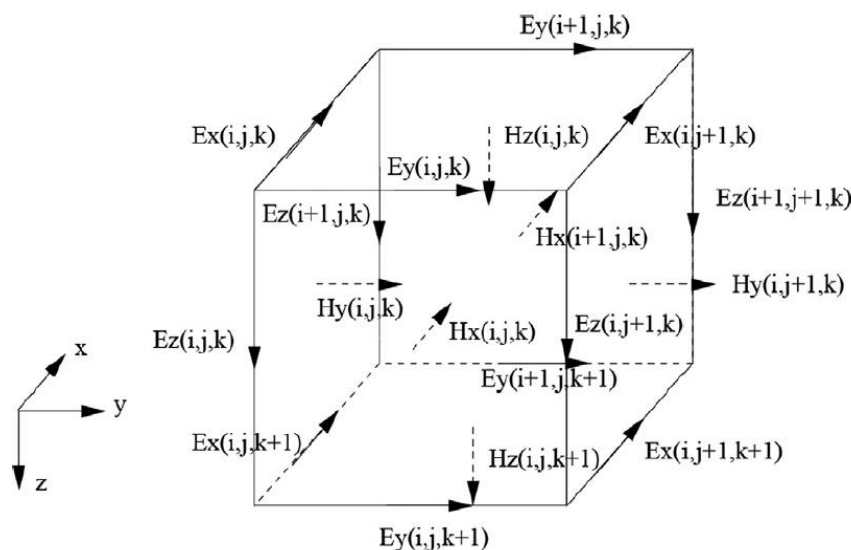
به‌عنوان نمونه‌های خاص، استفاده از ModEM در مسئله‌های وارون‌سازی MT سه‌بعدی و CSEM در نظر گرفته می‌شود. هر دو با استفاده از همان مازول گسسته‌سازی عددی، بر اساس حل تفاضل محدود (FD) معادلات ماکسول شبه استاتیک در حوزه فرکانس، در فرم‌های به‌دست آمده از (۳-۹) در یک شبکه شطرنجی، اجرا شده است [Siripunvaraporn et al., 2002 and Yee, 1966].

میدان‌های الکتریکی بر روی لبه‌های سلول (شکل (۳-۳) را ببینید) تعریف شده است؛ فضای چنین میدان‌های برداری گسسته‌ای (اولیه) با S_P نشان داده شده است. فضای دوگانه، مشخص شده توسط S_D شامل میدان‌های برداری با مؤلفه‌های مشخص شده در وجه‌های سلول، میدان‌های مغناطیسی را نمایش می‌دهد. پس از آن معادله (۴-۹) در فرم گسسته به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

$$[C^\dagger C + \text{diag}(i\omega\mu\sigma(m))] e = j_s \quad (۳-۱۲)$$

$$Be = e_b \quad (۳-۱۳)$$

که در آن $e \in S_P$ ، $j_s \in S_P$ قید داخلی اختیاری است، $C: S_P \mapsto S_D$ تخمین گسسته از نگاشت عملگر کرل بردارهای لبه سلول (شامل مرزها) به وجه داخلی سلول است. $C^\dagger: S_D \mapsto S_P$ نگاشت کرل گسسته که بردارها را به لبه داخلی سلول متصل می‌کند، B لبه‌های مرز و e_b داده مرزی را مشخص می‌کنند. قید داخلی در سمت راست (۳-۱۲) در CSEM قابل اجراست، اما نه در MT، و فقط در لبه‌های داخلی سلول اولیه تعریف شده است.



شکل (۳-۳): شبکه تفاضل محدود شطرنجی برای مسئله پیشرو سه بعدی MT. مؤلفه‌های میدان الکتریکی تعیین شده در لبه‌های سلول مؤلفه‌های میدان الکتریکی اولیه هستند که PDE در آن فرمول نویسی شده است. مؤلفه‌های میدان مغناطیسی می‌تواند بر روی سلول به‌طور طبیعی تعریف شود؛ این‌ها مؤلفه‌های ثانویه میدان EM در این فرمول عددی هستند. [Kelbert et al., 2014]

وابستگی ضرایب اپراتور به پارامتر مدل، از طریق نگاشت $\sigma: M \mapsto S_P$ در معادله (۳-۱۲) مشخص شده است؛ که در آن M فضای پارامتر مدل است. میدان مغناطیسی مربوط به حل میدان الکتریکی e می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$h = (-i\omega\mu)^{-1} Ce = Te \quad (۳-۱۴)$$

برای پیاده‌سازی ماژول‌های گسسته عددی بر اساس این فرمولاسیون، میدان EM اولیه به‌عنوان یک نوع داده به‌دست آمده حاوی سه آرایه سه بعدی به‌صورت جداگانه تعریف شده است (مؤلفه‌های x, y, z ، همراه با یک اشاره‌گر به شبکه اساسی مشخص شده (که هندسه و مختصات جغرافیایی جهانی شبکه شطرنجی را تعیین می‌کند)؛ و یک برچسب برای نشان دادن میدان برداری در شبکه اولیه (لبه) و یا شبکه دوگانه (وجه‌ها) تعریف شده است. چندین گونه از این اهداف بردار مختلط نیز تعریف می‌شود؛ از جمله میدان‌های اسکالر (تعیین کردن هر یک در مراکز سلول یا گره) و همچنین برای نسخه‌های پیچیده‌ای از بردارها و

اسکالرها منجر می شود. به عنوان مثال، کمیت اسکالرهای مختلط برای نشان دادن پتانسیل الکتریکی استفاده می شود [Smith, 1996].

برای نشان دادن هدایت الکتریکی تعریف شده روی لبه های سلول، یک بردار حقیقی به عنوان مثال $\sigma(m)$ در معادله (۳-۹) می تواند مورد استفاده قرار گیرد. ارائه بردار تنک برای عناصر S_P و S_D ، منجر به نمایش کارآمد و ذخیره سازی تابع های اندازه گیری می شود. برای تمام تغییرات میدان های برداری و اسکالر اولیه روال هایی برای ایجاد، آزادسازی، جبر خطی و ضرب نقطه ای وجود دارد. روال های جبری، ترکیب مرتبط انواع مختلف را شامل می شود (به عنوان مثال، ضرب نقطه ای بردارهای تنک و کامل، مورد استفاده برای ارزیابی تابع های مولفه ی میدان؛ ضرب نقطه ای میدان های برداری مختلط یا حقیقی که برای محاسبه $i\omega\mu\sigma E$ مورد نیاز است). سرانجام، یک ساختار داده تخصصی برای ذخیره داده ها برای شرایط مرزی تعیین می شود. عملگر پیشرو در معادله (۳-۹) با استفاده از یک روش ماتریس آزاد و سیستم معادلات خطی حل تکرار شونده که با یک روش باقی مانده (QMR) شبه مینیمم، با تجزیه ناقص LU سطح ۱- به عنوان پیش شرط، پیاده سازی شده است. اصلاح واگرایی (دیورژانس) به صورت دوره ای، با معادله پواسون حل شده با پیش شرط گرادیان مزدوج پیاده سازی می شود. همه چیز در حالت شی گرا کدگذاری شده است، به طوری که برای مثال، حل کننده ها و پیش شرط ها از ماژول های مستقل هستند که می تواند به راحتی با الگوریتم های متناوب جایگزین شوند. اجرای ترانهاده حل کننده ها ساده و آسان است. عملگر دیفرانسیل $(i\omega\mu\sigma(m))=S_m$ را که در آن $S_m^T=VS_mV^{-1}$ ، $C^+ C + \text{diag}$ ماتریس قطری عناصر انتگرال گیری حجمی برای S_P است؛ توجه می کند. این به این معنی است که $S_m^T V = VS_m$ متقارن است، و به منظور بهبود عملکرد حل کننده QMR به این سیستم اصلاح شده تبدیل شده است. بنابراین، برای حل $b=S_m e$ قبل از فراخوانی حل کننده، ماتریس b در ماتریس V ضرب می شود؛ برای راه حل های $b=S_m^T e$ این گام اولیه با ضرب خروجی حل کننده توسط V^{-1} جایگزین می شود.

روال‌های مجزا، ضرایب درونیابی را برای بردارهای تعریف شده بر روی لبه‌ها و وجه‌ها، تعریف می‌کند تا بردارهای تنک $\lambda^D \in S_D$ و $\lambda^P \in S_P$ به ترتیب برگردانده شود. یک روال سوم ضرایب λ^D را با سطرهای مناسب از عملگر تبدیل (۳-۱۴) در ساخت تابع درونیابی میدان مغناطیسی تنک ترکیب می‌کند، به‌عنوان یک بردار تنک در S_P نشان داده شده است [smith,1996].

برای پیاده‌سازی اولیه ماژول پارامتر مدل، از روش بسیار ساده و کلاسیک استفاده شده است: M شامل فضای لگاریتم رسانی تعیین شده به‌طور مستقل در هر یک از سلول‌ها در شبکه‌های عددی مشخص شده است. بنابراین، یک فرم فیزیکی سازگار (جریان حفاظت شده) برای نگاشت $\sigma: M \rightarrow S_P$ توسط رابطه‌ی $\sigma(m) = W \exp(m)$ داده می‌شود که در آن W عملگری است که میانگین وزنی از چهار سلول احاطه شده به هر لبه را به خود سلول اختصاص می‌دهد. ژاکوبین این اپراتور که ارزیابی شده در هدایت رسانندگی زمینه m_0 است؛ به‌صورت زیر است:

$$\Pi_{m_0} = W[\text{diag}(\exp(m_0))] \quad (3-15)$$

همچنین ترانهاده $\Pi_{m_0}^T$ نیاز است؛ که نگاشتی از لبه‌های سلول به سلول است و به‌عنوان جمع وزن‌داری از تمام لبه‌ها که یک سلول را محدود کرده است؛ می‌باشد [Siripunvaraporn et al., 2002].

کوواریانس مدل اولیه یک جاهایی جدیدتر است: باید یک کوواریانس خودکاهشی بازگشتی هموار را پیاده‌سازی کرد که انحراف از رسانندگی مدل قبلی مشخص شده را جبران می‌کند. هموارسازی افقی و عمودی ممکن است متفاوت باشد؛ علاوه بر این، میزان هموارسازی افقی ممکن است با عمق تغییر کند. فایل پیکربندی به کاربر اجازه می‌دهد تا دامنه مدل را به قسمت‌های گسسته تقسیم کند و هموارسازی در سراسر مرزهای دامنه خاموش شوند و همچنین اجازه می‌دهد پارامترهای مدل در یک دامنه ثابت شوند. این ارزش تاکید دوباره دارد که پارامتربندی و کوواریانس مدل کاملاً مستقل از بقیه ModEM هستند. در

عمل، تصور می‌شود پشتیبانی از یک فهرست انتخاب پارامتربندی و کوواریانس مدل برای مسائل EM سه‌بعدی برگزیده می‌شود [Purser et al., 2003].

۳-۱۰-۲ لایه واسط

لایه واسط برای پیاده‌سازی MT و CSEM کمی متفاوت است، برای بردار جواب e با نیازمندی متفاوت شروع می‌شود. این لایه، ارزیابی داده MT سه‌بعدی را منجر می‌شود، تانسور امپدانس، e باید شامل یک جفت از بردارهای مختلط ساختارهای میدان EM باشد، مشابه به جواب‌هایی برای دو قطبش چشمه مستقل. به‌طور مشابه، شرط چشمه b در (۲-۳) باید شرایط مرزی را برای دو مسئله پیشرو تعیین کند؛ و تابع‌های داده خطی شده (به‌عنوان مثال، l_j) باید یک جفت از اجزای تنک S_P را نشان دهند. بعد از محاسبه امپدانس پیش‌بینی شده، نمونه‌گیری از جواب‌ها برای هر دو قطبش نیاز است. به‌عبارت دیگر، برای بسیاری از مسائل CSEM هر مشاهده با یک چشمه واحد مشخص مطابق خواهد بود؛ بنابراین همه اهداف لایه واسط (به‌عنوان مثال b, e, l_j) شامل تنها یک ساختار میدان EM منفرد خواهند بود. در تطبیق دادن هر دو این موارد (یعنی CSEM و MT) باید بردار جواب و نوع داده مربوطه برای مسائل EM سه‌بعدی تعیین شوند که برای هر تعداد از قطبش‌های چشمه جفت شده را اجازه می‌دهد که توسط یک متغیر (به‌عنوان مثال، $nPol$) در ساختار داده‌ها تعریف شده است. این باعث می‌شود رفتار مسئله مشترک MT / CSEM ساده باشد - به‌عنوان مثال، آرایه بردار جواب e می‌تواند شامل جواب‌هایی برای هر دو نوع داده EM باشد، برخی با داشتن $nPol=1$ ، و برخی با $nPol=2$ که با مورد مناسب توسط ارجاع به دیگشنری فرستنده انتخاب شده است.

ماژول حل‌کننده پیشرو لایه واسط، جواب‌های الحاقی و پیشرو را مدیریت می‌کند که شامل راه‌اندازی چشمه‌ها و/یا شرایط مرزی برای مسئله پیشرو است. این ماژول به این ترتیب باید عملکردهای کمی متفاوت برای مسائل MT و CSEM ارائه دهد. برای مسئله پیشرو MT، هر فراخوانی در fwdSolver نیازمند به دو فراخوانی در حل‌کننده FD با شرایط مرزی برای دو قطبش چشمه (به‌عنوان مثال توسط حل مسائل

دوبعدی پیشرو برای فرکانس مناسب، تعریف شده توسط ITX محاسبه شده است) می‌باشد. راه‌حل‌های الحاقی (مشترک) به‌طور مشابه نیاز به یک جفت فراخوان حل‌کننده FD دارند (در حال حاضر شرایط مرزی در هر دو مورد همگن هستند، اما چشمه‌ها متفاوت خواهد بود). البته تنها به‌طور کلی یک فراخوانی حل‌کننده FD در مورد CSEM نیاز خواهد بود، هر دو برای مسائل پیشرو و برای الحاقی. تفاوت مهم‌تر این است که برای بسیاری از مسائل CSEM (به‌عنوان مثال، با چشمه‌های نقطه دو قطبی) استفاده از یک فرمول میدان ثانویه برای مسئله پیشرو طبیعی است. این می‌تواند به سادگی با تغییراتی تنها در سطح لایه واسط پیاده شده باشد؛ با استفاده از یک مازول پشتیبانی که مسئله پیشرو را با یک تحلیل رسانندگی زمینه حل می‌کند. این در نسخه CSEM از مازول حل‌کننده پیشرو استفاده شده است؛ که روال `initSolver` آنومالی-های رسانندگی و زمینه را تنظیم می‌کند و محاسبات اولیه برای حل یک‌بعدی (با استفاده از حل‌کننده پیشرو CSEM یک‌بعدی از [Key, 2009])، با تمام نتایج ذخیره شده انجام می‌شود. سپس، در هر فراخوانی در `fwdSolver` محل مناسب و فرکانس از فرهنگ فرستنده استخراج شده، و حل زمینه یک‌بعدی برای این فرستنده، و پس از آن نیرو برای حل میدان ثانویه محاسبه می‌شود. سپس حل‌کننده FD فراخوانی شد تا میدان ثانویه سه‌بعدی را محاسبه کند که به جواب زمینه یک‌بعدی اضافه می‌شود. جواب میدان کلی توسط `fwdSolver` بازگشت داده می‌شود. همه این تفاوت‌ها در پیاده‌سازی، هم از حساسیت سطح بالاتر و روال‌های وارون‌سازی و هم از کدهای FD سطح پایین‌تر پنهان شده‌اند [Alumbaugh et al., 1996].

برای یک مسئله ساده CSEM، که در آن داده‌ها، مشاهدات مستقیم مؤلفه‌های میدان هستند؛ در حال حاضر به‌عنوان عملکرد ضروری تابعی‌ها، درون‌یابی پایه ارائه شده است. در این مورد `Lrows` فقط یک جلد بسته‌بندی است که تابع درون‌یابی مناسب (تعیین شده توسط دیگشتری گیرنده) و بسته‌های خروجی را به‌عنوان یک بردار تنک فراخوانی می‌کند. همچنین روال پیشرو `dataResp` ساده است، اما در مرحله بعدی به شکل ضرب نقطه‌ای بین بردار تنک و بردار جواب، داده پیش‌بینی شده را بازگشت می‌دهد. برای MT

سه بعدی تمام انواع داده‌ها توابعی از عناصر تانسور امپدانس و توابعی غیر خطی ساده از مؤلفه‌های خام میدان هستند. روال dataResp در نتیجه ابتدا تابع‌های درونیابی کلی مورد نیاز برای ارزیابی E_x, E_y, H_x و H_y را محاسبه می‌کند و این‌ها را در حل برای هر دو قطبش به کار می‌گیرد. سپس تانسور امپدانس پیش‌بینی را می‌توان، در ادامه (اگر نیاز بود) توسط تحولات مورد نیاز برای یک نوع داده خاص (به عنوان مثال، محاسبات مقاومت ویژه ظاهری و یا فاز) محاسبه کرد. انواع داده‌های متعدد، با کد مناسب انتخاب شده، توسط یک مورد دستور پشتیبانی می‌شوند. Lrows پیاده‌سازی خطی این محاسبات است و با ترکیبات خطی از تابع‌ها، درونیابی کلی شکل می‌گیرد. هیچ یک از ضرایب درونیابی نوار باریک سه خطی (λ^D و λ^P) در ضمیمه ۳) و نه عملگر انتقال T تعریف شده در معادله (۳-۱۴) به طور مستقیم به m بستگی ندارد؛ بنابراین $Q \equiv 0$. به این ترتیب Qrows به سادگی خروجی $q_j = 0$ را می‌دهد که برای پیاده‌سازی MT و CSEM بحث شده است. در نهایت، فرم ماتریس P می‌تواند به راحتی مشتق شود، عبارات (۳-۱۲) با (۳-۷) و با استفاده از عبارات (۳-۸) و (۳-۱۵)، با تطبیق $S_0 \equiv C^\dagger C$ ، عبارت رسمی به صورت زیر است:

$$P = \text{diag}(-i\omega\mu e_0)\Pi_{m_0} = \text{diag}(-i\omega\mu e_0)W[\text{diag}(\exp(m_0))] \quad (۳-۱۶)$$

که در آن W نگاشتی از پارامتر مدل به شبکه اولیه است. به هر حال توجه داشته باشید که برای مورد MT بردار جواب زمینه $e_0 = (e_{0,1} \text{ و } e_{0,2})$ شامل جواب‌های FD برای دو قطبش چشمه و ضرب $P\delta m$ توسط P_{mult} محاسبه می‌شود. در واقع نتایج در یک چشمه که قید برای یک جفت مسئله پیشرو توسط اولین ارزیابی δm ، $P_{\text{mult}}T$ به $W[\text{diag}(\exp(m_0))]$ ضرب نقطه‌ای توسط $-i\omega\mu e_{0,K}$ ؛ $K=1,2$ محاسبه شده است. برای P_{mult} ورودی یک بردار جواب $e = (e_1 \text{ و } e_2)$ است. اکنون ابتدا $([e_{0,2}] \ e_2 \text{diag} + [e_{0,1}] \ e_1 \text{diag})$ محاسبه می‌شود و سپس نقشه‌برداری پارامتر مدل الحاقی $\Pi_{m_0}^T$ را اعمال می‌کنیم که در پارامتر مدل نتیجه می‌شود.

فصل چهارم

وارون سازی

داده های MT

۴-۱ مقدمه

مولفه‌ی USarray، برنامه‌ی ژئوفیزیکی در مقیاس قاره‌ای است که قیدهای جدیدی را برای ساختار و تکامل قاره آمریکای شمالی فراهم می‌کند. داده‌های MT دوره بلند (۱۰ تا ۸۰۰۰ ثانیه) با آرایه‌ی قابل حمل لرزه‌ای (TA)، قاره آمریکا را در مناطق انتخاب شده با تراکم سایت قابل توجهها فاصله‌ی تخمینی ۷۵ کیلومتر پوشش خواهد داد. اولین داده‌ی MT در اورگان شرقی در ۳۰ سایت در تابستان ۲۰۰۶ به‌دست آمد؛ که در ادامه ۸۰ سایت در غرب اورگان (یعنی تمام ایالت واشنگتن و ایداهو غربی) در تابستان ۲۰۰۷ را پوشش داد. در مقایسه با عملیات‌های MT قدیمی که سایت‌ها در طول یک یا چند پروفیل متمرکز شده بودند؛ سایت‌ها به‌طور گسترده فاصله‌گذاری شدند تا پوشش شبه یکنواختی از کل داده فراهم شود. این پیکربندی آرایه و پیچیدگی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه (شکل ۴-۱)، به‌طور موثر تفسیر سه‌بعدی را می‌طلبد. آرایه‌ی MT، منطقه‌ی گسترده‌ای از محیط زمین‌شناسی را پیمایش می‌کند؛ از صفحه‌ی فرورونده‌ی JDF در غرب، سرتاسر کمان آتشفشانی کسکید و در فلات کلمبیا، بیابان‌های^۱، رودخانه‌ی وسترن اسنیک^۲، دشت و حوزه‌ی شمال غربی و استان‌های حدفاصل تا شرق هستند.

شکستگی بزرگ لیتوسفر^۳ اقیانوسی ضخیم در حاشیه‌ی شمال غرب اقیانوس اطلس نزدیک کوه‌زایی لارامید^۴ ایجاد شد؛ که موقعیت جدید صفحه‌ی فرورونده به‌طور تخمینی ۴۸ میلیون سال قدمت دارد [Madsen et

al., 2006]

¹high

²western snake

³Lithosphere

⁴Laramid orogeny

از ۱۷ تا ۱۲ میلیون سال پیش، بازالت‌های بزرگ در واشنگتن و اورگان فوران کردند و اکثر فلات کلمبیا را پوشش دادند. این فوران با دوره فورانی سیلیسی پیش‌رونده که تا عصر حاضر ادامه می‌یابد دنبال شده است و در دشت اسنیک ریور^۱ و دشت‌های لاوای بلند اورگان شرقی را نتیجه داده است [Roth, 2008].

در یک مورد گسترده‌تر، بیشتر پوسته‌ی آمریکای غربی که محل تقاطع آرایه‌ها و منطقه‌ی گسترده‌ی برش جانب-راستی است؛ تغییر شکل می‌یابد [Humphreys and Coblenz, 2007].

۴-۲ ساختار رسانندگی منطقه‌ای Cascadia:

نتایج اولیه از وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های MT آرایه‌ی قابل انتقال USArray

در ارتباط با مؤلفه‌ی قاره مقیاس USArray، داده‌های دوره بلند MT (۱۰ تا ۱۰۰۰۰ ثانیه)، در سرتاسر قاره آمریکا مورد نیاز می‌باشند. در داده‌های حاصل از سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ آرایش‌های اولیه در ۱۱۰ سایت با فاصله‌ی یکنواخت ۷۵ کیلومتر به‌عنوان آرایه‌ی قابل انتقال لرزه‌ای USArray، شمال غرب اقیانوس اطلس در آمریکا را پوشش می‌دهد. برجسته‌ترین عوارض آشکار شده با وارون‌سازی اولیه‌ی سه‌بعدی این مجموعه داده، حاصل شد که به‌وسیله‌ی آن مناطق گسترده‌ای از رسانندگی بالا در پوسته پایینی اورگان جنوب‌شرقی و زیر کوه‌های Cascadia آشکار شد؛ که با پوسته‌ی با مقاومت‌ویژه بالا در سیلتزیا و خلیج کلمبیا تباین داشت. تغییرات قابل توجه در رسانندگی گوشته بالایی به‌عنوان رساناترین قسمت گوشته در زیر واشنگتن بک آرک^۲ و مقاوم‌ترین قسمت گوشته که مربوط به گوشته‌ی اقیانوسی پایین رفته است با وارون‌سازی‌ها آشکار می‌شود.

¹Snake River

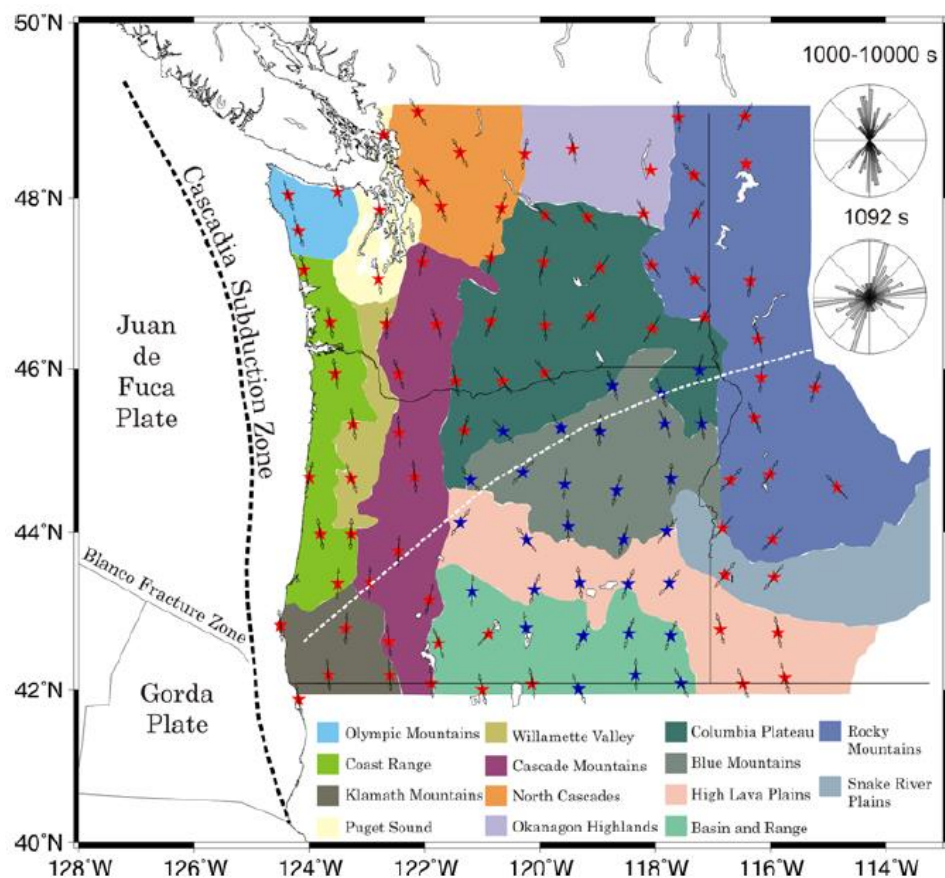
²Washington backarc

۴-۳ داده‌ی MT و آنالیز آن

داده‌های MT توسط یک پیمانکار تجاری (GSY-USA) با استفاده از ابزارالات MT دوره بلند مرسوم، بر اساس مگنتومترهای فلاکس گیت حاصل شد. داده‌های سری زمانی (نوعاً با دوره‌ی سه هفته‌ای) با استفاده از روش کنترل از راه دور قوی استاندارد پردازش شده است [Egbert, 1997].

در اکثر موارد منحنی‌ها پاسخ یکنواخت در محدوده‌ی دوره‌ی ۱۰ تا ۱۰۰۰۰ ثانیه نتیجه می‌دهد. گرچه جابه‌جایی ایستای قابل توجهی در مقاومت‌های ویژه ظاهری وابسته به موقعیت سایت وجود دارد؛ نقشه‌های فضایی فازها به‌طور کلی خوش‌رفتارند و عوارض همدوس مقیاس بزرگ را نمایش می‌دهند.

بردارهای القایی که از نسبت مؤلفه‌ی میدان مغناطیسی عمودی به افقی محاسبه می‌شود؛ نشان‌دهنده‌ی تباین رسانندگی جانبی هستند. برای آرایه‌ی Cascadia شدیداً در قسمت غربی آرایه تاثیر می‌پذیرند؛ اما دیگر آنومالی‌ها، با رسانندگی قابل توجهی همراه با جهت‌گیری‌های متفاوت آشکار می‌شوند؛ همان‌طور که در شکل (۴-۱) خلاصه شده است. آنالیز امتداد ژئوالکتریک براساس تانسور تجزیه در ادامه تایید می‌کنند که هیچ امتداد ژئوالکتریک سازگاری که اجازه‌ی تفسیر دوبعدی این داده را بدهد وجود ندارد [Egbert, 2008].



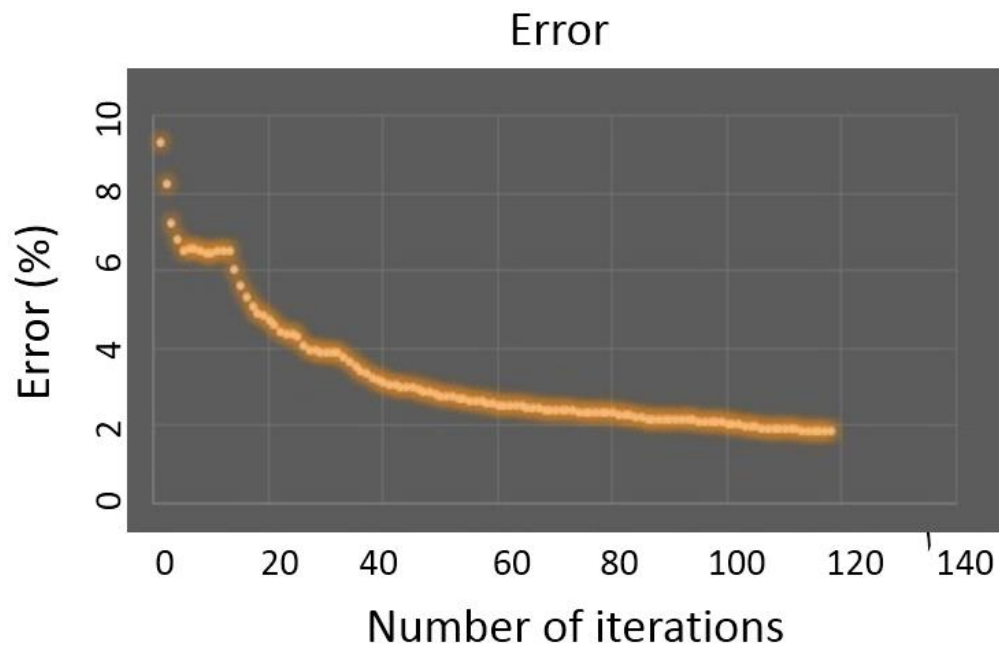
شکل (۴-۱): محل سایت‌های جمع آوری شده در سال ۲۰۰۶ (ستاره‌های آبی) و ۲۰۰۷ (ستاره‌های قرمز) در یک نقشه جغرافیایی ایالت‌ها (روزنفلد^۱، ۱۹۸۵). پیکان‌های سیاه رنگ جهت‌های استرایک ژئوالکتریکی را توسط اعوجاج مناسب مدل اسمیت (۱۹۹۷) برای پرپودهای ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ ثانیه تعیین می‌کنند [Egbert, 2008].

۴-۴ وارون‌سازی سه‌بعدی

در این قسمت از برنامه‌ی ModEm به‌عنوان یک برنامه‌ی وارون‌سازی منظم با به‌کارگیری ۴ مؤلفه تانسور امپدانس برای ۱۰۹ سایت با داده‌های با کیفیت قابل توجه استفاده شده است. مدل ابعاد کلی $1460 \times 1590 \times 550$ کیلومتر را داراست؛ که شامل شبکه‌بندی با تعداد ۸۰ المان در جهت مختصات x ($80 = N_x$)، ۷۸ المان در جهت y ($78 = N_y$) می‌باشد و در راستای قائم شبکه ۳۴ لایه ($34 = N_z$) به‌عنوان

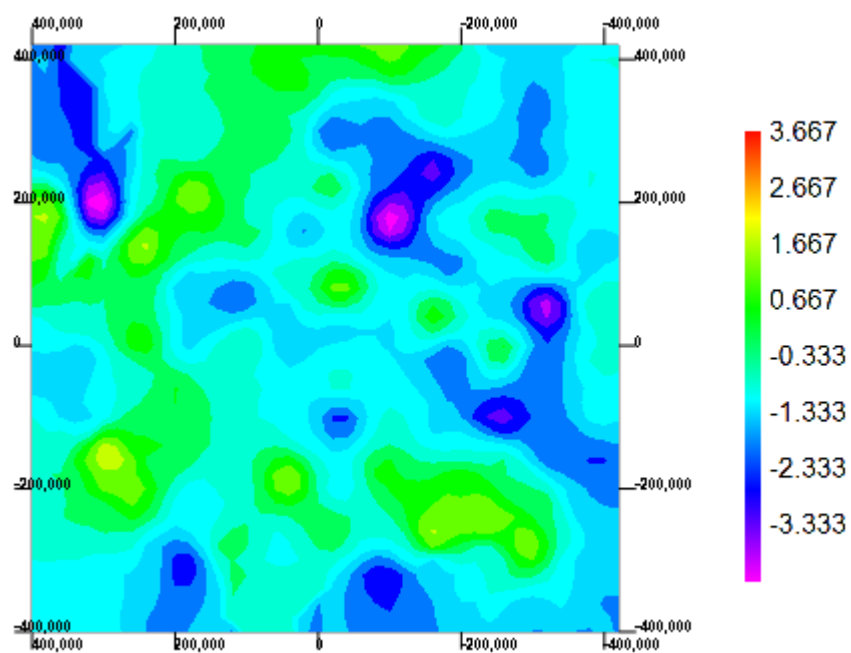
¹Rosenfeld

ساختار زمین و ۷ لایه اضافه برای هوا دارد. اقیانوس آرام با عمق ۴۸۰ کیلومتر و رسانندگی واقعی ($3/33\text{S/m}$) در غرب ساحل گسترده شده است. امپدانس‌های مربوط به ۸ دوره تناوب (۱۰۰ تا ۸۰۰۰ ثانیه) برای وارون‌سازی انتخاب شده‌اند. برای این داده‌ی نسبتاً محدود شده، کد وارون‌سازی برای هر تکرار بر یک کامپیوتر با ۲۳ پردازنده ۵ دقیقه زمان نیاز دارد که به‌طور اساسی ۲۳ پردازنده در دسترس را استفاده می‌کند. همان‌طور که در شکل (۲-۴) مشاهده می‌شود، با افزایش تعداد تکرارها مقدار خطای RMS کاهش یافته است که این به دلیل همگرایی کد می‌باشد.

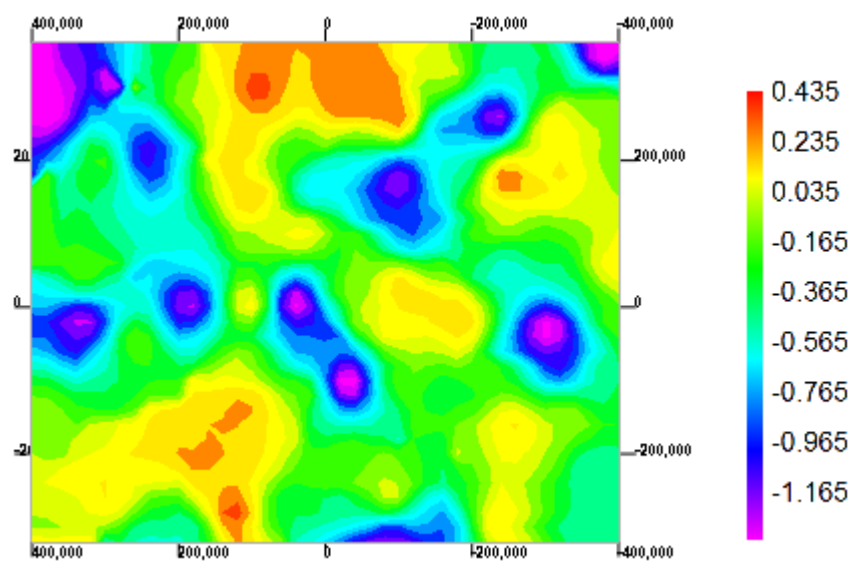


شکل (۲-۴): نمودار خطای مراحل تکرار شونده در مقابل تعداد تکرارها

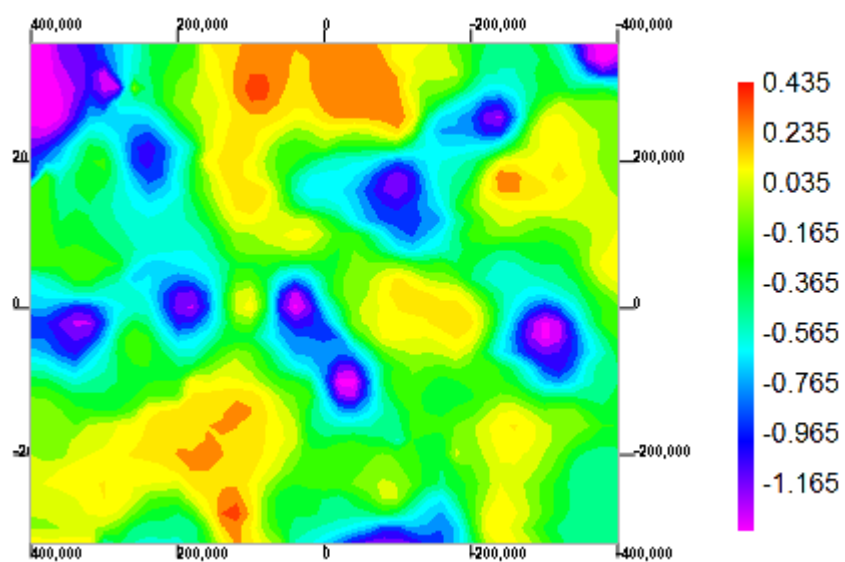
پس از اتمام وارون‌سازی نتایج به‌دست آمده توسط سیستم مدولار ModEm که شامل مدل‌های مقاومت‌ویژه و فاز می‌باشد، رسم می‌شود. تمامی این مدل‌ها مربوط به تکرار ۱۶۲ و با درصد خطای $1/75798$ و با میانگین زمانی ۱۲ ساعت برای تمام تکرارها می‌باشند.



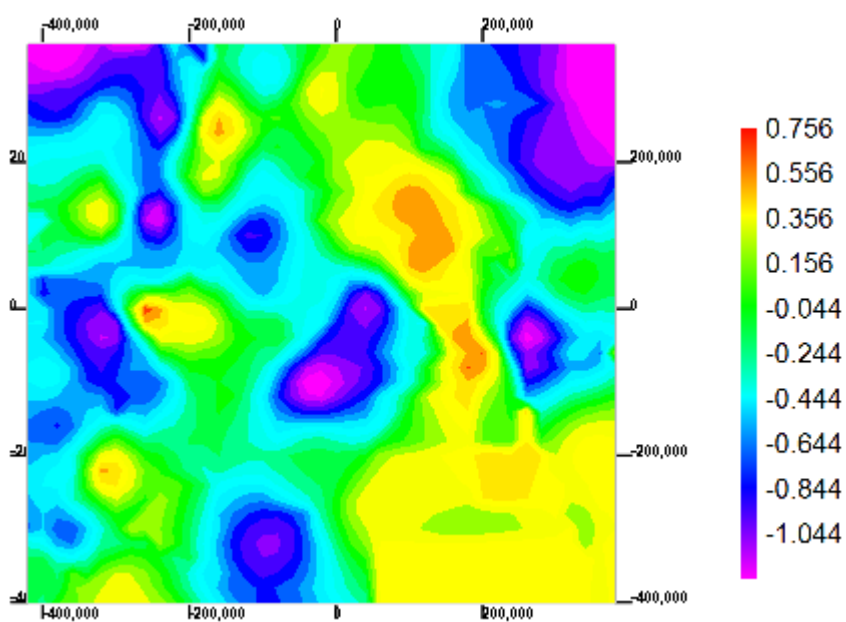
(الف)



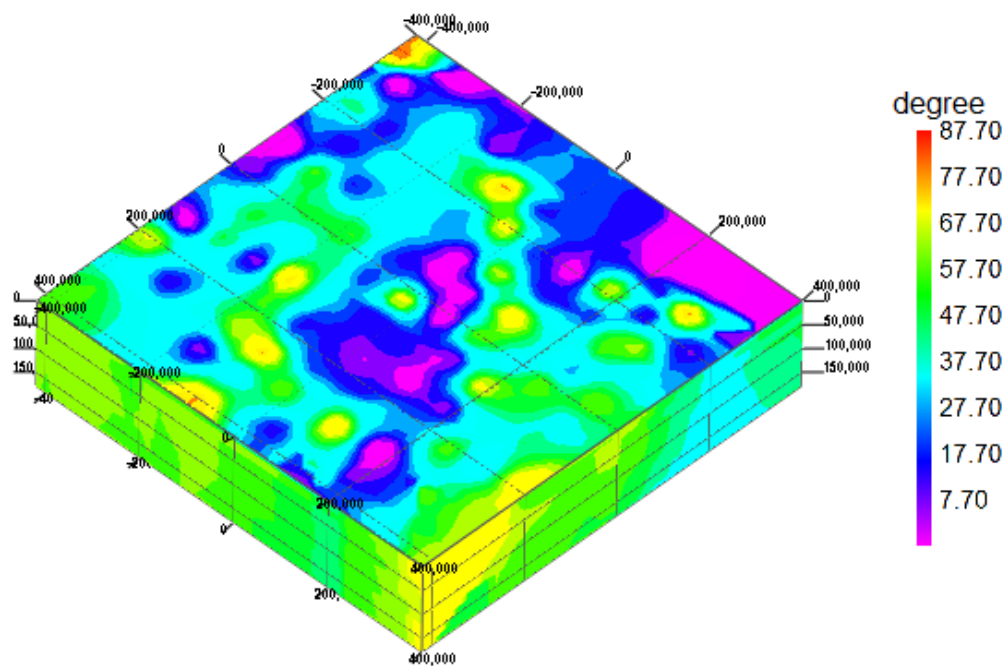
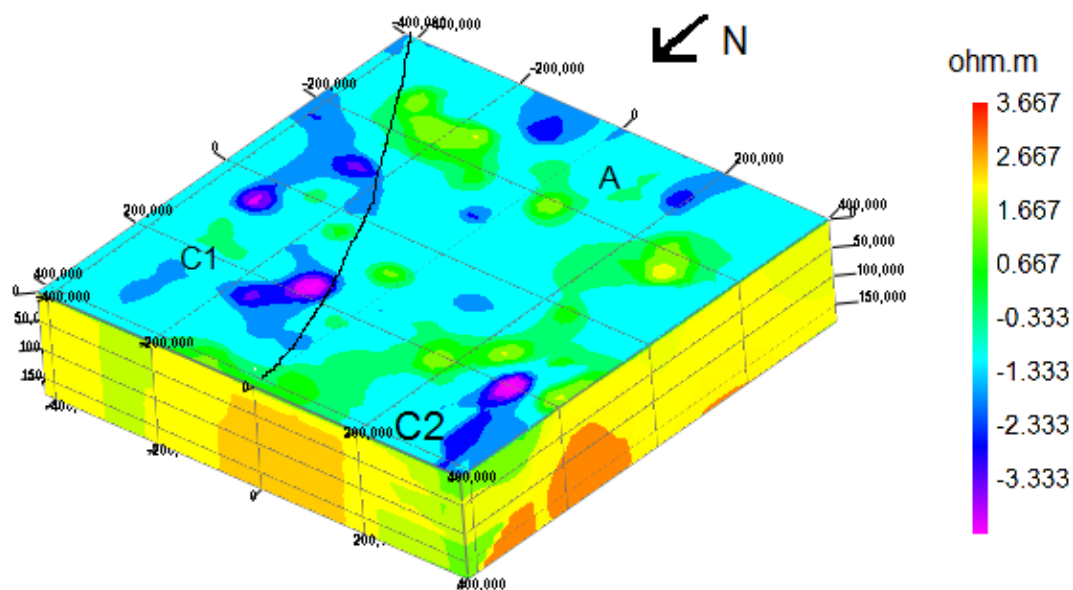
(ب)



(a)



(b)

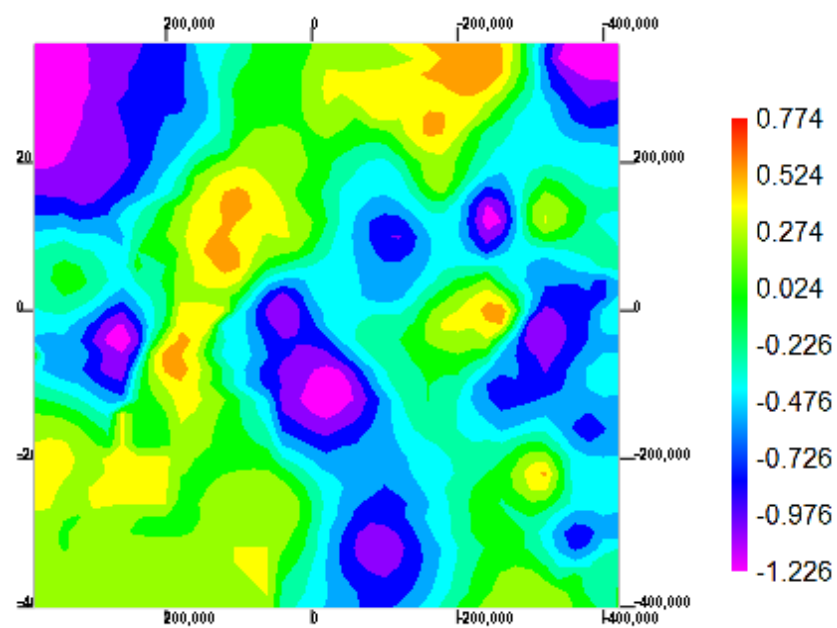


(ه)

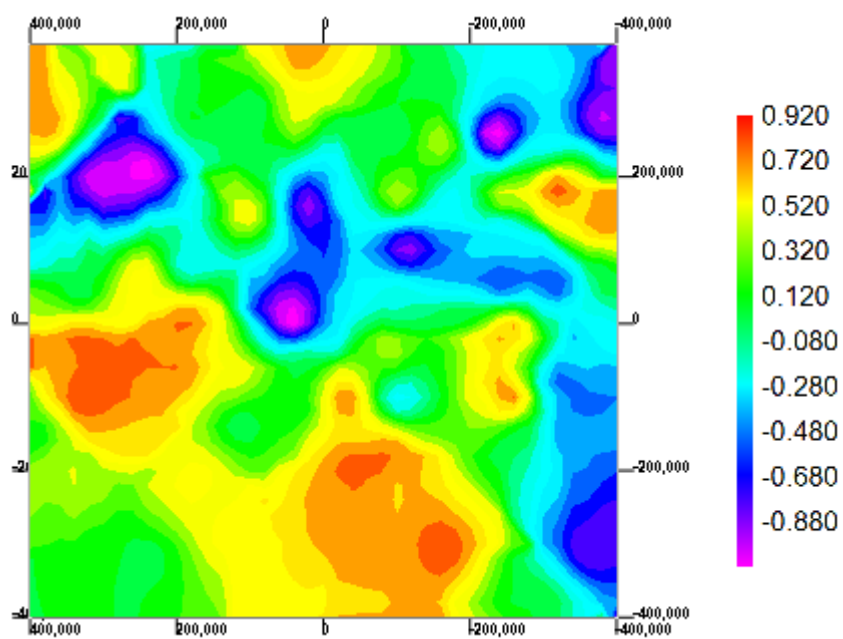
شکل (۳-۴): الف) مقطع مقاومت ویژه در ۱ کیلومتری؛ ب) مقطع مقاومت ویژه در عمق ۵۰ کیلومتری؛ ج) مقطع مقاومت ویژه در عمق ۱۰۰ کیلومتری؛ د) مقطع مقاومت ویژه در عمق ۱۵۰ کیلومتری؛ ه) مدل مقاومت ویژه (Ωm) و فاز شده برای عمق ۰ تا ۱۵۰ کیلومتر

با توجه به شکل (۴-۳، ۵) برجسته‌ترین عارضه آشکار شده با وارون‌سازی یک رسانا گسترده پوسته زیریناست (C1 در شکل (۴-۳، ۵))؛ که منطقه‌ی مثلثی (در جنوب شرق خط سیاه نقطه‌ای که از ساحل نزدیک مرز کالیفرنیا تا لبه‌ی شرقی آرایه نزدیک مرز واشنگتن - اورگان ادامه دارد) را اشغال می‌کند. این عوارض رسانا در زیر حوزه-رشته‌کوه شمال‌غرب، دشت‌های لاوای بالا، دشت snake river غربی و رشته‌کوه‌های آبی گسترده می‌شوند. تماس بین C1 و پوسته‌ی مقاوم‌تر تا شمال غرب به عنوان مرز جنوبی طبقه سنگی ایجاد شده‌ی اقیانوسی یعنی Siletzia تفسیر می‌شود.

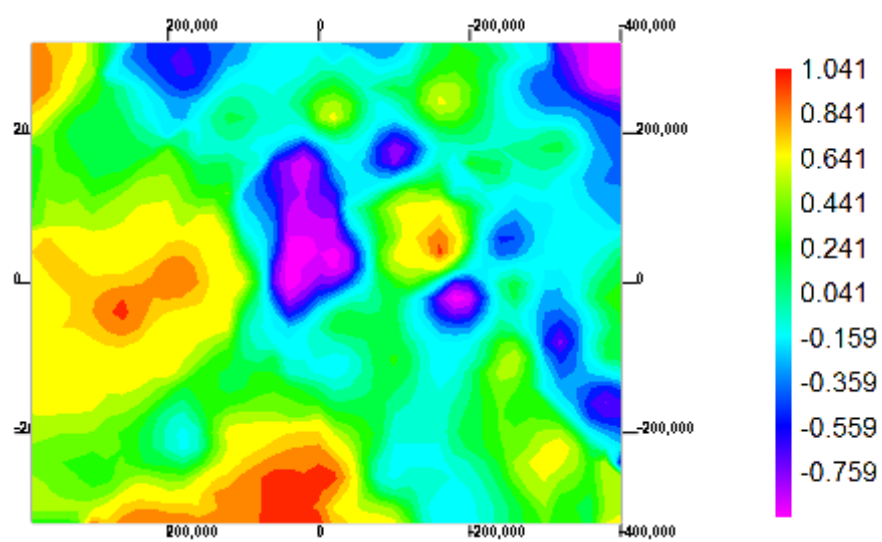
چندین نشانه رسانندگی‌پذیری بالاتر در بالای اسلب پیشرو به سمت غرب وجود دارد که در طول آن حاشیه‌ی زیادی وجود دارد (مورد A در شکل (۴-۳)) که این از آبدایی رسوب‌های فرورفته استنباط می‌شود. چندین منطقه‌ی دیگر دال بر رسانندگی پوسته‌ای بهبود داده شده در شکل (۴-۳) وجود دارد. برای مثال، رسانا پوسته‌ای C2 در نزدیکی گوشه‌ی شمال‌شرق آرایه آشکار است. این عارضه در نزدیکی مرز شمالی به نظر کم عمق‌تر می‌باشد ولی وقتی به سمت جنوب شرق ادامه می‌یابد عمیق‌تر می‌شود، جایی که شاید بعداً به عوارض رساناتر در گوشه متصل شود.



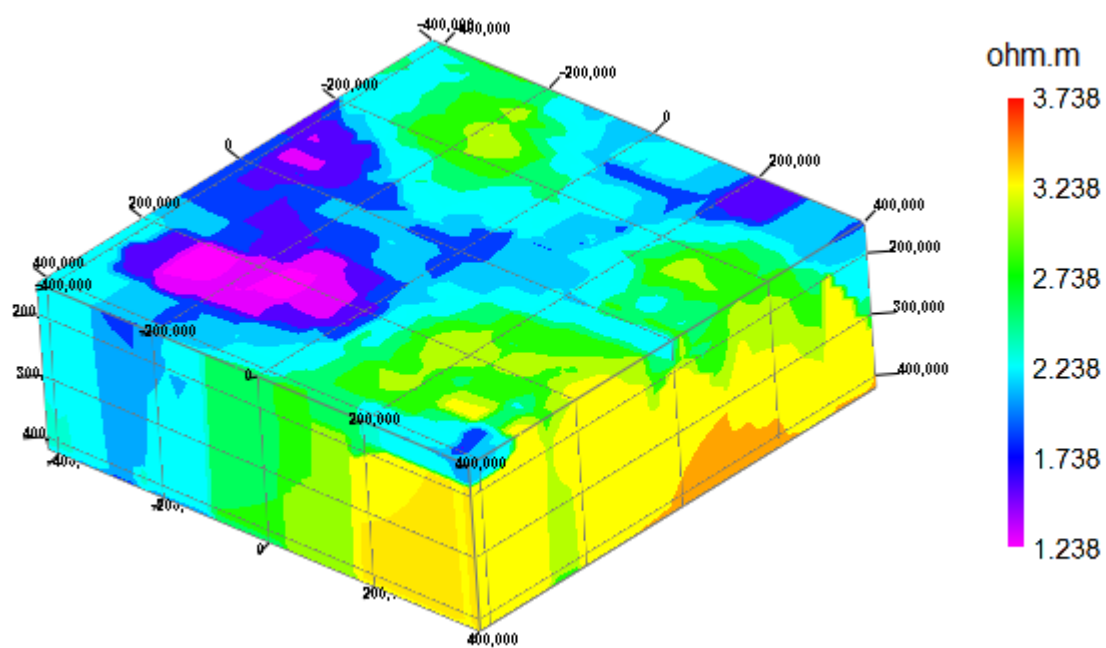
(الف)



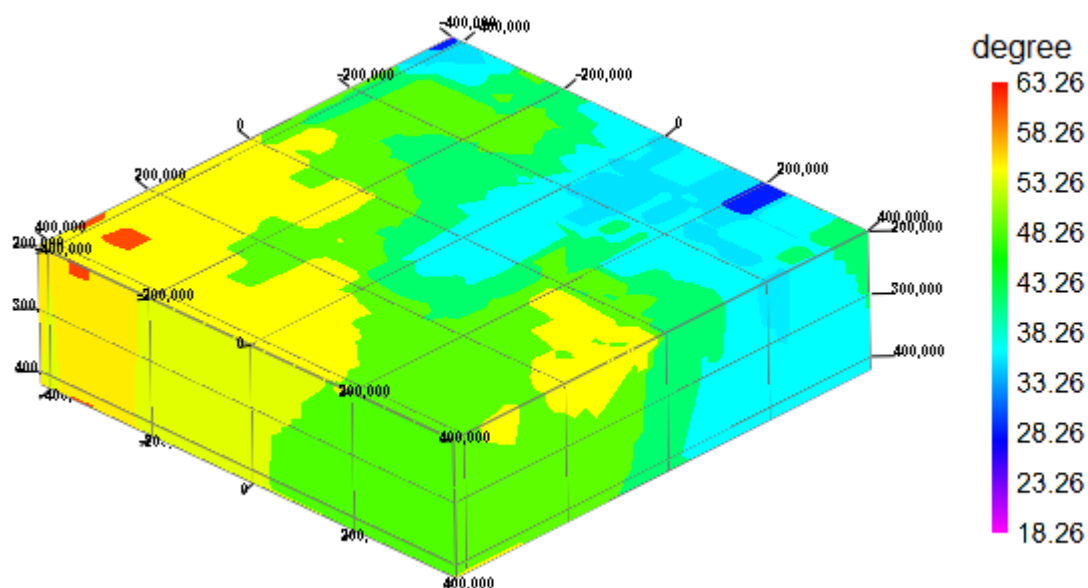
(ب)



(c)



(d)



(د)

شکل (۴-۴): الف) مقطع مقاومت ویژه در عمق ۲۰۰ کیلومتری؛ ب) مقطع مقاومت ویژه در عمق ۳۰۰ کیلومتری؛

ج) مقطع مقاومت ویژه در عمق ۴۰۰ کیلومتری؛ د) مدل مقاومت ویژه (Ωm) و فاز رسم شده برای عمق ۲۰۰ تا ۴۰۰ کیلومتر

در شکل (۴-۴، د) تمام مناطق تحت بررسی با طول جغرافیایی (۴۰۰۰۰ تا -۴۰۰۰۰۰) و محدود به عرض جغرافیایی (۰ تا ۴۰۰۰۰۰) دارای فاز بالا هستند که در مختصات با گستردگی عرض (۰ تا ۲۰۰۰۰۰) و طول (۴۰۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰) به بیشترین مقدار می‌رسد. این مختصات بر روی مقطع لگاریتم مقاومت ویژه نشان دهنده‌ی کمترین مقادیر مقاومت ویژه می‌باشند. مقدار بالای فاز و کمترین مقادیر مقاومت ویژه نشان دهنده‌ی یک منطقه‌ی رساناست که در عمق ۲۰۰ کیلومتر واقع شده است.

جدول (۴-۱): نمایش مقادیر داده‌های باقی‌مانده مربوط به یک ایستگاه اندازه‌گیری

مؤلفه موهومی داده‌های باقی‌مانده	مؤلفه حقیقی داده‌های باقی‌مانده	دوره تناوب (ثانیه)
۰/۰۰۰۱۰۷	۰/۰۰۰۰۶۰۲	۱۰۲
۰/۰۰۰۰۳۳۳	۰/۰۰۰۰۸۱۷	۲۱۶
-۰/۰۰۰۰۰۷۴۵	۰/۰۰۰۰۶۶۸	۵۲۹
۰/۰۰۰۰۱۳۳	۰/۰۰۰۰۴۲۶	۱۰۹۰
۰/۰۰۰۰۲۲۴	۰/۰۰۰۰۳۵	۲۲۶۰
۰/۰۰۰۰۰۳۹۹	۰/۰۰۰۰۴۵۵	۳۱۲۰
۰/۰۰۰۰۲۰۷	۰/۰۰۰۰۵۸۲	۴۶۸۰
۰/۰۰۰۰۰۶۸	۰/۰۰۰۰۶۵۱	۷۲۸۰

همان‌طور که در جدول بالا قابل مشاهده است تمام اختلاف مقادیر داده‌های اندازه‌گیری شده و به‌دست آمده از سیستم ModEm بسیار کوچک و نزدیک به مقدار صفر می‌باشند. مقدار کوچکی این نتایج برای تمام ایستگاه‌ها بررسی شده و با وجود این اطلاعات می‌توان نتیجه گرفت که سیستم مدولار ModEm برای مسئله مدل‌سازی وارون سه‌بعدی کارا می‌باشد و نتایج آن قابل اعتماد هستند.

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و

پیشنهادهات

۵-۱ نتیجه گیری

این پایان نامه اولین تحقیق در زمینه مدل سازی وارون سه بعدی بر روی داده های MT در ایران می باشد بر همین اساس نتایج با احتیاط بررسی شده است.

می توان نتایج وارون سازی داده های Cascadia را با دو برنامه ModEm و WSINV3D مقایسه و ارزیابی کرد.

داده های منطقه Cascadia به منظور مدل سازی سه بعدی مورد مطالعه قرار گرفت. در این مطالعه برای وارون سازی از برنامه WSINV3D استفاده شد. این وارون سازی در ۱۱ روز برای هر تکرار بر یک پردازشگر کامپیوتر منفرد انجام و در نهایت داده های تکرار دوم با خطای ۷,۲۸۲ مدل و تفسیر شد [Prasanta and Egbert, 2008]. در حالی که وارون سازی توسط برنامه ی ModEm برای ۱۶۲ تکرار ۱۲ ساعت و به طور تقریب برای هر تکرار ۵ دقیقه زمان نیاز داشته است و تکرار آخر با شماره ی ۱۶۲ به مقدار خطای ۶,۵۱۱۰۴ دست یافته است. نتایج به دست آمده از این برنامه هماهنگ با نتایج خروجی برنامه WSINV3D می باشند. در مورد مقایسه ی این دو روش می توان گفت که با توجه به این که زمان محاسبات و در نهایت خروجی هر تکرار در روش ModEm بسیار کمتر از روش WSINV3D می باشد، توانمندی کد وارون سازی ModEm قابل درک است؛ چنان چه می دانید زمان در انجام محاسبات نقش کلیدی ایفا می کند چرا که ارتباطی مستقیم با هزینه دارد.

۵-۲ پیشنهادات

تاکنون مدل سازی وارون سه بعدی بر روی داده های MT اکتشافی منابع نفتی در ایران صورت نگرفته است. پیشنهاد می شود ابتدا در یکی از مناطق نفت خیز ایران برداشت داده MT به منظور اکتشافات نفتی صورت پذیرد و سیستم مدولار ModEm برای مدل سازی وارون سه بعدی این داده ها به کار گرفته شود. می توان

نتایج حاصل از این روش را با خروجی سایر روش‌ها همچون داده‌های لرزه‌ای، زمین‌شناسی، چاه‌پیمایی و ... مورد مقایسه و در صورت پذیرش توانمندی این روش، آن را جهت اکتشافات بعدی مخصوصاً در مناطقی که روش‌های لرزه‌ای کارا نمی‌باشند، مورد استفاده قرار داد.

در این جا و در ادامه پیشنهاد می‌شود که این کد برای شرایطی که توپوگرافی نیز لحاظ می‌شود ارتقا داده شود.

منابع

- ابطحی س.م، فتحیان پور ن و هاشم الحسینی ح، (۱۳۸۹)، "ارائه الگوریتمی جدید برای مدل سازی پیشرو سه بعدی در مگنتوتلوریک"، نشریه روش های عددی در مهندسی، شماره ۲، دوره ۲۹: ص ۳۳.
- Alumbaugh D.L. et al., (1996) "Three-dimensional wide band electromagnetic modeling on massively parallel computers" Radio Sci. 33, 1–23.
- Aprea C. M. and J. Booker. (1998) "Resistivity structure of the Olympic Mountains and Puget Lowlands" Geophys. Res. Lett., 25, 109–112.
- Blaricom R.(1980) "Practical Geophysics for the Exploration Geologist" , Northwest Mining Association, 439–535.
- Camp V. E. and M. E. Ross (2004)"Mantle dynamics and genesis of mafic magmatism in the intermontane Pacific Northwest" J. Geophys. Res., 109, B08204, doi: 10.1029/2003JB002838.
- Chave A. D. and Smith T. J.(1994)"On electric and magnetic galvanic distortion tensor decompositions" J. Geophys. Res., 99, 4669–4682.
- Constable S.C. and et al., (1987)"Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data" Geophysics., 52 (March (3)), 289–300.
- Egbert G. (1997)"Robust multiple station magnetotelluric data processing" Geophysical Journal International., 130, 475-496.

Egbert G. D. (2006)"Efficient Inversion of Multi-frequency and Multi-Source Electromagnetic Data" Final Project Report. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Oregon State University.

Egbert G.D. and Patro P.K.(2008)"Regional conductivity structure of Cascadia" Geophysical research letters., 35, 15-20.

Egbert G.D.(2012)"Hybrid conjugate gradient-Occam algorithms for inversion of multi-frequency and multi-transmitter EM data" Geophys. J. Int., 190, 255–266.

Egbert G.D. and Kelbert A.(2012)"Computational recipes for electromagnetic inverse problems" Geophys. J. Int., 189, 167–251.

Gough D. I. and et al., (1989)"Conductive structures and tectonics beneath the EMSLAB land array" J. Geophys. Res., 94(B10), 14,099– 14,110.

Groom R.W. and Bailey R.C.(1989)"Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion" J. Geophys. Res.,94, 1913–1925.

Groom R.W. and Bailey R.C. (1991)"Analytical investigation of the effects of near surface three-dimensional galvanicscatterers on tensor decompositions" Geophysics., 56, 496-518.

Heinson G.and et al.,(2006)"Magnetotelluric evidence for a deep-crustal mineralizing system beneath the Olympic Dam iron oxide copper-gold deposit, southern Australia" Geology., 34, 573–576.

Humphreys E. D. and Coblenz D. D. (2007)"North American dynamics and western U.S. tectonics" Rev. Geophys., 45, RG3001, doi:10.1029/ 2005RG000181.

Jackson D. D. (1972)"Interpretation of Inaccurate, Insufficient and Inconsistent Data" Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society., 82(2), 97-109.

Jiracek G. R. (1990)"Near-surface and topographic distortion in electromagnetic induction" Surveys in Geophysics., 11, 163-203.

Jones A. G.(1988)"Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment" Geophysics.,53, 967–978.

Kelbert A. and et al., (2008)"Non-linear conjugate gradient inversion for global EM induction" resolution studies. Geophys. J. Int., 173 (2), 365–381.

Keller V. G. (1988)"Physical Laws, Electromagnetic Induction and Rock Properties" Chap. 2, pages 13{51 of: Nabighian, Misac N. (ed), Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysics (SEG).

Key K.(2009)"1D inversion of multicomponent, multifrequency marine CSEM data: methodology and synthetic studies for resolving thin resistive layers" Geophysics., 74 (2), F9–F20.

Li X. and Pedersen L. B.(1991)"The electromagnetic response of an azimuthally anisotropic half space" Geophysics., 56, 1462-1473.

Mackie R. L. and et al.,(1994)"Three-dimensional electromagnetic modeling using finite difference equations" The magnetotelluric example. Radio Sci., 29(4), 923-935.

Madsen J. K. and et al.,(2006) "Cenozoic to Recent configuration in the Pacific Basin: Ridge subduction and slab window magmatism in western North America" Geosphere., 2, 11 –34, doi:10.1130/GES00020.1.

Marti A. (2006), Ph.D. thesis, "A Magnetotelluric Investigation of Geoelectrical Dimensionality and Study of the Central Betic Crustal Structure", Departament de Geodinàmica i Geofísica. Universitat de Barcelona.

McCrory P. A. and et al., (2003) "Depth to the Juan de Fuca slab beneath the Cascadia subduction margin A 3-D model for sorting earthquakes [CD-ROM]" U.S. Geol. Surv. Digital Data Ser., 1.

McGillivray P.R. and et al., (1994) "Calculation of sensitivities for the frequency-domain electromagnetic problem. Geophys" J. Int. 116 (January (1)), 1–4.

Meqbel N. (2009), Ph.D. thesis, "The Electrical Conductivity Structure of the Dead Sea Basin Derived from 2D and 3D Inversion of Magnetotelluric Data", Free University of Berlin, Berlin, Germany.

Moradzadeh A. (2003) "satatic shift appraisal and its correction in magnetotelluric survey", the 21 th symposium on geoscience, Tehran, Iran.

Nabighian M. N. (1991) "Electromagnetic methods in applied geophysics" Society of Exploration Geophysicists.

Newman G.A. and Alumbaugh D.L. (1997) "Three-dimensional massively parallel electromagnetic inversion" J. Int., 128 (February), 345–354.

Newman G.A. and Alumbaugh D.L. (2000) "Three-dimensional magnetotelluric inversion using non-linear conjugate gradients" Geophys. J. Int. 140, 410–424.

Newman G.A. and Hoversten G.M. (2000) "Solution strategies for two- and threedimensional electromagnetic inverse problems", Inverse Probl. 16, 1357–1375.

Orange, A.S. (1989)"Magnetotelluric exploration for hydrocarbons" Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers, v. 77, p. 287-317.

Parker R. L. and Shure L.(1982)"Efficient modeling of the earth's magnetic field with harmonics splines", Geophys. Res. Let., 9, 812-815.

Parker R. L.(1994)"Geophysical Inverse theory", Princeton Univ.press.

Parkinson W. (1959)"Directions of rapid geomagnetic variations", Geophys J R Astr Soc 2:1–14.

Parsons T. R. and etal.,(1999)"Three-dimensional velocity structure of Siletzia and other accreted terranes in the Cascadia forearc of Washington", J. Geophys. Res., 104(B8), 18,015-18,039.

Porstendorfer G. (1975)"Principles of magneto-telluric prospecting. Geoexploration monographs" Series 1 ; no. 5. Berlin , Stuttgart , Borntraeger.

Prasanta K. Patro and Gary D. Egbert (2008)"Regional Conductivity structure of Cascadia : Preliminary results from 3D inversion of USArray transportable array magnetotelluric data", Geophysical research letters, VOL. 35, L20311, doi:10.1029/2008GL035326, 2008.

Purser R.J.and etal., (2003a)" Numerical aspects of the application of recursive filters to variational statistical analysis", Part I: spatially homogeneous and isotropic Gaussian covariances. Mon. Weather Rev. 131 (8), 1524–1535.

Purser R.J.(2003b) "Numerical aspects of the application of recursive filters to variational statistical analysis" ,Part II: spatially inhomogeneous and anisotropic general covariances. Mon. Weather Rev. 131 (8), 1536–1548.

Rodi W.L. and Mackie R.L.(2001)"Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion", *Geophysics* 66 (1), 174–187.

Roth J. B. and et al., (2008)"Three dimensional seismic velocity structure of the northwestern United States", *Geophys. Res. Lett.*, 35, L15304, doi:10.1029/2008GL034669.

Siripunvaraporn W. and et al., (2002)"Numerical accuracy of magnetotelluric modeling: a comparison of finite difference approximations", *Earth Planets Space* 54 (6), 721–725.

Siripunvaraporn W. and et al.,(2005)"Three dimensional magnetotelluric inversion: data-space method", *Phys. Earth Planet. Inter.* 150 (1–3), 3–14.

Siripunvaraporn W. and Egbert G.D.(2007)"Data space conjugate gradient inversion for 2-D magnetotelluric data", *Geophys. J. Int.*, **170**, 986–994, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03478.x.

Siripunvaraporn and et al.,(2009)"WSINV3DMT: Vertical magnetic field transfer function inversion and parallel implementation", *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 173(3-4), 317-329.

Simpson F. and et al.,(2005)"Practical magnetotellurics" Cambridge UK , New York: Cambridge University Press.

Smith Torquil J. (1996a)"Conservative modeling of 3-D electromagnetic fields", Part I: Properties and error analysis. *Geophysics*, 61(5), 1308-1318.

Smith Torquil J. (1996b)"Conservative modeling of 3-D electromagnetic fields", Part II: Biconjugate gradient solution as an accelerator. *Geophysics*, 61(5), 1319-1324.

Soyer W. and Unsworth M. (2006)"Deep electrical structure of the northern Cascadia (British Columbia, Canada) subduction zone: Implications for the distribution of fluids", *Geology*, 34, 53–56, doi:10.1130/G21951.1.

Stanley W. D. and et al., (1990)"Deep crustal structure of the Cascade range and surrounding regions from seismic refraction and magnetotelluric data", *J. Geophys. Res.*, 95(B12), 19,419–19,438.

Swift C. J., (1967), Ph.D. thesis, "A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southern United states". Department of Geology and Geophysics M.I.T, MA.

Vozoff and Keeva(1972)"The Magnetotelluric Method in the Exploration of sedimentary basins", *Geophysics*, 37(1), 98-141.

Weaver J. T. (1994)"Mathematical Methods for Geo-electromagnetic Induction", *Applied and Engineering Mathematic Series*. Taunton, Somerset, England: Research Studies Press.

Weckmann U. R. and et al.,(2003)"Images of the magnetotelluric apparent resistivity tensor", *Geophysical Journal International*, 155(2), 456-468.

Wait J.R. (1954)"On the relation between telluric currents and the Earth`s magnetic field", *Geophysics*, 19, 281-289.

Wannamaker P.E. And et al.,(1984) "Magnetotelluric responses of three dimensional bodies in layered earths", *Geophysics* 49:1517–1533

Wannamaker P. E. and et al (1989)"Resistivity cross section through the Juan de Fuca subduction system and its tectonic implications", *J. Geophys. Res.*, 94(B10), 14,127– 14,144.

Wannamaker P. E. and et al.,(2008)"Lithospheric dismemberment and magmatic processes of the GretBasin– Colorado Plateau transition, Utah, implied from magnetotellurics, Geochem", Geophys, Geosyst., 9, Q05019, doi:10.1029/2007GC001886.

Yee K. and May (1966)"Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media" IEEE Trans. Antennas Propag. 14, 302–307.

Zhdanov M.S. and Keller G.V., (1994)"The geoelectrical methods in geophysical exploration" Methods in Geochemistry and Geophysics, 31, Elsevier.

Zhdanov M.S.(2002)"Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems (Methods in Geochemistry and Geophysics)", Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands.

Zonge K.L.(1992)"Broadband electromagnetic systems". In Van

Abstract

Magnetotelluric (MT) method is a passive surface geophysical technique so that uses real passive electromagnetic surface fields for analysis of subsurface electric resistivity structures. Investigation depth in MT method is much more than the other electromagnetic ones. From 1970 to 1980, MT method was applying as an initial tool for identifying variation of thickness in large sedimentary areas. As in most cases, real studied areas inherently has complexities so 1D or even 2D modelling is not adequate for exploration targets and requirement of 3D modeling makes sense as well.

In conjunction with the USArray component of EarthScope, long period magnetotelluric (MT) data are being acquired in a series of arrays across the continental US. Initial deployments in 2006 and 2007 acquired data (10–10,000 s) at 110 sites covering the US Pacific Northwest, distributed with the same nominal spacing as the USArray seismic transportable array (75 km).

ModEm is a type of modular system for 3D inversion of MT data. A regular inversion program was selected for inversion of impedance four components tensor for 109 sites with acceptable good quality data for 8 periods (100 to 8000 seconds). These data were acquired from the Cascadia area. Suitable time length for calculation of 162 periods, was 12 hours while the best result was occurred in 162nd period by 1.75798 error. The most striking and robust features revealed by initial three-dimensional inversion of this dataset are extensive areas of high

conductivity in the lower crust beneath all of southeastern Oregon, and beneath the Cascade Mountains, contrasting with very resistive crust in Siletzia and the Columbia Embayment.

For testing results validation, residual data will be used. The results will prove the validation of inversion results.

Key words: Magnetotelluric, 3D inversion modelling, ModEm, nonlinear conjugate gradient method



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining , Petroleum and Geophysics

MSc Thesis in Geophysics

Three-dimensional inversion of magnetotelluric using the Gradient –based methods

By: Zohreh Naghdi

Supervisor:

Dr A. Kamkar Rouhani

September 2016