بسم الله الرحمن الرحيم

دانـــــــــشگاه یـــــــــــزد

دانشکده مهندسی معدن و متالورژی

گروه مهندسی اکتشاف معدن

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

مهندسی معدن- اکتشاف معدن

وارون‌سازی سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه الکتریکی با استفاده از روش المان محدود

استادان راهنما:

دکتر احمد قربانی و دکتر عبدالحمید انصاری

استاد مشاور:

دکتر فرهاد محمدتراب

پژوهش و نگارش:

حسینعلی قاری

شهریور ۱۳۹۱

پیشکش به

ساحت ملکوتی قطب دایره ی امکان حضرت ولی عصر (عج)

و

عطوفت آبی نگاه بیکران مادر بزرگوارم

و

سخاوت سبز دستان پر مهر پدر عزیزم

و

الطاف بی دریغ خواهر مهربانم

تشکر و قدردانی

سپاس بیکران خدای را که به انسان نه فقط به اندازه ی توانستن، که به قدر دانستن مسئولیت داد و درود بر آنان که این ودیعه ی الهی را پاس داشتند و آن چه که در توان داشتند در برآوردن آن به کار بستند.

و اما ارج می نهم تعهدات دلسوزانه و زحمات بی شائبه ی اساتید ارجمند و بزرگوار جناب دکتر احمد قربانی و جناب آقای دکتر عبدالحمید انصاری که طریقه ی رشد را به من آموختند.

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر فرهاد محمدتراب به پاس زحمات بی دریغشان نیز تشکر و قدردانی می-نمایم.

هم چنین از اساتید گرامی جناب آقای دکتر امیر حسین کوهساری و دکتر محمد فاتحی مرجی که امر داوری پایان نامه را بر عهده داشته اند سپاس گزاری می کنم.

و در پایان از خانواده ی عزیز و بزرگوارم که در این راه صبر زیادی را متحمل گشته اند نهایت قدردانی را دارم.

چکیده

تفسیر داده‌های خام ژئوفیزیکی به علت متأثر بودن شکل و عمق آنومالی‌ها از آرایه‌های الکترودیِ به‌کار گرفته شده، اغلب گمراه‌کننده می‌باشند. پس برای به‌دست آوردن مقادیر مقاومت ویژه‌ی الکتریکی واقعی و تعیین ویژگی‌های ساختاری کانسارها، مدل‌سازی وارون بر روی داده‌های صحرایی انجام می‌پذیرد. وجود مسئله‌ی وارون سه بعدی، معلول وجود مسئله‌ی پیشروی سه بعدی است. مدل‌سازی پیشرو، حل یک معادله‌ی دیفرانسیل با مشتقات جزئی و شرایط مرزی خاص توسط یکی از روش‌های محاسباتی است. در پژوهش حاضر، برای حل معادله‌ی پواسون سه بعدی از رهیافت اجزاء محدود استفاده شده است. هم‌چنین با اعمال شرایط مرزی مختلط، مقدار مرز برای حوزه‌ی حل به جای بی‌نهایت، در فاصله‌ی مورد نظر مشخص می‌گردد، که این کار از محاسبات اضافی و طولانی جلوگیری به‌عمل می‌آورد. برای وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه‌ی الکتریکی اکثراً از روش‌های حداقل مربعات با قید هموارساز استفاده می‌شود. این روش‌ها نیازمند محاسبه ماتریس ژاکوبین هستند. خصوصاً برای حالت سه بعدی، رایانه‌ای با سرعت و حافظه‌ی بالا نیاز بوده و زمان زیادی را صرف می‌کند. در این پژوهش برای کمینه‌سازی خطا در فرایند وارون‌سازی سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه‌ی الکتریکی، الگوریتم گرادیان مزدوج به‌کار رفته است. در الگوریتم سه بعدی حاضر، برای محاسبه‌ی گرادیان تابع هدف از روش حالت الحاقی استفاده گردیده است. این تکنیک، برنامه‌ی وارون‌سازی را از محاسبه طاقت‌فرسای ماتریس ژاکوبین بی‌نیاز می‌کند. هم‌چنین برای جلوگیری از اختلالات احتمالی مانند گرادیان‌های شدید، خصوصاً نزدیک الکترودها در سطح، پارامترهای مدل بعد از هر بار به روز شدن توسط فیلتری هموار می‌گردند. قابل ذکر است که برنامه‌ی تهیه شده در این پژوهش، کاملاً انعطاف‌پذیر بوده و قادر است با هرساختار پیچیده‌ای مانند تونل، ستون، بلوک سه بعدی از کانسار و غیره انطباق یابد. حال با اعمال یک آنومالی در مدل سه بعدی و برداشت مقاومت ویژه‌ی الکتریکی توسط روش توموگرافی با آرایه‌ی دوقطبی-دوقطبی و فاصله الکترودی ۱ متر، و هم‌چنین مقایسه‌ی نتایج آن با نرم‌افزارهای استاندارد موجود، قابلیت برنامه‌ی پیشرویِ سه بعدیِ توسعه داده شده اثبات می‌گردد. در مرحله‌ی بعد، طرح وارون‌سازی سه بعدی نیز بر روی مدل مصنوعی یک تونل نعل اسبی شکل

به‌طور موفقیت‌آمیز اجـرا گردیـد. برداشـت داده‌هـای مقاومـت ویـژه در ایـن مـدل بـا اسـتفاده از توموگرافی الکتریکی و آرایش ونر آلفا بر روی یک پروفیـل کمـانی‌شـکل بـا ۴۳ الکتـرود و فاصـله الکترودی ۲۰ سانتی‌متر صورت پذیرفت. در نهایت قابلیت الگـوریتم مـذکور بـا عمـال آن بـر روی داده‌های مقاومت ویژه‌ی الکتریکی گالری شرقی تونل تورنمیر فرانسـه اثبـات گردیـد. مـدل‌سـازی توصیف شده توسط نرم‌افزار کمسول اسکریپ صورت گرفته است و کدهای مربوط به آن در محیط متلب نوشته شده است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: ۱
مقدمه ۱
فصل دوم: ۹
مقدمه‌ای بر تئوری وارون‌سازی ۹
۲-۱- مقدمه ۱۱
۲-۲- مدل‌سازی پیشرو ۱۱
۲-۳- مدل‌سازی وارون ۱۴
۲-۳-۱- وجود مسئله‌ی وارون ۱۷
۲-۳-۲- ساخت ۱۷
۲-۳-۳- تقریب ۲۰
۲-۳-۴- پایداری ۲۱
۲-۳-۵- نایکتایی ۲۲
فصل سوم ۲۷
تئوری مدل‌سازی وارون سه بعدی ۲۷
۳-۱- مقدمه ۲۹
۳-۲- معرفی نرم‌افزار کمسول ۲۹
۳-۳- تئوری مسئله‌ی پیشرو ۳۰
۳-۳-۱- معادلات حاکم و شرایط مرزی ۳۰
۳-۳-۲- اعمال روش اجزاء محدود (فرمولاسیون المان محدود) ۳۴
۳-۳-۲-۱- تقسیم حوزه‌ی حل مسئله به نواحی کوچکتر(مش‌بندی) ۳۴
۳-۳-۲-۲- ایجاد معادله‌ی تقریب بر حسب تابع شکل ۳۶
۳-۳-۲-۳- به دست آوردن معادلات اجزاء به روش ریتز ۳۷
۳-۳-۳- محاسبه فاکتور هندسی ۳۸
۳-۴- تئوری مسئله وارون ۴۰
۳-۴-۱- گرادیان مزدوج ۴۰
۳-۴-۲- انتخاب تابع هدف ۴۲
۳-۴-۳- ارزیابی گرادیان تابع هدف ۴۳

۳-۴-۳-۱- اعمال روش حالت الحاقی ۴۳
۳-۴-۴-قید هموارساز ۴۵
۳-۵-ساختار الگوریتم ۴۶
فصل چهارم ۵۱
مدل‌سازی پیشرو سه بعدی برای داده‌های مصنوعی ۵۱
۴-۱- توصیف مدل ۵۳
۴-۲- ارزیابی شرای مرزی مختلط برای مدل مورد نظر ۵۴
۴-۳- برداشت داده ۵۵
۴-۴-صحت سنجی مدل پیشرو ۵۶
۴-۴-۱-مدل مصنوعی نیم فضای همگن ۵۶
۴-۴-۲-مدل مصنوعی دو لایه‌ای ۵۶
۴-۴-۳-مدل مصنوعی با آنومالی ۵۷
فصل پنجم ۶۱
مدل‌سازی وارون برای داده‌های مصنوعی ۶۱
۵-۱- مقدمه ۶۳
۵-۲- توصیف مدل ۶۳
۵-۲-۱-محاسبه شرط مرزی مختلط در مدل تونل نعل اسبی ۶۴
۵-۳- برداشت داده ۶۶
۵-۴- اثر مدل اولیه ۶۸
۵-۵- اثر نوفه‌ی اندازه‌گیری ۷۱
۵-۶- بررسی عمق آنومالی ۷۴
فصل ششم ۷۷
وارون‌سازی داده‌های گالری شرقی تونل تورنمیر ۷۷
۶-۱- مقدمه ۷۹
۶-۲- کاربرد روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در بررسی منطقه‌ی آسیب دیده در اثر حفاری ۸۰
۶-۳- خصوصیات زمین شناسی وپتروفیزیکی ۸۲
۶-۴-گالری شرقی ۱۹۹۶ ..... ۸۴
۶-۴-۱-شرح عمومی ۸۴
۶-۴-۲- اطلاعات و ساختار ژئومکانیکی ۸۵
۶-۴-۳- اطلاعات ژئوفیزیکی ۸۶

۶-۵- برداشت مقاومت ویژه‌ی الکتریکی ۸۷
۶-۵-۱- توموگرافی مقاومت ویژهی الکتریکی بر روی پروفیل کمانی شکل ۸۷
۶-۵-۲- وارون‌سازی داده‌های مقاومت ویژه‌ی برداشت شده ۸۸
فصل هفتم ۹۱
نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۹۱
۷-۱- نتایج ۹۳
۷-۲- پیشنهادات ۹۵
منابع و مآخذ ۹۷
پیوست ۱۰۷

فهرست شکل‌ها

شکل **صفحه**

شکل ۲-۱- مش‌بندی سه بعدی استفاده شده برای ارائه‌ی توپوگرافی ۱۴

شکل ۲-۲- رابطه‌ی بین داده‌ها و فضای مدل مرتبط با آنها در یک مسئله‌ی پیشرو و یک مسئله‌ی وارون. ۱۴

شکل ۲-۳- حالات مختلف انتخاب اولیه‌ی پارامترهای مدل در مکان‌های مختلف یک فضای m بعدی. ۱۵

شکل۲-۴-همگرایی یک مسئله‌ی وارون در تکرارهای متوالی. ۱۹

شکل ۲-۵-همگرایی و واگرایی یک مسئله‌ی وارون ۱۹

شکل۲-۶-فرورفتگی‌های مینیمم محلی، مانند تله رفتار می‌کنند ۲۵

شکل ۳-۱- محیط نرم‌افزار کمسول مولتی فیزیک ۲۹

شکل ۳-۲- نماش موقعیت اعمال شرط مرزی نیومن برای زیربلوک‌های مدل بلوک سه بعدی ۳۱

شکل۳-۳- نمایش شرط مرزی نیومن اعمال شده برای زیربلوک‌های مدل بلوک سه بعدی ۳۲

شکل ۳-۴- نمایش یک بلوک سه بعدی از زمین برای مدل‌سازی سه بعدی پیشرو ۳۳

شکل ۳-۵- انتخاب محدوده‌ی مطلوب برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل با اعمال شرط مرزی مختلط (الف) و نحوه‌ی اعمال شرط مرزی نیومن (ب). ۳۳

شکل ۳-۶- نمایش بلوک‌بندی مدل سه بعدی گسسته شده و مش‌بندی هر زیربلوک ۳۵

شکل ۳-۷- نمایش المان هرمی سه بعدی. ۳۵

شکل ۳-۸- صفحه z=1.5 برای نمایش بهتر مش‌بندی ۳۶

شکل ۳-۹- فلوچارت برنامه‌ی مدل‌سازی پیشرو در پژوهش حاضر. ۳۹

شکل ۳-۱۰- فلوچارت اجرای اجزاء محدود برای حل معادله‌ی پواسون ۳۹

شکل ۳-۱۱- فلوچارت برنامه‌ی مدل‌سازی وارون ۴۶

شکل ۴-۱- نمایش زیربلوک‌ها و مش‌بندی بلوک سه بعدی زمین ۵۳

شکل۴-۲-نحوه توزیع چگالی جریان در مدل محدود ۵۴

شکل۴-۳-نحوه توزیع چگالی جریان در مدل نامحدود ۵۴

شکل ۴-۴-موقعیت الکترودها در نیم فضای مدل سه بعدی ۵۵

شکل ۴-۵- نمودارمقاومت ویژه‌ی الکتریکی ظاهری بر حسب فواصل مختلف ۵۶

شکل۴-۶- آرایه‌ی الکترودی دوقطبی-دوقطبی استفاده شده برای زمین دولای‌های (الف)، مقاومت ویژه ظاهری برحسب شماره پرش n (ب) و مولفه‌ی افقی میدان الکتریکی ظاهری برحسب شماره پرش n (ج). ۵۷

شکل ۴-۷- نمایش نحوه توزیع مقاومت ویژه الکتریکی درمدل مصنوعی سه بعدی. ۵۸

شکل۴-۸- مقطع مقاومت ویژه واقعی در جهت x=0 (الف) و y=0 (ب)حاصل از نرم افزار ۵۹
شکل ۵-۱- نمایش بلوک بندی و مش بندی تونل نعل اسبی شکل. ۶۴
شکل ۵-۲- نماش موقعیت مرزهای نیومن و مختلط روی بلوک‌های مدل تونل نعل اسبی شکل ۶۵
شکل ۵-۳- نمایش مقطع تونل نعل اسبی شکل با اعمال شرایط مرزی مختلط ۶۶
شکل۵-۴- نمایش پروفیل کمانی شکل بر روی کف و دیواره تونل نعل اسبی ۶۷
شکل۵-۵-نمایش نحوه توزیع مقاومت ویژه الکتریکی درمدل مصنوعی تونل نعل اسبی شکل ۶۸
شکل۵-۶- مقادیر تابع هدف در مدل‌سازی وارون در تکرارهای مختلف (الف)، مقادیر خطای ریشه‌ی میانگین مربعات برای در تکرارهای مختلف (ب) برای سه مدل اولیه همگن ۰.۱، ۱ و ۵۰ اهم.متر ۶۹
شکل ۵-۷- مقطع حاصل از وارون‌سازی داده‌های مصنوعی بر اساس مدل اولیه ۰.۱ اهم.متر (الف)، ۱ اهم.متر (ب) و ۵۰ اهم.متر (ج). ۷۰
شکل۵-۸- نمایش نحوه‌ی توزیع مقاومت ویژه‌ی الکتریکی درمدل مصنوعی تونل نعل اسبی شکل ۷۱
شکل۵-۹- مقادیر تابع هدف در مدل‌سازی وارون داده‌های آلوده به نوفه ۵ و ۱۰ درصد در تکرارهای مختلف. ۷۲
شکل ۵-۱۰- مقطع حاصل از وارون‌سازی داده‌های مصنوعی بر داده‌های آلوده به نوفهی ۵ درصد (الف) و ۱۰ درصد (ب). ۷۳
شکل۵-۱۱- نمایش نحوه توزیع مقاومت ویژه الکتریکی در مدل مصنوعی تونل نعل اسبی شکل. ۷۴
شکل۵-۱۲- مقادیر تابع هدف در مدل‌سازی وارون داده‌های حاصل از آنومالی موجود در عمق ۲ متری. ۷۵
شکل ۵-۱۳- مقطع حاصل از وارون‌سازی داده‌های مصنوعی برای داده‌های حاصل از آنومالی قرار گرفته در عمق ۲ متری. ۷۵
شکل۶-۱- مثالی از نحوه برداشت توموگرافی الکتریکی با آرایه ونر. ۸۰
شکل ۶-۲- دستگاه سیسکال پرو به همراه مولتی پلکسر ۸۰
شکل۶-۳-زمین شناسی بخشی از سایت تورنمیر آزمایشگاهی تورنمیر ۸۴
شکل ۶-۴-گالری شرقی ۹۶ ..... ۸۵
شکل ۶-۵-نقشه‌ی ساختاری ساده از کف گالری شرقی ۹۶ ..... ۸۶
شکل ۶-۶- مقطع هندسی گالری شرقی ۹۶ و پروفیل کمانی. ۸۸
۶-۷- مقطع حاصل از وارون‌سازی مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از پروفیل کمانی برای آرایش ونر آلفا در گالری شرقی ۸۹
۶-۸- مقطع حاصل از وارون‌سازی مقاومت ویژه الکتریکی حاصل از پروفیل کمانی برای آرایش ونر آلفا در گالری شرقی با استفاده از نرم‌افزار res2dinv ۸۹

فصل اول:

مقدمه