



۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی عمران

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد
مهندسی عمران گرایش خاک و پی

تعیین اثرات مغناطیسی در یک منشور استوانه‌ای به روش عددی و کاربردهای آن

توسط:

کامران ایقانی

استاد راهنما:

دکتر حسن قاسم‌زاده

استاد مشاور:

دکتر محمد فورمن اصغرزاده

بهمن ۱۴۰۲

بنام خداوند جان و



تأسیس ۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تأییدیه هیئت داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان‌نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه تهیه شده تحت عنوان: **تعیین اثرات مغناطیسی در یک منشور استوانه‌ای به روش عددی و کاربردهای آن** توسط **کامران ایقانی** صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه **کارشناسی‌ارشد** رشته **مهندسی عمران - ژئوتکنیک** در تاریخ مورد تأیید قرار دادند.

۱- استاد راهنما: آقای دکتر حسن قاسم‌زاده امضاء

۲- استاد مشاور: آقای دکتر محمد فورمن اصغرزاده امضای

۳- ممتحن خارجی: آقای دکتر بهروز اسکونی امضای

۴- ممتحن داخلی: آقای دکتر جواد رئیسیان زاده امضاء

۵- نماینده تحصیلات تکمیلی: آقای دکتر جواد رئیسیان زاده امضاء

دانشکده عمران

تاریخ:



تأسیس ۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

اظہارنامہ دانشجو

اینجانب کامران ایقانی دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش خاک و پی دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان تعیین اثرات مغناطیسی در یک منشور استوانه‌ای به روش عددی و کاربردهای آن با راهنمایی اساتید محترم آقای دکتر حسن قاسم‌زاده و آقای دکتر محمد فورمن اصغرزاده توسط شخص اینجانب انجام شده است. صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید است. در مورد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب مصوب دانشگاه را به طور کامل رعایت کرده‌ام.

امضای دانشجو:

تاریخ:

حق طبع، نشر و مالکیت نتایج

- ۱- حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده و استاد/استادان راهنمای آن است. هرگونه تصویربرداری از کل یا بخشی از پایان‌نامه تنها با موافقت نویسنده یا استاد/استادان راهنما یا کتابخانه دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز است.
- ۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی است و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل‌واگذاری نیست.
- ۳- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تشکر و قدردانی:

وظیفه خود می‌دانم از تمامی افرادی که به طریقی من را در انجام این پایان‌نامه یاری نموده‌اند، تشکر نمایم.

استاد ارجمندم، آقای دکتر حسن قاسم‌زاده و آقای دکتر محمد فورمن اصغرزاده که همواره با کوشاده‌روی خویشتن پذیرای این‌جانب بودند و با دقت، حوصله و نکته‌سنجی بنده را در تهیه و تدوین این پایان‌نامه یاری نمودند و از هیچ‌گونه تلاش و کوششی دریغ ننمودند. در نهایت از خانواده و دوستان عزیزم که در این راه، همواره مایه دلگرمی من بوده‌اند، نهایت سپاس و تشکر را دارم.

چکیده

در این پژوهش با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی، کلیات مدل‌سازی مستقیم مغناطیسی منشور استوانه‌ای ارائه شده است و معادلاتی برای پتانسیل اسکالر، مولفه‌های میدان و تانسور گرادیان مغناطیسی منشور استوانه‌ای ارائه گردیده است. برای حل این معادلات از روش عددی انتگرال‌گیری گاوس لژاندر استفاده شده است. در ادامه به‌عنوان کاربرد روش مغناطیس‌سنجی در سازه‌های ژئوتکنیکی، برای پایش نشست بدنه سدهای خاکی با استفاده از مدل‌سازی میدان مغناطیسی ناشی از چشمه‌های استوانه‌ای و استفاده از حسگرهای مغناطیسی به‌عنوان شبکه برداشت فرایندی تعریف گردیده است و مدل‌سازی به هندسه سد مسجدسلیمان تعمیم داده شده است. در نهایت روش عددی گاوس لژاندر با نرم‌افزار کامسول که مبتنی بر روش اجزا محدود است، برای یک استوانه به‌عنوان چشمه مغناطیسی با در نظر گرفتن شعاع و ارتفاع شبکه برداشت به‌عنوان متغیر، مقایسه گردیده است. نتایج مقایسه دو روش تطابق بالایی را نشان داده است.

واژه‌های کلیدی: انتگرال‌گیری گاوس لژاندر، پایش نشست سد خاکی، سد مسجدسلیمان، مدل‌سازی مغناطیسی، نرم‌افزار کامسول

ز.....	چکیده.....
ک.....	فهرست جداول.....
ل.....	فهرست شکل‌ها.....
۱.....	فصل اول: مقدمه و کلیات تحقیق.....
۱-۱.....	۱-۱- مقدمه.....
۱.....	۱-۲- بیان و اهمیت موضوع.....
۱.....	۱-۳- اهداف تحقیق.....
۲.....	۱-۴- سؤالات تحقیق.....
۲.....	۱-۵- ساختار پایان‌نامه.....
۳.....	فصل دوم: تئوری مغناطیس‌سنجی.....
۳.....	۲-۱- مقدمه.....
۳.....	۲-۲- مبانی مغناطیس‌سنجی.....
۳.....	۲-۲-۱- قطب‌های مغناطیسی.....
۴.....	۲-۲-۲- نیروی مغناطیسی.....
۴.....	۲-۲-۳- میدان مغناطیسی.....
۵.....	۲-۲-۴- گشتاور دو قطبی مغناطیسی.....
۵.....	۲-۲-۵- مغناطش.....
۶.....	۲-۲-۶- القای مغناطیسی.....
۷.....	۲-۲-۷- پذیرفتاری مغناطیسی.....
۷.....	۲-۲-۸- انواع مواد مغناطیسی.....
۹.....	۲-۲-۹- مغناطیس‌زدایی.....
۹.....	۲-۲-۱۰- حلقه پسماند (هیستریزیس) مغناطیسی.....
۱۱.....	۲-۳- میدان مغناطیسی زمین.....

۴-۲- ابزارهای مغناطیس سنجی.....	۱۳
۴-۲-۱- مگنتومتر فلاکس گیت (برداری).....	۱۳
۴-۲-۲- مگنتومتر پروتون (اسکالر).....	۱۳
۴-۲-۵- مروری بر تحقیقات مدل سازی مغناطیسی.....	۱۴
۴-۲-۶- کاربرد روش مغناطیس سنجی در مهندسی ژئوتکنیک.....	۱۹
۴-۲-۶-۱- حسگرهای مغناطیسی.....	۱۹
۴-۲-۶-۲- مغناطیس سنجی گمانه.....	۲۳
۴-۲-۶-۳- کاربردهای آزمایشگاهی.....	۲۴
۴-۲-۷- جمع بندی.....	۲۴
فصل سوم: مدل سازی مستقیم مغناطیسی منشور استوانه ای و حل به روش عددی.....	۲۵
۴-۲-۱- مقدمه.....	۲۵
۴-۲-۲- اصول مدل سازی مستقیم مغناطیسی.....	۲۶
۴-۲-۱-۲- معادلات ماکسول.....	۲۶
۴-۲-۲- پتانسیل اسکالر مغناطیسی.....	۲۷
۴-۲-۳- مولفه های میدان مغناطیسی.....	۳۲
۴-۲-۴- مولفه های تانسور گرادیان مغناطیسی.....	۳۵
۴-۳-۱- انتگرال گیری عددی به روش گاوس لژاندر.....	۴۰
۴-۳-۲- کاربرد روش مغناطیس سنجی در پایش سدهای خاکی.....	۴۸
۴-۳-۱- مشخصات ابزار دقیق پی و بدنه سد.....	۴۹
۴-۲-۴- بررسی نشست بدنه سد.....	۵۰
۴-۳-۴- مدل سازی میدان مغناطیسی چشمه های استوانه ای با در نظر گرفتن هندسه سد.....	۵۲
۴-۳-۵- نتیجه گیری.....	۶۷
فصل چهارم: مدل سازی مغناطیسی با نرم افزار المان محدود کامسول.....	۶۸
۴-۱- مدل سازی مغناطیسی المان استوانه ای در محیط نرم افزار.....	۶۸
۴-۲- مقایسه نتایج گاوس لژاندر و کامسول.....	۷۱
۴-۳- جمع بندی.....	۸۰

فصل پنجم: جمع‌بندی و پیشنهادات.....	۸۲
۵-۱- جمع‌بندی	۸۲
۵-۲- ارائه پیشنهاد برای تحقیقات آتی	۸۳
پیوست.....	۸۳
منابع.....	۸۶

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱-۲. نفوذ پذیری مغناطیسی نسبی برخی از مواد	۹
جدول ۱-۳. مشخصات کلی سد سنگریزه‌ای سد مسجد سلیمان	۴۸
جدول ۲-۳. نوع ابزار و زمانبندی قرائت ابزار نصب شده در سد مسجد سلیمان	۴۹
جدول ۳-۳. مشخصات چشمه‌های مغناطیسی استفاده شده برای مدلسازی مغناطیسی	۵۲
جدول ۴-۳. شدت میدان مغناطیسی ناشی از تمام چشمه‌های مغناطیسی و چشمه‌ها در تراز متفاوت	۵۴
جدول ۵-۳. شدت آنومالی‌های مغناطیسی ناشی از اختلاف حالت بدون نشست و نشست ۶ متر تاج سد	۵۶
جدول ۶-۳. شدت آنومالی‌های مغناطیسی ناشی از اختلاف حالت بدون نشست و نشست ۳ متر تاج سد	۶۰
جدول ۷-۳. شدت آنومالی‌های مغناطیسی ناشی از اختلاف حالت بدون نشست و نشست ۱ متر تاج سد	۶۰
جدول ۸-۳. شدت آنومالی‌های مغناطیسی ناشی از اختلاف حالت بدون نشست و نشست ۰/۵ متر تاج سد	۶۲
جدول ۹-۳. شدت آنومالی‌های مغناطیسی ناشی از اختلاف حالت بدون نشست و نشست ۰/۱ متر تاج سد	۶۴
جدول ۱۰-۳. شدت میدان و آنومالی‌های مغناطیسی در حالت بدون نشست و نشست برای نقاط مشخص شده بر روی شبکه برداشت	۶۶
جدول ۱-۴. مشخصات استوانه مدلسازی شده و ارتفاع شبکه برداشت برای مقایسه GLQ و COMSOL	۷۱
جدول ۲-۴. مقایسه‌ی زمان اجرای محاسبه چگالی شار مغناطیسی قائم Bz با استفاده از دو روش المان محدود و گاوس لژاندر برای یک المان استوانه‌ای مغناطیسی با مشخصات: $Z_2 = 5000 \text{ m}$, $R = 5000 \text{ m}$, $L = 500 \text{ m}$	۸۱

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۶.....	شکل ۱-۲. جهت مغناطش حاصل از جمع برداری مغناطش القایی و پسماند
۸.....	شکل ۲-۲. رفتار مواد فرو، پارا و دیامغناطیس در حضور میدان مغناطیسی خارجی و عدم حضور آن
۱۰.....	شکل ۳-۲. حلقه هیستریزیس مغناطیسی
۱۱.....	شکل ۴-۲. مولفه‌های عناصر ژئومغناطیس
۱۴.....	شکل ۵-۲. هندسه یک المان مغناطیسی با چگالی مغناطش Ms در دستگاه مختصات کروی
۱۵.....	شکل ۶-۲. هندسه یک المان Tesseroid در دستگاه مختصات کروی r, ϕ, λ
۱۶.....	شکل ۷-۲. هندسه یک المان استوانه‌ای مغناطیده با طول محدود L شعاع R و بردار مغناطش Ms در دستگاه مختصات استوانه‌ای
۱۷.....	شکل ۸-۲. مقایسه روش GLQ با روش FVD
۱۸.....	شکل ۹-۲. الف) بردار مغناطش M در سیلندر هالباخ با میدان مغناطیسی یکنواخت ب) سیلندر هالباخ تفکیک شده به ۱۲ استوانه مجزا با بردارهای مغناطش
۲۰.....	شکل ۱۰-۲. انواع حسگرهای مغناطیسی و محدوده عملکردشان
۲۰.....	شکل ۱۱-۲. استفاده از حسگرهای مغناطیسی برای پایش نیروی کششی کابل
۲۱.....	شکل ۱۲-۲. الف) تغییرات میدان مغناطیسی زمین ب) تغییرات میدان مغناطیسی کل در موقعیت $M1$ پ) تغییرات میدان مغناطیسی در موقعیت $M2$
۲۲.....	شکل ۱۳-۲. کاربرد $Smart\ rock$ در تخمین عمق آبستگی پایه پل
۲۳.....	شکل ۱۴-۲. الف) طرح اصلی روش BM ب) پروفیل چگالی شار مغناطیسی نسبت به عمق
۲۵.....	شکل ۱-۳. طرح شماتیک مسائل وارون و مستقیم
۲۸.....	شکل ۲-۳. هندسه یک دو قطبی مغناطیسی با بردار گشتاور مغناطیسی dms
۳۰.....	شکل ۳-۳. هندسه یک المان مغناطیسی با چگالی مغناطش Ms در دستگاه مختصات استوانه‌ای
۴۱.....	شکل ۴-۳. ضرایب وزنه و نقاط گاوسی
۴۴.....	شکل ۵-۳. ناهنجاری‌های مغناطیسی در مختصات کارتزین الف) میدان پتانسیل اسکالر مغناطیسی ب) مولفه میدان مغناطیسی در جهت X پ) مولفه میدان مغناطیسی در جهت Y ت) مولفه میدان مغناطیسی در جهت قائم Z

شکل ۳-۶. ناهنجاری‌های مغناطیسی در مختصات استوانه‌ای (الف) میدان پتانسیل اسکالر مغناطیسی (ب) مولفه میدان مغناطیسی در جهت شعاعی (پ) مولفه میدان مغناطیسی در جهت آزیموت (ت) مولفه میدان مغناطیسی در جهت قائم	۴۵
شکل ۳-۷. مولفه‌های تانسور گرادیان مغناطیسی در مختصات کارتزین	۴۶
شکل ۳-۸. مولفه‌های تانسور گرادیان مغناطیسی در مختصات استوانه‌ای	۴۷
شکل ۳-۹. وضعیت ابزار دقیق در مقطع ۲۶۰	۵۰
شکل ۳-۱۰. (الف) موقعیت نقاط میکروژئودزی در بدنه سد (ب) نتایج نشست نقاط نقشه برداری در مقطع ۲۶۰	۵۱
شکل ۳-۱۱. (الف) نمای سه بعدی (ب) نمای دو بعدی در صفحه YZ	۵۳
شکل ۳-۱۲. فرضیه نشست خطی بدنه سد	۵۳
شکل ۳-۱۳. کانتور میدان مغناطیسی تاج سد ناشی از تمام چشمه‌های مغناطیسی	۵۴
شکل ۳-۱۴. کانتور میدان مغناطیسی تاج سد ناشی از میدان مغناطیسی چشمه‌های تراز $Z = 175(m)$	۵۵
شکل ۳-۱۵. کانتور میدان مغناطیسی تاج سد ناشی از میدان مغناطیسی چشمه‌های تراز $Z = 150(m)$	۵۵
شکل ۳-۱۶. کانتور میدان مغناطیسی تاج سد ناشی از میدان مغناطیسی چشمه‌های تراز $Z = 100(m)$	۵۵
شکل ۳-۱۷. کانتور میدان مغناطیسی تاج سد ناشی از میدان مغناطیسی چشمه‌های تراز $Z = 50(m)$	۵۶
شکل ۳-۱۸. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از تمام چشمه‌های مغناطیسی برای ۶ متر نشست تاج سد	۵۷
شکل ۳-۱۹. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 175(m)$	۵۷
شکل ۳-۲۰. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 150(m)$	۵۷
شکل ۳-۲۱. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 100(m)$	۵۸
شکل ۳-۲۲. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 50(m)$	۵۸

شکل ۳-۲۳. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از تمام چشمه‌های مغناطیسی برای ۳ متر نشست تاج سد..... ۵۹

شکل ۳-۲۴. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 175(m)$ ۵۹

شکل ۳-۲۵. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 150(m)$ ۵۹

شکل ۳-۲۶. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 100(m)$ ۶۰

شکل ۳-۲۷. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 50(m)$ ۶۰

شکل ۳-۲۸. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از تمام چشمه‌های مغناطیسی برای ۱ متر نشست تاج سد..... ۶۱

شکل ۳-۲۹. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 175(m)$ ۶۱

شکل ۳-۳۰. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 150(m)$ ۶۱

شکل ۳-۳۱. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 100(m)$ ۶۲

شکل ۳-۳۲. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 50(m)$ ۶۲

شکل ۳-۳۳. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از تمام چشمه‌های مغناطیسی برای ۵۰ متر نشست تاج سد..... ۶۳

شکل ۳-۳۴. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 175(m)$ ۶۳

شکل ۳-۳۵. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 150(m)$ ۶۳

شکل ۳-۳۶. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 100(m)$ ۶۴

شکل ۳-۳۷. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 50(m)$	۶۴
شکل ۳-۳۸. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از تمام چشمه‌های مغناطیسی برای ۱۰ متر نشست تاج سد	۶۵
شکل ۳-۳۹. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 175(m)$	۶۵
شکل ۳-۴۰. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 150(m)$	۶۵
شکل ۳-۴۱. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 100(m)$	۶۶
شکل ۳-۴۲. کانتور ناهنجاری‌های مغناطیسی تاج سد ناشی از چشمه‌های مغناطیسی در تراز $Z = 50(m)$	۶۶
شکل ۴-۱. ماژول Ac/Dc و حالت میدان مغناطیسی بدون جریان (mfnc)	۶۹
شکل ۴-۲. مشخصات آهن‌ربای BMN	۷۰
شکل ۴-۳. معادله رفتاری B-H	۷۰
شکل ۴-۴. شماتیک چشمه مغناطیسی (استوانه)	۷۱
شکل ۴-۵. مدلسازی استوانه با شعاع $R = 500(m)$ (الف) چگالی شار مغناطیسی (ب) پتانسیل اسکالر مغناطیسی	۷۲
شکل ۴-۶. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=50m, Z^2=50(m)$	۷۲
شکل ۴-۷. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=50m, Z^2=500(m)$	۷۳
شکل ۴-۸. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=50m, Z^2=2500(m)$	۷۳
شکل ۴-۹. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=50m, Z^2=5000(m)$	۷۴
شکل ۴-۱۰. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=500m, Z^2=50(m)$	۷۴
شکل ۴-۱۱. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=500m, Z^2=500(m)$	۷۵
شکل ۴-۱۲. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=500m, Z^2=2500(m)$	۷۵
شکل ۴-۱۳. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=500m, Z^2=5000(m)$	۷۶
شکل ۴-۱۴. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=2500m, Z^2=50(m)$	۷۶
شکل ۴-۱۵. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=2500m, Z^2=500(m)$	۷۷

- شکل ۴-۱۶. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=2500\text{m}$, $Z=2500\text{(m)}$ ۷۷
- شکل ۴-۱۷. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=2500\text{m}$, $Z=5000\text{(m)}$ ۷۸
- شکل ۴-۱۸. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=5000\text{m}$, $Z=500\text{(m)}$ ۷۸
- شکل ۴-۱۹. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=5000\text{m}$, $Z=5000\text{(m)}$ ۷۹
- شکل ۴-۲۰. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=5000\text{m}$, $Z=2500\text{(m)}$ ۷۹
- شکل ۴-۲۱. مدلسازی Bz استوانه مغناطیسی با مشخصات $R=5000\text{m}$, $Z=5000\text{(m)}$ ۸۰

فصل اول: مقدمه و کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

کاوش‌های مغناطیسی یکی از قدیمی‌ترین نوع از کاوش‌های ژئوفیزیکی به حساب می‌آیند. اساس این روش بر پایه میدان مغناطیسی مواد است که خاصیت مغناطیسی دارند و در اطراف خود ایجاد می‌کنند. تفاوت ویژگی‌های مغناطیسی مواد مختلف سبب ایجاد میدان‌های مغناطیسی با شدت متفاوت در اطراف آن‌ها می‌شود. هدف از کاوش‌های مغناطیسی بررسی ساختارهای زمین‌شناسی زیر زمینی است که بر اساس ناهنجاری‌های مغناطیسی صورت می‌گیرد. از طرفی ناهنجاری‌های میدان‌های پتانسیل (گرانی و مغناطیسی) را می‌توان توسط برخی از اجسام هندسی تقریب زد. در این پژوهش از منشور استوانه‌ای برای مدل‌سازی مغناطیسی استفاده شده است. ناهنجاری‌های تولید شده توسط المان‌های منشور دارای اهمیت ویژه‌ای هستند، زیرا اکثر ساختارهای زمین‌شناسی را با استفاده از مدل‌های سه‌بعدی این المان‌ها می‌توان تقریب زد. در این بین برای مدل‌سازی مغناطیسی از روش‌های متفاوتی از جمله اجزا محدود، احجام محدود و کوادراتور گاوس استفاده شده است. در این تحقیق از روش انتگرال‌گیری گاوس برای مدل‌سازی مغناطیسی استفاده شده است.

۱-۲- بیان و اهمیت موضوع

در این تحقیق اثرات مغناطیسی یک منشور استوانه‌ای بررسی شده است که می‌تواند برای پر کردن هر توده مغناطیسی با تقارن محوری (استوانه) استفاده شود. به‌طوری‌که ناهنجاری‌های مغناطیسی در هر نقطه، با حاصل جمع اثرات مغناطیسی تمام منشورهای تشکیل‌دهنده توده مغناطیسی برابر است. از نتایج این تحقیق می‌توان در مواردی که توده مغناطیده با تقارن محوری وجود داشته باشد در صنعت پزشکی (دستگاه‌های MRI)، ابزار دقیق (انحراف گمانه‌ها)، مطالعات مهندسی (شناوری مغناطیسی) و سایر موارد استفاده نمود. همچنین به‌عنوان نوآوری تحقیق، فرایندی با استفاده از تئوری مدل‌سازی مغناطیسی در دستگاه مختصات استوانه‌ای برای پایش نشست بدنه سدهای خاکی تعریف گردیده است.

۱-۳- اهداف تحقیق

هدف اصلی تحقیق حاضر، ابتدا به‌دست‌آوردن معادلات پتانسیل اسکالر، میدان مغناطیسی و تانسور گرادیان مغناطیسی مربوط به استوانه با طول محدود و چگالی مغناطش متغیر در دستگاه مختصات استوانه‌ای و سپس حل تقریبی این معادلات به کمک روش عددی گاوس لژاندر است. در گام بعدی هدف تحقیق حاضر، مقایسه

نتایج این روش با مدل سازی صورت گرفته در نرم افزار کامسول خواهد بود. در نهایت به دنبال کاربرد این روش در پایش نشست بدنه سدهای خاکی خواهیم بود.

۱-۴- سؤالات تحقیق

در راستای هدف اصلی پژوهش حاضر، به سؤالات زیر پاسخ داده خواهد شد:

۱. معادلات اثرات مغناطیسی یک المان استوانه ای شامل ۱۳ معادله (پتانسیل اسکالر، مولفه های چگالی شار میدان مغناطیسی و مولفه های تانسور گرادیان مغناطیسی) در دستگاه مختصات استوانه ای به چه صورت بدست می آیند؟
۲. حل عددی این معادلات به وسیله روش عددی انتگرال گیری گاوس لژاندر چگونه صورت می گیرد؟
۳. آیا مدل سازی المان استوانه مغناطیسی با روش انتگرال گیری گاوس لژاندر و مدل سازی مغناطیسی در نرم افزار المان محدود کامسول دارای نتایج یکسان است؟
۴. آیا امکان پایش نشست بدنه یک سد خاکی باتوجه به تئوری مغناطیسی و با استفاده از چشمه ها و حسگرهای مغناطیسی وجود دارد؟

۱-۵- ساختار پایان نامه

این پایان نامه مشتمل بر پنج فصل تدوین شده است.

- در فصل اول به بیان موضوع و ضرورت تحقیق پرداخته شده است.
- در فصل دوم پس از ارائه کلیات روش مغناطیسی، به بررسی پیشینه این روش اختصاص داده شده است. در این فصل ارتباط روش مغناطیسی با علم ژئوتکنیک مورد بررسی قرار گرفته است.
- در فصل سوم معادلات اثرات مغناطیسی یک المان استوانه ای با چگالی مغناطش متغیر در دستگاه مختصات استوانه ای به دست آمده و به کمک روش عددی گاوس لژاندر به صورت تقریبی حل شده است. همچنین کاربرد این روش در پایش نشست بدنه سدهای خاکی مورد بررسی قرار گرفته است.
- در فصل چهارم مدل سازی المان استوانه ای با نرم افزار اجزا محدود کامسول انجام شده است و همچنین نتایج آن با روش عددی انتگرال گیری گاوس لژاندر مقایسه شده است.
- در فصل پنجم جمع بندی و پیشنهاداتی برای آینده تحقیق ارائه شده است.

فصل دوم: تئوری مغناطیس‌سنجی

۲-۱- مقدمه

هدف از گردآوری این فصل آشنایی مختصر با مبانی روش مغناطیسی و نگاهی بر کاربردهای متعدد آن و بیان تحقیقات انجام‌شده بر روی موضوع تا زمان حاضر است. در این فصل به توصیف مدل‌سازی عناصر مغناطیسی به کمک روش‌های تحلیلی و عددی توسط محققین پرداخته شده است. همچنین به کاربرد استفاده از مغناطیس‌سنجی در مهندسی عمران و به‌خصوص در مهندسی ژئوتکنیک پرداخته شده است.

۲-۲- مبانی مغناطیس‌سنجی^۱

هدف از مغناطیس‌سنجی شناخت عوارض زیر سطحی زمین با استفاده از اندازه‌گیری میدان مغناطیسی است. مغناطیس‌سنجی دارای کاربردهای وسیع و فراوان است، کاربردهای آن در مقیاس کوچک مانند مطالعات مهندسی (ازجمله کاربرد این روش در مهندسی ژئوتکنیک) و باستان‌شناسی جهت شناسایی اشیای فلزی مدفون، تا سنجش‌های مغناطیسی در مقیاس بزرگ جهت بررسی ساختارهای زمین‌شناسی به کار برده است. سنجش‌های مغناطیسی قابلیت برداشت زمینی، هوایی و دریایی دارد [۱]. مغناطیس‌سنجی همراه با گرانی سنجی از روش‌های غیرفعال (استاتیکی) ژئوفیزیکی به حساب می‌آیند و از روش‌های میدان پتانسیل است. روش مغناطیسی در مقایسه با گرانی سنجی کم‌هزینه‌تر است اما تفسیر داده‌های آن در مقایسه با گرانی پیچیده‌تر است.

۲-۲-۱- قطب‌های مغناطیسی

زمانی که یک آهن‌ربا را درون ظرف براده‌های آهن قرار دهیم مشاهده می‌شود که براده‌های آهن در نواحی خاصی از آهن‌ربا بسیار بیشتر جذب شده‌اند. به این نواحی قطب آهن‌ربا یا قطب مغناطیسی گفته می‌شود. قطب شمال آهن‌ربا (N) جهت شمال را نمایش می‌دهد و قطب جنوب (S) جهت جنوب را نشان می‌دهد. قطب‌های همنام یکدیگر را دفع کرده و قطب‌های ناهمنام یکدیگر را جذب می‌کنند. برخلاف گرانش و میدان الکتریکی که تک‌قطبی هستند، آهن‌ربا همواره دوقطبی است.

¹ Magnetic Method

۲-۲-۲- نیروی مغناطیسی

نیرویی که بین قطب‌های مثبت و منفی آهن‌ربا که در فاصله r از یکدیگر قرار دارند و بر حسب نیوتن است از رابطه (۱-۲) بدست می‌آید:

$$F = \frac{1}{\mu} \frac{p_1 p_2}{r^2} \quad (1-2)$$

در رابطه بالا p_1 و p_2 شدت قطب‌های مغناطیسی آهن‌ربا بر حسب آمپر در متر است. μ به عنوان تراوایی مغناطیسی^۱ (نفوذ پذیری مغناطیسی) شناخته شده است که مقدار آن با توجه به محیطی که قطب‌های مغناطیسی در آن قرار دارند متفاوت است. واحد آن هانری بر متر است و از رابطه (۲-۲) بدست آمده است [۲].

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (2-2)$$

در رابطه بالا μ_r نفوذپذیری نسبی^۲ و کمیتی بدون بعد است. همچنین μ_0 یک ثابت فیزیکی است و نشان‌دهنده نفوذپذیری مغناطیسی خلا است و مقدار آن $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ است.

۲-۲-۳- میدان مغناطیسی

حرکت بارهای الکتریکی باعث ایجاد میدان مغناطیسی می‌شود. میدان مغناطیسی می‌تواند حاصل تأثیر دو میدان الکتریکی با بارهای مثبت و منفی بر روی یکدیگر باشد، همچنین حرکت چرخشی و اوربیتالی الکترون‌ها در آهن‌ربا سبب ایجاد میدان مغناطیسی خواهد شد.

واحد اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در سیستم بین‌المللی SI تسلا (T) است، اما این واحد در اکثر کاربردهای عملی بسیار بزرگ به حساب می‌آید؛ بنابراین به جای آن از واحد نانو تسلا (10^{-9} تسلا) یا گاوس (10^{-4} تسلا) استفاده می‌شود.

¹ Magnetic Permeability

² Relative Permeability

۲-۲-۴- گشتاور دو قطبی مغناطیسی

خواص مغناطیسی مواد به علت وجود گشتاورهای مغناطیسی^۱ الکترون‌ها است. هر الکترون در یک اتم دارای ممان مغناطیسی است که از دو منبع ایجاد می‌شود. یکی مربوط به حرکت اوربیتالی الکترون حول هسته و دیگری ناشی از چرخش الکترون به دور محور خودش که حرکت اسپینی نامیده می‌شود. از آنجایی که هر آهن ربای دائمی^۲ همواره به صورت دو قطبی در نظر گرفته می‌شود گشتاور مغناطیسی همواره طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$m = p \times l \quad (۳-۲)$$

که در رابطه بالا p شدت قطب‌های مغناطیسی و l فاصله بین قطب‌ها بر حسب متر است. واحد گشتاور مغناطیسی آمپر در مترمربع (Am^2) است.

۲-۲-۵- مغناطش^۳

گشتاور مغناطیسی در واحد حجم را مغناطش یا قطبش مغناطیسی می‌نامند که معیار سنجش میزان مغناطیسی شدن مواد است [۳]. این پدیده مشابه آرایش دو قطبی‌های الکتریکی در میدان الکتریکی خارجی است. شدت مغناطش متناسب با قدرت میدان و جهت آن هم جهت با میدان مغناطیسی است. واحد آن در سیستم SI آمپر بر متر ($\frac{A}{m}$) است. مغناطش از رابطه (۴-۲) بدست می‌آید:

$$M = \frac{m}{v} \quad (۴-۲)$$

در رابطه بالا m مجموع ممان‌های مغناطیسی و v نشان‌دهنده حجم است. اگر مغناطش ثابت و جهت آن در تمام توده مغناطیسی یکسان باشد، در آن صورت جسم به صورت یکنواخت مغناطیده شده است [۴]. همچنین مغناطش طبق رابطه (۵-۲) حاصل جمع مغناطش القایی^۴ (M_j) و مغناطش پسماند^۵ (M_r) است. در شکل (۱-۲) جهت مغناطش حاصل از جمع برداری مغناطیس القایی و مغناطیس پسماند نمایش داده شده است.

$$M = M_r + M_j \quad (۵-۲)$$

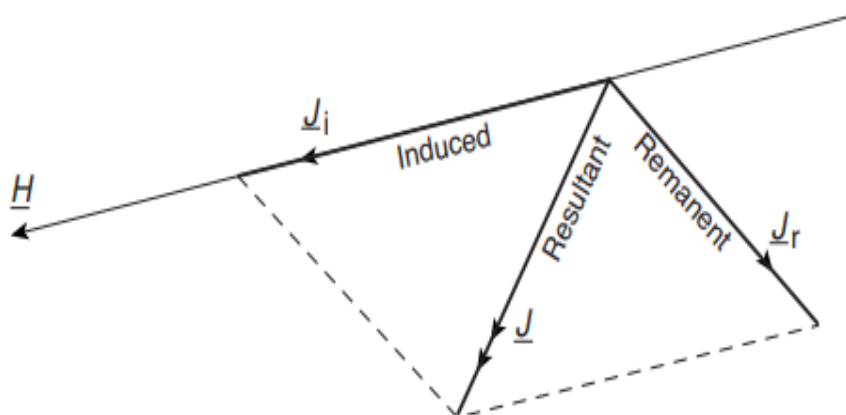
¹ Magnetic Moment

² Permanent Magnet

³ Magnetization

⁴ Induced Magnetization

⁵ Remanent Magnetization



شکل ۱-۲. جهت مغناطش حاصل از جمع برداری مغناطش القایی و پسماند [۵]

۲-۲-۶ - القای مغناطیسی^۱

هنگامی که میدان مغناطیسی (H) به یک ماده اعمال می‌شود، پاسخ ماده تحت تأثیر میدان اعمال شده القای مغناطیسی نامیده می‌شود که آن را با حرف B نمایش می‌دهند. در واقع به پاسخ جسم در یک میدان مغناطیسی با شدت مشخص، شار یا القای مغناطیسی گفته می‌شود. واحد آن تسلا (T) یا وبر بر مترمربع ($\frac{Wb}{m^2}$) است. رابطه بین دو کمیت H و B یکی از مهم‌ترین مباحث مغناطیس سنجی است. در خلا و زمانی که مغناطش صفر ($M=0$) است رابطه این دو خطی و طبق رابطه (۶-۲) بدست می‌آید:

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (6-2)$$

در اغلب موارد رابطه بین این دو کمیت خطی نیست و مغناطش غیرصفر است. رابطه بین کمیت‌های H, B, M در سیستم SI طبق رابطه زیر است [۶].

$$B = \mu_0 \cdot (H + M) \quad (7-2)$$

¹ Magnetic Induction

۲-۲-۷- پذیرفتاری مغناطیسی^۱

مواد مختلف در حضور میدان مغناطیسی و پس از حذف میدان رفتارهای متفاوتی از خود نشان می‌دهند. پذیرفتاری مغناطیسی بیانگر میزان مغناطیسی شدن مواد، در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی است. پذیرفتاری، کمیتی مهم در کاوش‌های مغناطیسی است؛ زیرا پاسخ مغناطیسی سنگ‌ها و کانی‌ها را مقدار ماده مغناطیسی داخل آن تعیین می‌کند. پذیرفتاری مغناطیسی از طریق رابطه (۲-۸) محاسبه می‌شود و یک کمیت بدون بعد است [۷].

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (2-8)$$

۲-۲-۸- انواع مواد مغناطیسی

رفتار مواد بر اساس حضور آن‌ها در یک میدان مغناطیسی به پنج دسته طبقه‌بندی شده است: الف) مواد دیامغناطیس^۲: در مواد دیامغناطیس هیچ دوقطبی اتمی وجود ندارد، زیرا گشتاور مغناطیسی حاصل از هر اتم در اثر الکترون‌های جفت شده صفر است. پذیرفتاری این‌گونه از مواد کوچک و منفی است. شدت مغناطش نیز در این مواد همانند پذیرفتاری آن‌ها اغلب منفی است. چند نمونه از کانی‌هایی دارای خاصیت دیامغناطیس هستند عبارت‌اند از کوارتز و کلسیت [۸].

ب) پارامغناطیس^۳: در این مواد، برخلاف مواد دیامغناطیس در مولکول‌ها، اتم‌ها و یا یون‌ها گشتاور مغناطیسی کوچکی وجود دارد. ولی گشتاورها با جهت‌های تصادفی توزیع شده و یکدیگر را خنثی می‌کنند و مغناطش برابر صفر می‌شود. اگر این دسته از مواد در یک میدان مغناطیسی قرار گیرند، تعدادی از گشتاورها در جهت میدان می‌چرخند ماده خاصیت مغناطیسی ضعیفی از خود نشان می‌دهد. بعضی از فلزات قلیایی و یا برخی از فلزات واسطه مانند کروم، تیتانیوم، تنگستن و پلاتین دارای خاصیت پارامغناطیس هستند. چند نمونه از کانی‌هایی دارای خاصیت پارامغناطیس هستند عبارت‌اند از بیوتیت و پیروکسن.

پ) مواد فرومغناطیس^۴: برخلاف سایر مواد، فرومغناطیس‌ها به راحتی دارای خاصیت مغناطیسی می‌شوند و در میدان‌های مغناطیسی قوی، مغناطش در آن‌ها به حدی می‌رسد که به حالت اشباع خواهند رسید. در مواد

¹ Magnetic Susceptibility

² Diamagnetism

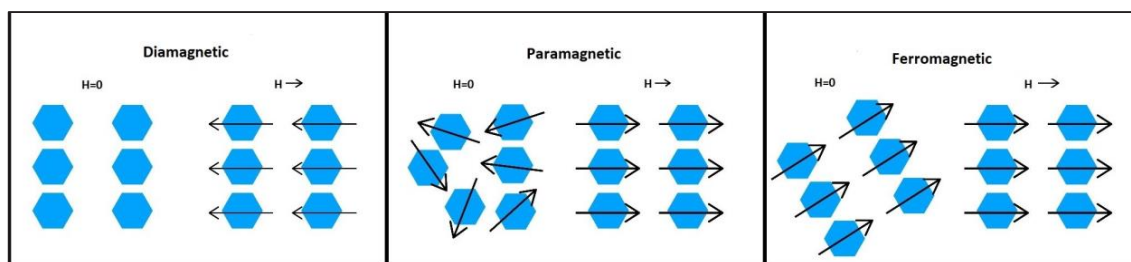
³ Paramagnetism

⁴ Ferromagnetism

فرومغناطیس وقتی یک میدان اعمال می‌شود و سپس حذف می‌شود، مغناطش به مقدار اولیه خود بر نمی‌گردد که از این پدیده به عنوان مغناطش پسماند یاد می‌شود. آهن، کبالت و نیکل از این دسته هستند. خاصیت فرومغناطیسی با افزایش دما کاهش می‌یابد و در دمای کوری^۱ (به دمایی گفته می‌شود که در آن مواد مغناطیسی خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند) از بین خواهد رفت همچنین از نظر ماندگاری خاصیت مغناطیسی به دودسته فرومغناطیس سخت و نرم تقسیم می‌شوند [۹].

ت) مواد فری مغناطیس^۲: در این مواد جهت بردارهای گشتاور مغناطیسی مجاور عکس یکدیگر است؛ ولی اندازه آن‌ها برابر نیست. رفتار این مواد مشابه با مواد فرومغناطیس است. گروهی از آهن‌رباهای دائم که به نام فریت شناخته می‌شوند از این دسته هستند.

پ) مواد پاد فرومغناطیس^۳: در این مواد بردارهای گشتاورهای مغناطیسی مجاور از نظر اندازه برابر ولی از نظر جهت، عکس یکدیگر هستند؛ بنابراین یکدیگر را خنثی می‌کنند. در صورتی که چنین ماده‌ای در میدان مغناطیسی قرار گیرد، گشتاورهای هم جهت با میدان تقویت می‌شوند و ماده خاصیت مغناطیسی ضعیفی از خود نشان می‌دهد در جدول تناوبی تنها کروم است که در دمای اتاق خاصیت آنتی فرومغناطیس دارد. در شکل (۲-۲) پارا و دیامغناطیس در حضور میدان مغناطیسی و عدم میدان نشان داده شده است [۱۰].



شکل ۲-۲. رفتار مواد فرومغناطیس، پارامغناطیس و دیامغناطیس در حضور میدان مغناطیسی خارجی و عدم حضور آن [۱۰]

^۱ Curie Temperature

^۲ Ferrimagnetism

^۳ Antiferromagnetism

نفوذپذیری مغناطیسی نسبی مواد دیامغناطیس کوچک‌تر از یک است ($\mu_r < 1$). در حالی که برای مواد پارامغناطیس و پاد فرومغناطیس این کمیت بزرگ‌تر از یک است ($\mu_r > 1$). برای سایر مواد از جمله فرومغناطیس و فری مغناطیس این ضریب بسیار بزرگ‌تر از یک است ($\mu_r \gg 1$). در جدول (۱-۲) بر اساس نوع ماده مقدار نفوذپذیری نسبی آورده شده است.

جدول ۱-۲. نفوذپذیری مغناطیسی نسبی برخی از مواد [۱۱]

نوع ماده	ماده	نفوذپذیری نسبی (μ_r)
غیرمغناطیسی	خلاء	۱
دیامغناطیسی	آب	۰/۹۹۹۹۱
	مس	۰/۹۹۹۹۱
پارامغناطیس	آلومینیوم	۱/۰۰۰۰۲۲
	هوا	۱/۰۰۰۰۰۰۴
فرومغناطیس	آهن	۵۰۰۰
	نیکل	۶۰۰
	کبالت	۲۵۰

۲-۲-۹ - مغناطیس زدایی^۱

مغناطیس زدایی به معنای تضعیف خاصیت مغناطیسی یک ماده مغناطیس دائم (همانند برخی از آهن‌رباها) است. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که یک آهن‌ربا میدان مغناطیسی خارجی^۲ خود را از دست می‌دهد. دو عامل مهم در به‌وجود آمدن این پدیده زمان و دما است. عامل دما نسب به زمان تأثیرپذیری بسیار بیشتری را دارد. هنگامی که آهن‌رباهای دائمی در معرض دماهای بالا قرار بگیرند، مغناطیس زدایی رخ می‌دهد. در این موارد آهن‌ربا به طور کامل از کار افتاده و غیرقابل استفاده می‌شود [۱۱].

۲-۲-۱۰ - حلقه پسماند (هیستریزیس) مغناطیسی^۳

چگالی شار مغناطیسی (B) متناسب با شدت میدان مغناطیسی (H) افزایش پیدا می‌کند، تا نقطه‌ای که بعد از آن با افزایش شدت میدان، شار مغناطیسی افزایش پیدا نمی‌کند و به حالت اشباع خود خواهد رسید که به این پدیده اشباع مغناطیسی^۴ (B_s) گفته می‌شود. اشباع به این دلیل رخ می‌دهد که به دلیل اعمال میدان

^۱ Demagnetization

^۲ External Magnetic Field

^۳ Hysteresis Magnetic loop

^۴ Magnetic Saturation