

اصول اکتشافات مغناطیس سنجی

تأليف:

دکتر سعید میرزایی

دانشیار پژوهش، پژوهشکده علوم پایه کار دی، جهاد دانشگاهی

مجتبی رشوند

دانشجوی دکتری (توفیزیک، پژوهشکده علوم پایه کار دی)، جهاد دانشگاهی

انتشارات جهاد دانشگاهی واحد شهید بهشتی

بهار ۱۳۹۳

سرشناسه	: میرزایی، سعید، ۱۳۴۳-
عنوان و نام پدیدآور	: اصول اکتشافات مغناطیس‌سنجی / تألیف سعید میرزایی، مجتبی رشوند.
مشخصات نشر	: تهران: جهاد دانشگاهی، واحد شهید بهشتی، مرکز انتشارات، ۱۳۹۳.
مشخصات ظاهری	: ۳۱۱ ص.: مصور، نقشه، نمودار: ۱۷×۲۴ س.م.
شابک	: ۱۴۰۰۰۰ ریال: 978-964-479-048-5
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: کتابنامه: ص. [۳۰۷] - ۳۱۱.
موضوع	: اکتشاف‌های زیرزمینی مغناطیسی
موضوع	: اکتشاف‌های زیرزمینی - روش‌های ژئوفیزیکی
شناسه افتخاری	: رشوند، مجتبی، ۱۳۶۳-
شناسه افزودنی	: جهاد دانشگاهی، واحد شهید بهشتی، مرکز انتشارات
رده‌بندی بکره	: ۱۳۹۳ ۶/الف ۲۶۹ TN
رده‌بندی دیویی	: ۶۲۲/۱۵
شماره کتابشناسی	: ۳۴۵۰۴۱۲



واحد شهید بهشتی

عنوان:	اصول اکتشافات مغناطیس‌سنجی
مولفین:	سعید میرزایی و مجتبی رشوند
نوبت چاپ:	اول، بهار ۱۳۹۳
ناشر:	مرکز انتشارات جهاد دانشگاهی واحد شهید بهشتی
شمارگان:	۱۰۰۰ جلد
قیمت:	۱۴۰۰۰۰ ریال
شابک:	۹۷۸-۹۶۴-۴۷۹-۰۴۸-۵

کلیه حقوق این اثر برای مؤلف و جهاد دانشگاهی محفوظ است.
 نشانی: تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، جهاد دانشگاهی واحد شهید بهشتی - صندوق پستی ۱۹۸۵۳-۲۲۲
 تلفن: ۲۲۴۳۱۹۳۳-۴-۹
 نمایر: ۲۲۴۳۱۹۳۸ پست الکترونیکی: manager@jdsb.ac.ir

فهرست

عنوان	صفحه
پیش‌گفتار	۱۳
فصل اول: مقدمه	۱۵
فصل دوم: مفاهیم پایه	۲۵
۱-۲ مقدمه	۲۵
۲-۲-۱ خلاء مغناطیسی	۲۵
۲-۲-۲ مغناطیس‌پذیری و مغناطیس‌پذیری	۲۸
۲-۲-۳ پتانسیل و میدان مغناطیسی	۲۹
۲-۲-۴ پتانسیل میدان مغناطیسی دوقطبی مغناطیسی	۳۰
۲-۲-۵ رابطه پواسون	۳۲
۲-۲-۶ میدان مغناطیسی متناهی	۳۵
فصل سوم: میدان مغناطیسی کره زمین	۳۹
۱-۳ مقدمه	۳۹
۲-۳ مؤلفه‌های میدان مغناطیسی زمین	۴۲
۳-۳ پتانسیل و میدان مغناطیسی کره زمین	۴۵
۴-۳ میدان مغناطیسی دوقطبی هم‌محور در مرکز زمین	۵۱
۵-۳ تغییرات مؤلفه‌های میدان مغناطیسی دوقطبی هم‌محور در مرکز زمین	۵۲
۶-۳ میدان مغناطیسی دوقطبی هم‌محور مایل در مرکز زمین	۵۴
۷-۳ میدان مغناطیسی غیردوقطبی	۶۶
۸-۳ تغییرات کوتاه مدت میدان مغناطیسی زمین	۶۷
۹-۳ تغییرات سده‌ای میدان مغناطیسی زمین	۷۱
۱۰-۳ منشأ میدان مغناطیسی زمین	۷۸
۱۱-۳ میدان مغناطیسی کرات دیگر	۸۰

فصل چهارم: خاصیت مغناطیسی سنگ‌ها و کانی‌ها	۸۳
۱-۴ مقدمه	۸۳
۲-۴ بردار مغناطیدگی	۸۴
۳-۴ خواص مغناطیسی سنگ‌ها و کانی‌ها	۸۷
۴-۴ مغناطیس‌پذیری و مغناطیدگی القائی	۹۳
۱-۴-۴ نوع و مقدار کانی‌های مغناطیسی	۹۳
۲-۴-۴ شکل جسم	۹۴
۳-۴-۴ ناهمسانگردی و مغناطیس‌پذیری	۹۸
۴-۴-۴ سایر عوامل	۱۰۱
۴-۴-۴ مغناطیدگی باقیمانده ذاتی	۱۰۲
۱-۴-۴ انواع مغناطیدگی باقیمانده	۱۰۳
۴-۴-۴ مغناطیدگی باقیمانده هم‌دما	۱۰۵
۱-۴-۴ مغناطیدگی باقیمانده گرانشی	۱۰۷
۳-۴-۴ مغناطیدگی باقیمانده حرارتی	۱۰۸
۴-۴-۴ مغناطیدگی باقیمانده شیمیایی	۱۱۰
۵-۴-۴ مغناطیدگی باقیمانده ریزشی و آواری	۱۱۱
۶-۴-۴ مغناطیدگی باقیمانده حاصل از فشار و دینامیکی	۱۱۳
۲-۴-۴ انواع مختلف مغناطیدگی باقیمانده ذاتی در سنگ‌های مختلف	۱۱۳
فصل پنجم: تعیین خاصیت مغناطیسی سنگ‌ها	۱۱۵
۱-۵ مقدمه	۱۱۵
۲-۵ نمونه‌برداری توجیه شده	۱۱۵
۳-۵ دستگاه‌های اندازه‌گیری	۱۲۰
۱-۳-۵ مغناطیس‌سنج ناپایدار	۱۲۰
۱-۳-۵ اندازه‌گیری در موقعیت جانبی	۱۲۲
۲-۳-۵ اندازه‌گیری در اولین موقعیت گاوس	۱۳۰
۳-۳-۵ اندازه‌گیری در دومین موقعیت گاوس	۱۳۰

۱۳۱.....	۴-۱-۳-۵ محاسبه مغناطیدگی
۱۳۲.....	۲-۳-۵ کاپامتر
۱۳۴.....	۳-۳-۵ دستگاه پل مغناطیس پذیری
۱۳۷.....	۴-۳-۵ مغناطیس سنج های گردان
۱۴۰.....	۴-۵ بررسی نمونه های سنگی جمع آوری شده
۱۴۰.....	۱-۴-۵ بررسی مجموعه ای از نمونه ها
۱۴۱.....	۲-۴-۵ بررسی پارامترهای جهت
۱۴۵.....	۵ مطالعات دیرینه مغناطیس و باستان مغناطیس
۱۴۶.....	۱-۵ بررسی پایداری دیرینه مغناطیسی مغناطیدگی باقیمانده ذاتی
۱۴۷.....	۱-۱-۵-۵ آزمون ها و مطالعات میدانی
۱۵۰.....	۱-۱-۵-۵ آزمون ها و مطالعات آزمایشگاهی
۱۶۲.....	۱-۵-۵ بازتولید جهت مغناطیدگی باقیمانده اولیه
۱۶۶.....	۳-۵-۵ بررسی مجموعه ای از نمونه های جمع آوری شده
۱۷۲.....	۴-۵-۵ بازتولید دامنه گردان در مغناطیسی زمین
۱۷۷.....	فصل ششم: کاوش به روش مغناطیسی
۱۷۷.....	۱-۶ مقدمه
۱۷۹.....	۲-۶ بی هنجاری مغناطیسی حاصل از هرزده مغناطیسی دلخواه
۱۸۳.....	۳-۶ بی هنجاری مغناطیسی حاصل از توده های مغناطیسی با هندسه ساده
۱۸۳.....	۱-۳-۶ بی هنجاری مغناطیسی حاصل از میله مرکزی
۱۸۶.....	۲-۳-۶ بی هنجاری مغناطیسی حاصل از صفحه قائم
۱۹۰.....	۴-۶ مغناطیس سنج ها
۱۹۰.....	۱-۴-۶ مغناطیس سنج فلاکس گیت
۱۹۴.....	۲-۴-۶ مغناطیس سنج پروتون
۱۹۵.....	۳-۴-۶ مغناطیس سنج بخار قلبایی
۱۹۷.....	۴-۴-۶ شیب پیمایا گرادیان سنج مغناطیسی
۱۹۸.....	۵-۴-۶ مغناطیس سنج های کوانتومی

- ۵-۶ انواع مختلف پیمایش ۱۹۹
- ۶-۶ عوامل مهم در برداشت داده‌ها ۲۰۲
- ۷-۶ اعمال تصحیحات مختلف ۲۰۵
- ۶-۷-۱ تصحیح اثر تغییرات روزانه میدان مغناطیسی زمین ۲۰۶
- ۶-۷-۲ تصحیح اثر میدان مغناطیسی زمین ۲۰۸
- ۶-۷-۳ تصحیح اثر ارتفاع (عوارض یا توپوگرافی زمین) ۲۰۹
- ۸-۶ پردازش داده‌های ژئوفیزیکی ۲۱۰
- ۶-۸-۱ داده‌های ژئوفیزیکی رقومی یا دیجیتال ۲۱۱
- ۶-۸-۲ تحلیل طیفی و تبدیل فوریه ۲۱۴
- ۶-۸-۳ نوبه‌ها و فیلترهای رقومی ۲۱۷
- ۶-۹-۱ سیستم‌های مغناطیسی ۲۱۹
- ۶-۹-۲ تغییر پهنایها و نقشه‌ها ۲۲۲
- ۶-۹-۲-۱ فیلترهای مختلف در تفسیر کیفی بی‌هتجاری‌های مغناطیسی ۲۲۶
- ۶-۹-۲-۲-۱ فیلتر مستقیم ۲۲۶
- ۶-۹-۲-۲-۲ فیلتر مستقیم ۲۲۹
- ۶-۹-۲-۲-۳ فیلتر ادامه‌دار ۲۳۳
- ۶-۹-۲-۴ فیلتر سیگنال تحلیلی ۲۳۶
- ۶-۹-۲-۵ فیلترهای مرتبه‌کسری ۲۳۹
- ۶-۹-۲-۶ فیلتر انتقال به قطب مغناطیسی ۲۴۱
- ۶-۹-۲-۷ فیلتر شبه‌گرانی ۲۴۳
- ۶-۹-۲-۸ فیلترهای ترکیبی ۲۴۴
- ۶-۹-۳ تفسیر کمی بی‌هتجاری‌های مغناطیسی ۲۴۷
- ۶-۹-۳-۱ روش‌های مستقیم در تفسیر کمی داده‌های مغناطیسی ۲۴۷
- ۶-۹-۳-۱-۱ روش نیم‌شیب پیترز ۲۴۷
- ۶-۹-۳-۱-۲ روش پاراسینس ۲۴۹
- ۶-۹-۳-۱-۳ روش اوپلر ۲۴۹

- ۲۵۵..... ۶-۹-۳-۱-۴ روش سیگنال تحلیلی-واهمامیخت اوپلر
- ۲۵۸..... ۶-۹-۳-۱-۵ روش سیگنال تحلیلی-واهمامیخت اوپلر بهبود یافته
- ۲۶۰..... ۶-۹-۳-۱-۶ روش گرادیان افقی سیگنال تحلیلی
- ۲۶۶..... ۶-۹-۳-۲ روش پیشرو و روش معکوس در تفسیر کمی داده‌های مغناطیسی
- ۲۸۳..... ۶-۱۰-۱ استفاده از نرم‌افزارهای کاربردی
- ۲۸۳..... ۶-۱۰-۱ Oasis Montaj نرم‌افزار
- ۲۹۰..... ۶-۱۰-۱-۱ بسته Montaj Geophysics
- ۲۹۰..... ۶-۱۰-۱-۲ بسته Montaj Airborne Quality Control
- ۲۹۲..... ۶-۱۰-۱-۳ بسته Montaj Geophysics Levelling
- ۲۹۳..... ۶-۱۰-۱-۴ بسته Montaj MAGMAP Filtering
- ۲۹۴..... ۶-۱۰-۱-۵ بسته Montaj Grav/Mag Interpretation
- ۲۹۸..... ۶-۱۰-۱-۶ Potent Q
- ۳۰۱..... ۶-۱۰-۲ Encom Mod Vision نرم‌افزار
- ۳۰۱..... ۶-۱۰-۲-۱ بسته Encom
- ۳۰۱..... ۶-۱۰-۲-۲ بسته Encom Model Vision
- ۳۰۴..... ۶-۱۰-۲-۳ بسته Encom QuickMag
- ۳۰۷..... منابع

علائم و اختصارات

علامت	مفهوم	واحد
B	القاء مغناطیسی	تسلا (نانوتسلا، گاما)
C	ضریب - $C = C''\mu_0 = (1/4\pi) \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} = 10^{-7}$	هنری بر متر
C_p	ضریب گرانث نیوتن - $C_p = 6.67 \times 10^{-11}$	مترمکعب بر کیلوگرم مربع ثانیه
C'	ضریب تبدیل سیستم cgs به SI - $C' = 1/4\pi$	-
D	درجه انحراف میدان مغناطیسی کل زمین	درجه
d	درجه انحراف در مغناطیدگی	درجه
d_n	زاویه میل بردار مغناطیدگی باقیمانده	درجه
ΔT	بی‌همجاری مغناطیسی	نانوتسلا، گاما
F	نیرو	نیوتن
f	فرکانس	هرتز
$\bar{F}$	برگوارگی مغناطیسی	-
f_N	فرکانس نایکونست	هرتز
φ	عرض جغرافیایی	درجه
γ_p	ضریب ژیرومغناطیسی پروتون - $\gamma_p = 0.26753$	هرتز بر نانوتسلا
H	مؤلفه افقی میدان مغناطیسی کل زمین	تسلا، گاما
H'	شدت میدان مغناطیسی	تسلا، گاما
I	زاویه میل میدان مغناطیسی کل زمین	درجه
i	زاویه میل بردار مغناطیدگی	درجه
i_{app}	زاویه میل ظاهری	درجه
i_n	زاویه میل بردار مغناطیدگی باقیمانده	درجه
K	عدد موج	بر متر

χ	مغناطیس پذیری	-
χ'	مغناطیس پذیری ظاهری	-
L	خط شدگی مغناطیسی	-
λ	طول جغرافیایی	درجه
$\bar{\lambda}$	طول موج	متر
M	مغناطیدگی	آمپر بر متر
m	ممان مغناطیسی	آمپر بر مترمربع
M	مغناطیدگی القائی	آمپر بر متر
M_{IRM}	مغناطیدگی باقیمانده (ذاتی) - IRM	آمپر بر متر
M_r	مغناطیدگی باقیمانده همدا - IRM	آمپر بر متر
M_{VRM}	مغناطیدگی باقیمانده گرانی - VRM	آمپر بر متر
M_{TRM}	مغناطیدگی باقیمانده حرارتی - TRM	آمپر بر متر
M_{PTRM}	مغناطیدگی باقیمانده حرارتی ناکامل - $PTRM$	آمپر بر متر
M_{CRM}	مغناطیدگی باقیمانده شیمیایی - CRM	آمپر بر متر
M_{DRM}	مغناطیدگی باقیمانده رادیو - DRM	آمپر بر متر
M_{PRM}	مغناطیدگی باقیمانده حاصل از شار - PRM	آمپر بر متر
M_{DyM}	مغناطیدگی باقیمانده دینامیکی - DyM	آمپر بر متر
M'	مغناطیدگی در محیط آزمایشگاه	آمپر بر متر
M''	مغناطیدگی مربوط به زمان های دور	آمپر بر متر
μ	ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی مطلق	و بر بر آمپر متر
μ_0	ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی خلاء	و بر بر آمپر متر
μ_r	نسبت نفوذ پذیری مغناطیسی	-
N	ضریب مغناطیدگی	-
P	درجه ناهمسانگردی مغناطیس پذیری	-
Q	نسبت کونیگس برگر	-
ρ	چگالی	کیلوگرم بر متر مکعب
T	میدان مغناطیسی (بردار القاء مغناطیس) زمین در محل اندازه گیری	نانتوسلا، گاما

T'	شدت میدان مغناطیسی زمین	آمپر بر متر
T_v	میدان مغناطیسی حاصل از توده با خاصیت مغناطیسی	نانوتسلا، گاما
T_{ul}	میدان مغناطیسی ناشی از بی‌هنجاری‌های محلی	نانوتسلا، گاما
$T_{ul'}$	میدان مغناطیسی ناشی از بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای	نانوتسلا، گاما
T_i	میدان غیردوقطبی کره زمین	نانوتسلا، گاما
T_d	میدان دوقطبی کره زمین	نانوتسلا، گاما
T^i	میدان مغناطیسی در محیط آزمایشگاه	نانوتسلا، گاما
T	میدان مغناطیسی حاصل از میدان دوقطبی، میدان غیردوقطبی و میدان ناحیه‌ای کره زمین	نانوتسلا، گاما
τ	میدان مغناطیسی زمان‌های دور	نانوتسلا، گاما
θ	مختصات جغرافیایی	درجه
W	انسیسپا مغناطیسی	آمپر
X	مؤلفه‌های عمودی و به شمال میدان مغناطیسی کل زمین	نانوتسلا، گاما
Y	مؤلفه‌های افقی و به شرق میدان مغناطیسی کل زمین	نانوتسلا، گاما
Z	مؤلفه‌های قائم و به عمق میدان مغناطیسی کل زمین	نانوتسلا، گاما

پیش‌گفتار

امروزه با پیشرفت علوم و فناوری‌های نوین در زمینه‌های مختلف، علاوه بر رشته‌های اصلی دانشگاهی، گرایش‌ها و تخصص‌های مختلفی به تناسب نیازهای امروز پدید آمده است؛ که بعضاً این گرایش‌ها فاصله زیادی نیز از یکدیگر دارند. روش مغناطیس‌سنجی از جمله گرایش‌های کاربردی رشته ژئوفیزیک است که در مطالعات مختلف زمین‌شناسی، مطالعات اکتشافی شامل اکتشافات معدنی و اکتشافات مازا، میدروکریور و مطالعات باستان‌شناسی و دیرینه‌مغناطیس به‌کار می‌رود. اکتشافات مغناطیس‌سنجی یا اکتشافات مغناطیس‌سنجی از جمله سرفصل‌های درسی واحد اکتشافات ژئوفیزیک است که در دوره‌های کارشناسی و کارشناسی ارشد رشته‌های اکتشاف معدنی، زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و اکتشاف نفت تدریس می‌شود. همچنین این واحد درسی به عنوان واحد پایه‌ای مستقل در دوره‌های کارشناسی ارشد و دکتری ژئوفیزیک گرایش ژئومغناطیس تدریس می‌شود.

بیشترین سعی نگارندگان این اثر عطا شده به آشنایی کامل خوانندگان عزیز با مبانی و کاربردهای روش مغناطیس‌سنجی به صورت گام به گام می‌باشد. دانشجویان، کارشناسان و علاقه‌مندان با مطالعه این کتاب با آگاهی پایه روش مغناطیس‌سنجی، میدان مغناطیسی زمین، شناخت خاصیت مغناطیسی سنگ‌ها، برداشت‌های صحرایی و چگونگی اندازه‌گیری‌ها، روش‌های مختلف تفکیک و مدل‌سازی و استفاده از نرم‌افزارهای کاربردی در اکتشافات مغناطیس‌سنجی آشنا می‌شوند.

بدون تردید تألیف این اثر مرهون همکاری بسیاری از افراد است که ذکر نام آنها در این مجال نمی‌گنجد. از زحمات تمامی این افراد به‌ویژه استادای محترم خانواده مؤلفین، دکتر محمد محمدزاده مقدم، سرکار خانم معصومه سبزی و دکتر نیلوفر یحیی‌پور جلالی صمیمانه قدردانی می‌شود. همچنین مؤلفین وظیفه خود می‌دانند که از انتشارات جهاد دانشگاهی واحد شهید بهشتی کمال تشکر را داشته باشند. بی‌شک، علی‌رغم زحمات زیادی که برای تألیف این کتاب و انتقال صحیح

مطالب و مفاهیم آن کشیده شده است، خالی از ایراد نخواهد بود. بنابراین، مؤلفین به نظرات و دیدگاه‌های اصلاحی استادان، محققین و کارشناسان محترم ارج می‌نهند.

سمید میرزایی - مجتبی رشوند

بهار ۱۳۹۳

www.ketab.ir