

ابزار گذاری و رفتارنگاری ژئوتکنیکی در فضاهاى زیر زمينى

تالیف:

دکتر کاوه آهنگری

(دانشیار و عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران)

مهندس آرمان قلی نژاد پاجی

سرشناسه	: آهنگری، کاوه، ۱۳۵۲ -
عنوان و نام پدیدآور	: ابزارگذاری و رفتارنگاری ژئوتکنیکی در فضاهاى زیرزمینی/ تألیف کاوه آهنگری، آرمان قلی‌نژادپاجی.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات، ۱۳۹۵.
مشخصات ظاهری	: [ش]، ۲۰۴ ص.: مصور، جدول.
شابک	: 978-964-10-4406-2
وضعیت فهرست نویسی	: فیبا
یادداشت	: کتابنامه: ص. [۲۰۱] - ۲۰۴.
موضوع	: ساختمان‌سازی زیرزمینی -- وسایل و تجهیزات
موضوع	: Underground construction -- Equipment and supplies
موضوع	: معماری زیرزمینی -- وسایل و تجهیزات
موضوع	: Underground architecture -- Equipment and supplies
موضوع	: تونل‌سازی -- ابزار و وسایل
موضوع	: Tunneling -- Equipment and supplies
شناسه افزوده	: قلی‌نژاد پاجی، آرمان، ۱۳۶۶ -
شناسه افزوده	: دانشگاه آزاد اسلامی. واحد علوم و تحقیقات
رده‌بندی کنگره	: ۱۳۹۵/۹۷۱۲/۴۷۱
رده‌بندی دیویی	: ۶۴۰/۹۶۴
شماره کتابشناسی ملی	: ۴۴۹۵۹۲۴



نام کتاب: ابزارگذاری و رفتارنگاری ژئوتکنیکی در فضاهاى زیرزمینی

تألیف: دکتر کاوه آهنگری، مهندس آرمان قلی‌نژاد پاجی

چاپ اول: پاییز ۱۳۹۵

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۱۰-۴۴۰۶-۲ ISBN: 978-964-10-4406-2

تیراژ: ۲۰۰۰ جلد

قیمت: ۱۳۰۰۰۰ ریال

مرکز پخش: تهران، انتهای بزرگراه شهید ستاری، میدان دانشگاه آزاد اسلامی به سمت

حصارک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ساختمان علوم انسانی

تلفن: ۴۴۸۶۵۱۱۱

فهرست

عنوان

صفحه

مقدمه	۱
فصل اول: تعاریف و اصطلاحات ابزاربندی و رفتارنگاری	۷
۱-۱- آشنایی	۹
۲-۱- تطابق	۹
۳-۱- دقة	۱۰
۴-۱- خطا	۱۰
۵-۱- خطیگی	۱۳
۶-۱- صحت	۱۴
۷-۱- ظرافت	۱۶
۸-۱- محدوده	۱۶
۹-۱- حساسیت	۱۶
۱۰-۱- ظرفیت	۱۷
۱۱-۱- درجه حرارت کاری	۱۷
۱۲-۱- پسماند	۱۷
۱۳-۱- اختلال (پارازیت)	۱۸
۱۴-۱- کالیبره کردن (واسنجی) ابزار	۱۸
۱-۱۴-۱- کالیبراسیون کارخانه‌ای	۱۹
۲-۱۴-۱- کالیبراسیون پذیرش	۱۹
۳-۱۴-۱- کالیبراسیون دوره‌ای در طول دوره کاربری	۲۰
۱۵-۱- ویژگی‌های ابزار ایده‌آل	۲۰
۱۶-۱- اجزای اصلی سیستم‌های رفتارسنجی	۲۱
۱-۱۶-۱- حسگر	۲۱
۲-۱۶-۱- سیستم انتقال‌دهنده	۲۱
۳-۱۶-۱- سیستم نمایشگر با ثبت کننده	۲۱
۱۷-۱- مبدل‌های ابزاربندی و سیستم‌های جمع‌آوری داده‌ها	۲۲

۲۲.....	۱-۱۷-۱- ابزار مکانیکی
۲۲.....	۲-۱۷-۱- ابزار هیدرولیکی
۲۳.....	۳-۱۷-۱- ابزار پنوماتیکی
۲۳.....	۴-۱۷-۱- ابزار الکتریکی
۲۵.....	۱۸-۱- جمع‌بندی

فصل دوم: کلیات رفتارنگاری در فضاهای زیرزمینی

۲۹.....	۱-۲- آشنایی
۲۹.....	۲- عوامل ناپایداری در فضاهای زیرزمینی
۳۰.....	۳-۲- اهداف رفتارسنجی در حفاریات زیرزمینی معدنی
۳۲.....	۴-۲- خصایصیات مورد نیاز در رفتارسنجی فضاهای زیرزمینی
۳۲.....	۱-۴-۲- فشارسنجی‌های توده‌سنگ
۳۲.....	۲-۴-۲- رفتارسنجی برقی سیستم نگهداری
۳۳.....	۳-۴-۲- پارامترهای مورد سنجش در حفاریات زیرزمینی
۳۸.....	۵-۲- جمع‌بندی

فصل سوم: معرفی انواع سیستم‌های اندازه‌بندی مورد استفاده در فضاهای زیرزمینی و پارامترهای رفتارسنجی سیستم‌های نگهداری

۳۹.....	۱-۳- آشنایی
۴۱.....	۲-۳- سیستم‌های ابزاربندی در فضاهای زیرزمینی
۴۱.....	۱-۲-۳- دستگاه‌های اندازه‌گیری جابه‌جایی
۴۱.....	۲-۲-۳- الف- کشیدگی سنج گمانه‌ای تک‌نقطه‌ای و چندنقطه‌ای
۴۲.....	۱-۲-۳- ب- انحراف سنج
۴۲.....	۲-۲-۳- دستگاه‌های اندازه‌گیری تنش و کرنش
۴۲.....	۲-۲-۳- الف- سلول فشار
۴۳.....	۲-۲-۳- ب- کرنش سنج
۴۵.....	۳-۲-۳- دستگاه‌های اندازه‌گیری نیرو و بار (بارسنج)
۴۵.....	۳-۲-۳- الف- بارسنج مکانیکی
۴۵.....	۳-۲-۳- ب- بارسنج مقاومت الکتریکی

- ۴۷..... ۳-۲-۳-پ-بارسنج سیم لرزان (VW)
- ۴۹..... ۴-۲-۳-دستگاه‌های اندازه‌گیری فشار آب زیرزمینی
- ۵۰..... ۳-۳-پارامترهای رفتارسنجی سیستم‌های نگهداری
- ۵۱..... ۱-۳-۳-سیستم‌های نگهداری چوبی (چوب‌بست)
- ۵۲..... ۲-۳-۳-سیستم‌های نگهداری قاب فولادی
- ۵۲..... ۳-۳-۳-سیستم‌های نگهداری بولتی (بیچ سنگ)
- ۵۳..... ۳-۳-۳-الف-آزمایش بر روی وضعیت شبیه‌سازی شده
- ۵۵..... ۳-۳-۳-ب-آزمایش‌های برجا
- ۵۷..... ۳-۳-۱-ب-رفتارنگاری میل مهار
- ۶۰..... ۴-۱-۳-سیستم‌های نگهداری شاتکریت و پوشش بتنی
- ۶۱..... ۳-۳-۳-الف-سنبل شمار
- ۶۳..... ۴-۳-۳-ب-تنش‌سنج‌های درون بتن
- ۶۳..... ۴-۳-جمع‌بندی
- ۶۵..... فصل چهارم: مبانی (نصب و قرائت) سیستم‌های رانگاری
- ۶۷..... ۱-۴-آشنایی
- ۶۷..... ۲-۴-نحوه انتخاب محل نصب دستگاه
- ۶۸..... ۳-۴-نحوه قرائت دستگاه و گزارش نتایج
- ۶۸..... ۱-۳-۴-نحوه قرائت (کنترل راه دور یا دستی)
- ۶۸..... ۱-۳-۴-الف-قرائت‌های غیرخودکار
- ۶۸..... ۱-۳-۴-ب-قرائت‌های خودکار
- ۶۹..... ۲-۳-۴-تعداد دفعات قرائت
- ۷۲..... ۵-۳-۴-الف-پردازش و نمایش داده‌ها
- ۷۳..... ۵-۳-۴-ب-غریبال داده‌ها
- ۷۴..... ۵-۳-۴-پ-محاسبات
- ۷۵..... ۵-۳-۴-ت-ترسیم داده‌ها
- ۷۶..... ۵-۳-۴-ث-درج وقایع مهم روی نمودار
- ۷۷..... ۵-۳-۴-ج-تحلیل داده‌های ابزاربندی
- ۷۷..... ۵-۳-۴-چ-گزارش نتایج

۷۷.....	۴-۴- نحوه حفاظت دستگاه‌های رفتارسنجی
۷۷.....	۴-۴-۱- نگهداری کل ابزار قبل از نصب
۷۸.....	۴-۴-۲- نگهداری دستگاه‌های قرائت قابل حمل و سیستم قرائت مرکزی
۷۸.....	۴-۴-۳- نگهداری کابل‌ها در زمان نصب
۷۸.....	۴-۵- اشکالات قرائت
۷۸.....	۴-۵-۱- ناپایداری در قرائت
۷۹.....	۴-۵-۲- قرائت نشدن حسگر
۸۰.....	۴-۵-۳- اشکالات قرائت دما
۸۲.....	۴-۶- جمع‌بندی

فصل پنجم: برنامه‌ریزی ابزاربندی در تونل‌ها و معادن زیرزمینی..... ۸۵

۸۷.....	۵-۱- آشنایی
۸۷.....	۵-۲- مراحل نصب رفتارسنجی در فضاهای زیرزمینی
۸۷.....	۵-۲-۱- کاربرد رفتارسنجی در مرحله طراحی
۸۸.....	۵-۲-۲- کاربرد رفتارسنجی در مرحله ساخت و حفاری
۸۸.....	۵-۲-۳- کاربرد رفتارسنجی در مرحله بهره‌برداری، فعالیت و استخراج
۸۸.....	۵-۲-۴- کاربرد رفتارسنجی جهت مقایسه علمی و فنی
۸۹.....	۵-۳- خصوصیات عمومی ابزارها
۹۰.....	۵-۴- برنامه‌ریزی ابزاربندی
۹۱.....	۵-۵- اصول پایه‌ای برای قرائت ابزارها و اطلاعات حاصل از آن
۹۳.....	۵-۶- قرائت نتایج و خطاهای ممکن
۹۴.....	۵-۷- جمع‌بندی

فصل ششم: روش اجرای سیستم‌های رفتارنگاری (نصب، اندازه‌گیری، ثبت، پردازش و

۹۵.....	تجزیه و تحلیل جامع)
۹۷.....	۶-۱- آشنایی
۹۷.....	۶-۲- روش اجرای ابزار اندازه‌گیری جابه‌جایی و تغییر شکل
۹۷.....	۶-۲-۱- سیستم‌های نقشه‌برداری (دوربین نقشه‌برداری)
۹۸.....	۶-۲-۲- همگرایی سنج‌ها

۹۹.....	۳-۲-۶- کشیدگی سنج
۱۰۰.....	۳-۲-۶- الف- کشیدگی سنج لغزنده
۱۰۱.....	۳-۲-۶- ب- کشیدگی سنج درون گمانه‌ای ثابت
۱۰۳.....	۳-۲-۶- ب- انواع گیرداری نقاط اندازه‌گیری
۱۰۶.....	۳-۲-۶- ت- انواع رابط انتقال دهنده جابه‌جایی
۱۱۰.....	۴-۲-۶- انحراف سنج‌ها
۱۱۰.....	۴-۲-۶- الف- انحراف سنج معمولی
۱۱۵.....	۴-۲-۶- ب- انحراف سنج در محل
۱۱۹.....	۴-۲-۶- درزسنج‌ها و ترک‌سنج‌ها
۱۲۰.....	۴-۲-۶- الف- درزسنج و ترک‌سنج ساده
۱۲۱.....	۴-۲-۶- ب- درزسنج و ترک‌سنج مکانیکی
۱۲۵.....	۵-۲-۶- ب- درزسنج و ترک‌سنج الکتریکی
۱۳۴.....	۵-۲-۶- ت- درزسنج و ترک‌سنج با فرآیند تار مرتعش
۱۳۶.....	۶-۲-۶- شیب‌سنج
۱۳۷.....	۶-۲-۶- الف- شیب‌سنج مکعبی
۱۳۷.....	۶-۲-۶- ب- شیب‌سنج با مبدل (براسدیو) شیب‌سنج
۱۳۹.....	۶-۲-۶- پ- شیب‌سنج با مبدل تار مرتعش
۱۳۹.....	۶-۲-۶- ت- شیب‌سنج با مبدل الکترولیستی
۱۴۰.....	۷-۲-۶- تل‌نیل
۱۴۳.....	۳-۶- روش اجرای ابزار اندازه‌گیری نیرو، تنش، کرنش و بار
۱۴۳.....	۱-۳-۶- ابزار اندازه‌گیری نیرو
۱۴۳.....	۱-۳-۶- الف- نیروسنج هیدرولیکی دارای فشارسنج
۱۴۵.....	۱-۳-۶- ب- نیروسنج با فرآیند مقاومت الکتریکی
۱۵۱.....	۱-۳-۶- پ- نیروسنج با فرآیند تار مرتعش
۱۵۳.....	۲-۳-۶- ابزار اندازه‌گیری تنش
۱۵۶.....	۳-۳-۶- ابزارهای اندازه‌گیری کرنش
۱۵۶.....	۳-۳-۶- الف- کرنش سنج با فرآیند تار مرتعش
۱۵۷.....	۳-۳-۶- ب- کرنش سنج با فرآیند مقاومت الکتریکی
۱۷۴.....	۴-۶- روش اجرای ابزار اندازه‌گیری فشار و سطح آب زیرزمینی

۱۷۵	۶-۴-۱- نصب
۱۷۵	۶-۴-۲- قرائت
۱۷۶	۶-۴-۳- مقایسه پیزومترها
۱۷۷	۶-۴-۴- پیزومتر دیافراگمی
۱۷۷	۶-۴-۴- الف- پیزومتر پنوماتیکی
۱۷۹	۶-۴-۴- ب- پیزومتر تار مرتعش
۱۸۰	۶-۴-۴- پ- پیزومتر مقاومت الکتریکی
۱۸۰	۶-۴-۵- پیزومتر غیر دیافراگمی
۱۸۰	۶-۴-۵- الف- پیزومتر لوله قائم سرباز
۱۸۳	۶-۴-۵- ب- پیزومتر هیدرولیکی
۱۸۵	۶-۴-۶- نرزیاده ب
۱۸۵	۶-۵- جمع بندی

فصل هفتم: روش تحلیل داده‌ها، فتارتکاری و تلفیق نتایج حاصل از ابزارهای مختلف

۱۸۷	۷-۱- آشنایی
۱۸۹	۷-۲- تفسیر داده های ابزار دقیق
۱۸۹	۷-۳- راهنمای کلی برای تفسیر داده‌ها
۱۹۰	۷-۳-۱- تحلیل مقدماتی
۱۹۰	۷-۳-۲- برنامه ریزی
۱۹۰	۷-۳-۳- تکرار تفسیرها
۱۹۱	۷-۳-۴- انتخاب نمودارها
۱۹۱	۷-۳-۴- الف- نمودارهای کمکی جهت غربال داده‌ها
۱۹۱	۷-۳-۴- ب- نمودارهای داده در برابر زمان
۱۹۲	۷-۳-۴- پ- نمودارهایی برای کمک به پیش‌بینی
۱۹۲	۷-۳-۴- ت- نمودارهای مقایسه های عدم قطعیت
۱۹۲	۷-۳-۴- ث- نموداری برای مقایسه اندازه گیری‌ها و مشاهدات
۱۹۳	۷-۳-۴- ج- نمودارهای تاثیر پارامترها
۱۹۳	۷-۴- داده‌های مبهم

- ۱-۵-۷- گزارش در ضمن رفتارسنجی ۱۹۳
- ۲-۵-۷- گزارش نهایی برنامه رفتارسنجی ۱۹۴
- ۱-۷-۷- ترکیب داده‌های کشیدگی سنج و همگرایی سنج ۱۹۶
- ۲-۷-۷- ترکیب داده‌های کشیدگی سنج و بارسنج هیدرولیکی میل‌مهری ۱۹۶
- ۸-۷- جمع‌بندی ۱۹۷
- منابع ۱۹۹

مقدمه

بشر برای دست یافتن به اهداف خود بسیاری از مشکلات پیچیده را از پیش رو برداشت؛ در این میان و در سیر تاریخی پیشرفت خویش برای اهداف گوناگون راه به دل زمین برد. قنات‌هایی که در خاک ایران به عنوان بخشی از تاریخی این مهد کهن به یادگار مانده، بخشی از این تلاش‌های مانا می‌باشد.

احتمالاً اولین تونل‌ها در عصر حجر برای توسعه خانه‌ها با انجام حفاریات توسط ساکنان شروع شد. این امر نشانگر این است که آنها در تلاش‌های خود، جهت ایجاد حفاریات به دنبال راهی برای به رد شرایط زندگی خود بوده‌اند. پیش از تمدن روم باستان، در مصر، یونان، هند و خاور دور و ایتالیای شمالی، تماماً تکنیک‌های تونل‌سازی دستی مورد استفاده قرار می‌گرفت که در اغلب آنها نیز از فرایند آبی مرتبط با آتش برای حفر تونل‌های نظامی، انتقال آب و مقبره‌ها کمک گرفته شده است.

در ایران نیز از چند هزار سال پیش، به‌منظور استفاده از آب‌های زیرزمینی تونل‌هایی موسوم به قنات حفر شده است که طول بعضی از آنها به ۷۰ کیلومتر و یا بیشتر نیز می‌رسد. تعداد قنات‌های ایران بالغ بر ۱۰۰۰۰ رشته برآمده شده است. جالب توجه است که این قنات‌های متعدد، طویل و عمیق با وسایل بسیار ابتدای حفر شده‌اند. رومی‌ها نیز در ساخت قنات‌ها و همچنین در حفاری تونل‌های راه پیکار بودند. آنها در ضمن اولین دوربین‌های مهندسی اولیه را در جهت کنترل تراز و حفاری تونل‌ها به کار بردند.

تونل‌سازی همزمان با انقلاب صنعتی، به‌ویژه به‌منظور حفر کانال‌ها، تحرک قابل ملاحظه‌ای یافت. تونل‌سازی به گسترش و پیشرفت کانال‌سازی کمک کرد و این امر در توسعه صنعت به‌ویژه در قرون ۱۸ و ۱۹ میلادی در انگلستان سهم بسزایی داشت. کانال‌های یکی از پایه‌های انقلاب صنعتی بودند و توانستند در مقیاس بسیار بزرگ هزینه‌های حمل و نقل را کاهش دهند. تونل مال‌پاس با طول ۱۵۷ متر بر روی کانال دومیدی در جنوب فرانسه، اولین تونلی بود که در دوره‌های مدرن در سال ۱۶۸۱ ساخته شد. همچنین اولین تونل ساخته شده با کاربرد حفاری و انفجار باروت بود. در انگلستان، قرن ۱۸ نیز جیمز بریندلی از خانواده‌ای مزرعه‌دار با نظارت بر طراحی و ساخت بیش از ۵۸۰ کیلومتر کانال و تعدادی تونل به‌عنوان پدر کانال و تونل‌های کانالی ملقب شد. وی در سال ۱۷۵۹ با ساخت یک کانال به طول ۱۶ کیلومتر مجموعه معدن زغال دوک بریدجواتر را به شهر منچستر متصل نمود. اثر اقتصادی تکمیل این کانال، نصف شدن قیمت زغال در شهر و ایجاد یک انحصار واقعی برای معدن

مذکور بود. در اوایل قرن نوزدهم به منظور عبور از قسمت‌های پایین دست رودخانه تایمز هیچ سازه‌ای موجود نبود و ۳۷۰۰ عابر مجبور بودند با طی یک راه انحرافی ۳ کیلومتری با قایق مسیر روترهایت به ویپینگ را طی کنند. اقدام به ساخت یک تونل نیز به دلیل ریزشی بودن و مناسب نبودن رسوبات کف رودخانه متوقف شد. تا اینکه در حدود سال ۱۸۲۰ فردی بنام مارک ایرامبارد برونل از فرانسه ایده استفاده از سپر را مطرح نمود و در سال ۱۸۲۵ کار احداث تونل بین روترهایت و ویپینگ را آغاز و علی‌رغم جاری شدن چند نوبت سیل در سال ۱۸۴۳ آن را بازگشایی نمود. این تونل تامس نام گرفته و اولین تونل زیر آبی بود که بدون هر گونه رودخانه انحرافی حفر شد. در دیگر موارد تونل‌های زهکشی بزرگ، نظیر تونلی با طول ۷ کیلومتر در هیل کارن انگلستان، اهمیت زیادی در توسعه صنعت معدنکاری داشته‌اند. البته بررسی تاریخچه پیشرفت در روش‌ها و تکنیک‌ها و به عبارتی در هنر تونل‌سازی نشانگر این مطلب است که مانند بسیاری دیگر از علوم و فنون، بیشتر رشد این هنر در قرن گذشته صورت گرفته و تا بحال نیز ادامه دارد.

مهندسان روم از شبکه بزرگی از تونل‌ها استفاده می‌کردند تا آب را از چشمه‌های کوهستانی به شهرها و دهکده‌ها منتقل کنند. این تونل‌ها قسمتی از سیستم‌های کانالی بودند که شامل اتاقک‌های زیرزمینی و با تارهای پل مانند شیب‌داری بودند که توسط یک سری قوس پشتیبانی می‌شدند. تا سال ۹۲ بعد از میلاد مسیح ۹ کانال تقریباً ۸۵ میلیون گالن آب را در روز از چشمه‌های کوهستانی به شهر روم منتقل می‌کردند. معدنکاری زیرزمینی برای استخراج کانسارهایی که در عمق قرار گرفته‌اند استفاده می‌شود. از آن جایی که فعالیت این معادن در سطح زمین انجام نمی‌شود، با خطرات بسیاری مواجه است. طراحی، اجرا و نگهداری در این معادن، نیازمند اطلاعات دقیقی از عوارض تأثیرگذار است. دریافت اطلاعات هرچه بیشتر، سبب افزایش آگاهی از شرایط زمین و کاهش عدم قطعیت است.

قبل از اینکه قطار و خودروها وجود داشته باشند تونل‌های حمل و نقل مانند کانال‌ها بودند. آبراه‌های مصنوعی که برای مسافرت، قایقرانی یا آبیاری استفاده می‌شدند، ریل‌ها و جاده‌های امروزی از تونل‌های امروزی به‌طور کارآیی برای عبور از موانع کوهستانی استفاده می‌کنند. ساختمان کانال از بعضی از اولین تونل‌های جهان الهام گرفته شده است. کانال زیرزمینی در لانگشایر کانتی و منچستر انگلستان از نیمه سده ۱۷۰۰ تا اواخر آن ساخته شد و شامل مایل‌ها تونل بود. یکی از اولین تونل‌های آمریکا پاو پاو (Paw Paw) بود که در غرب ویرجینیا بین سال‌های ۱۸۳۶ و ۱۸۵۰ به‌عنوان بخشی از کانال چسپایک و اوهایو ساخته شد. گرچه کانال دیگری به طریق پاو پاو اجرا نشد اما با ۳۱۱۸ فوت طول هنوز یکی از بزرگ‌ترین تونل‌های کانال در ایالات متحده است.

معدنکاری زیرزمینی برای استخراج کانسارهایی که در عمق قرار گرفته‌اند، استفاده می‌شود. از آن جایی که فعالیت این معادن در سطح زمین انجام نمی‌شود، با خطرات بسیاری مواجه است. طراحی، اجرا و نگهداری در این معادن، نیازمند اطلاعات دقیقی از عوامل تأثیرگذار است. دریافت اطلاعات هرچه بیشتر، سبب افزایش آگاهی از شرایط زمین و کاهش عدم قطعیت است.

زمین، پر از عدم قطعیت‌های ناشناخته است که بسیاری از این عدم قطعیت‌ها قابل اندازه‌گیری و حتی قابل پیش‌بینی نیستند. رفتارنگاری، بررسی تغییرات در پارامترهای قابل اندازه‌گیری است. این اندازه‌گیری به وسیله ابزار دقیق باید انجام شود. ابزار دقیق، وسیله اندازه‌گیری تغییر کمیت‌های فیزیکی است. این ابزار در علوم مختلف کارایی دارند و برای اندازه‌گیری خصوصیات مورد نیاز هر سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند. با توجه به نبود مجموعه‌ای مدون در خصوص ابزاربندی و رفتارنگاری در فضاهای زیرزمینی و همچنین محدودیت منابع بین‌المللی در این خصوص، تدوین این کتاب می‌تواند برای آشنایی با ابزار دقیق مورد استفاده در فضاهای زیرزمینی، اصول طراحی و همچنین نحوه رفتارنگاری در معادن زیرزمینی کاربردی باشد.

با توجه به پراکندگی و عدم انسجام مطالب موجود در این حیطه، هدف از تهیه این مجموعه؛ ارائه دستورالعملی برای طراحی و اجرای سیستم‌های ابزاربندی و رفتارنگاری در فضاهای زیرزمینی است که در هفت فصل تنظیم شده است.

در فصل اول اصطلاح و تعریف‌های رایج راجع به ابزار دقیق بیان می‌شوند. در این فصل، اصطلاحات معرف شرایط ابزار، مانند؛ دقت، صحت، خطا، دقت حساسیت و نظایر آن‌ها بیان شده است. این تعاریف بین انواع ابزار با کاربردهای متفاوت مشترک است. در ادامه این فصل، ویژگی‌های ابزار ایده‌آل و در نهایت اجزای اصلی سیستم رفتارنگاری بیان می‌شود. فصل اول راجع به کلیات ابزاربندی است.

در فصل دوم کلیات رفتارنگاری در فضاهای زیرزمینی بیان می‌شود. برای تسریع رفتارنگاری در هر سیستم باید عامل‌هایی که سبب بروز خطا می‌گردند، شناسایی شوند. به همین علت، این فصل با شرح عوامل موثر در ناپایداری فضاهای زیرزمینی آغاز می‌شود. در نهایت اهداف رفتارسنجی در فضاهای زیرزمینی ذکر می‌شود. با مطالعه این فصل ضمن شناخت پارامترهای فیزیکی که تحلیل تغییرات آن در فضاهای زیرزمینی حائز اهمیت است، هدف از رفتارنگاری هر یک از این پارامترها تشریح می‌شود.

فصل سوم به دو بخش اصلی تقسیم شده است. در بخش اول سیستم‌های ابزاربندی مورد استفاده در فضاهای زیرزمینی معرفی می‌شود. این بخش شامل، دستگاه‌های اندازه‌گیری

جابه‌جایی؛ تنش و کرنش؛ نیرو و بار و دستگاه‌های اندازه‌گیری فشار آب زیرزمینی است. در بخش بعدی پارامترهای رفتارسنجی در فضاهای زیرسطحی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. انواع روش‌های نگهداری ذکر شده شامل، سیستم‌های نگهداری چوبی، قاب فولادی، مهاری و پوشش بتنی است.

در فصل چهارم مبانی (نصب و قرائت) سیستم‌های رفتارنگاری توضیح داده شد. در این فصل پس از آشنایی با انواع ابزار و رفتارنگاری در فضاهای زیرزمینی، راجع به نصب محل ابزار بحث می‌شود. در ادامه چگونگی قرائت دستگاه و گزارش نتایج شرح داده می‌شود. پس از نصب ابزار در محل مناسب و جمع‌آوری اطلاعات به شیوه‌های تشریح شده، باید اطلاعات به دست آمده تحلیل شود. ارزیابی اطلاعات و اخذ نتایج می‌تواند تصمیمات طراحان و مجریان را راجع به ادامه فعالیت سیستم تغییر دهد. لذا به‌دلیل ذکر شده، در ادامه تجزیه و تحلیل نتایج و ارائه گزارش بیان می‌گردد.

در فصل پنجم برنامه‌ریزی برای ابزاربندی در فضاهای زیرزمینی شرح داده شده است. در ابتدا مراحل مختلف رفتارسنجی در فضاهای زیرزمینی، شامل طراحی، ساخت و حفاری، بهره‌برداری، فعالیت و استخراج و همچنین مقاصد علمی و فنی تشریح شده است. پس از آن ضمن بیان خصوصیات عمومی ابزار، برنامه‌ریزی برای ابزاربندی فضاهای زیرزمینی به‌همراه روندنمای ابزاربندی ارائه شده است. در ادامه مبانی قرائت ابزار و قرائت نتایج، به‌همراه خطاهای احتمالی مربوط ذکر شده‌اند. در انتها نیز انواع سیستم‌های داده‌گیری یا دریافت داده‌ها به تفصیل تشریح گشت.

در فصل ششم روش اجرای سیستم‌های رفتارنگاری شرح داده می‌شود. سیستم و دستگاه‌های مختلف اندازه‌گیری بیان شد. هدف از اندازه‌گیری هر یک از پارامترها و ابزار اندازه‌گیری آن در فضاهای زیرزمینی شرح داده شده است. در این فصل، روش نصب و ملاحظات مربوط به هر یک از ابزار زیرزمینی ذکر گردید. ابزار سنج داده شده به‌طور کلی شامل، ابزار اندازه‌گیری جابه‌جایی و تغییر شکل، تنش و کرنش، بار، فشار و سطح آب زیرزمینی است. هر یک از ابزار، انواع مختلف و شیوه‌های کار متفاوتی دارند که به آنها اشاره شده است. از ابزارهای اندازه‌گیری جابه‌جایی و تغییر شکل مطالعه شده در این فصل می‌توان به سیستم‌های نقشه‌برداری، همگرایی‌سنج‌ها، کشیدگی‌سنج‌ها، انحراف‌سنج‌ها، درزسنج‌ها و ترک‌سنج‌ها، بل‌تیل و شیب‌سنج اشاره کرد. برای مطالعه ابزارهای اندازه‌گیری تنش و کرنش و بار انواع سلول فشار، نیروسنج، کرنش‌سنج و بارسنج شرح داده شده است. انواع مختلف پیژومترها، به‌منظور تشریح سیستمی برای اندازه‌گیری فشار آب زیرزمینی بیان شده است.

در فصل هفتم، روش تحلیل داده‌های رفتارنگاری و تلفیق نتایج حاصل از ابزارهای مختلف بیان شده است. زمانی هدف از ابزاربندی و رفتارنگاری به‌خوبی برآورده می‌شود که سیستم طراحی شده برای رفتارنگاری، انتخاب ابزار مناسب، محل نصب مناسب و جمع‌آوری اطلاعات ثبت شده منجر به نتیجه شود. همه این کارها به‌منظور اخذ تصمیمات بر مبنای اطلاعات بیشتر است؛ در صورتی که نتوان نتایج درستی از اطلاعات ثبت شده با ابزار تحصیل کرد؛ ابزارگذاری کارا نخواهد بود. در این فصل یکی از مهم‌ترین مراحل رفتارنگاری شرح داده شده است. تفسیر داده‌ها که شامل، تحلیل مقدماتی، برنامه‌ریزی، تکرار تفسیرها و انتخاب نمودارهای مناسب برای اخذ نتایج مناسب می‌باشد نیز در ادامه این فصل تشریح شده است. نتایج به‌دست آمده در قالب گزارش در ضمن رفتارسنجی و گزارش نهایی برنامه رفتارسنجی ارائه می‌شود