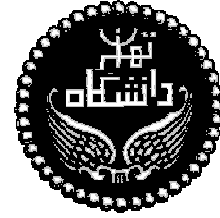
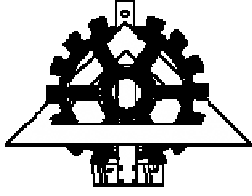


بِسْمِ

اللَّهِ

الرَّحْمَنِ

الرَّحِيمِ



دانشگاه تهران
دانشکده های فنی
دانشکده مهندسی معدن

بررسی پایداری فضاهاى زیرزمینى با استفاده از مدل سازى فیزیكى

نگارش

مهدى یوسفى

استاد راهنما: دکتر مهدى موسى

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی معدن

شهریور ماه ۱۳۸۷

به نام دوست

گرچه زحمات پدر و مادر عزیزم هیچگاه جبران پذیر نیست،
اما بیشتر نه برای تشکر و تقدیر از آنها، بلکه برای اندک کاهش
بار سنگین دینی که بر من دارند، این تحفه ناچیز را به آنها تقدیم
می‌نمایم.

امیدوارم دعای خیرشان چون همیشه، فرشته نگهبان من در
ادامه مسیر دشوار زندگی باشد.

با احترام

هشتمین روز از مهر ماه

هزار و سیصد و هشتاد و هفت خورشیدی

چکیده

در خلال دهه ۵۰ میلادی استفاده از مدل‌سازی فیزیکی مورد توجه مهندسين ژئوتکنیک واقع شد و با وجود هزینه بالای تجهیزات آزمایشگاهی و زمان طولانی پروسه مدل‌سازی فیزیکی و در مقابل هزینه اندک استفاده از مدل‌های عددی، همچنان این ابزار به عنوان یکی از روش‌های مورد استفاده در مهندسی زمین شناخته می‌شود، چراکه هنوز پاسخ روشنی برای برخی پیچیدگی‌های مرتبط با ساختارهای ژئوتکنیکی مانند پاسخ‌های غیرخطی مواد خاکی و سنگی، ناهمسانگردی مقاومت و رفتار تخریبی غیرقابل پیش‌بینی توده سنگ‌ها توسط مدل‌های عددی حاصل نشده است.

استفاده از ابزار مدل‌سازی فیزیکی مستلزم تسلط کامل بر تئوری‌های تشابه و آنالیز ابعادی است. نتیجه این تئوری‌ها، محدودیت‌هایی در یافتن مواد مناسب جهت ساخت مدل، اعمال بار وارده بر آن و روش‌های مناسب جهت ساخت و ابزاربندی مدل تحمیل می‌کند.

در این تحقیق مدل ساده‌ای از یک تونل دایره‌ای شکل به قطر 5 cm در آزمایشگاه شبیه‌سازی و تحت بار قرار گرفته است و جابجایی‌های اطراف تونل بوسیله روش فتوگرامتری اندازه‌گیری شده است. نتایج حاصله، از جابجایی معادل 0.466 mm در سقف تونل حکایت دارد که با بکارگیری روش‌های آنالیز ابعادی می‌توان جابجایی معادل 4.66 cm را برای نقطه متناظر در تونلی به قطر 5 m با خواص مکانیکی صادق در گروه‌های بی‌بعد حاصله از روابط تشابه، پیش‌بینی نمود.

روند انجام آزمایش شامل سه مرحله اصلی انتخاب ماده برای ساخت مدل، ساخت محفظه آزمایش و در نهایت انجام آزمایش مدل فیزیکی بوده است. ماده انتخاب شده ترکیبی از گچ، باریت و آب است که بلوکی به ابعاد $50 \times 40 \times 30\text{ cm}$ از آن تهیه شد. در نهایت باری معادل 15 ton بر سطح بلوک وارد گردیده و جابجایی‌های حاصل از حفاری بلوک مورد مطالعه قرار گرفت.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی فیزیکی، آنالیز ابعادی، فتوگرامتری

در آغاز سخن مراتب سپاس و قدردانی خالصانه خود را خدمت همه اساتید محترم دانشکده مهندسی معدن که با زحمات بی‌دریغ‌شان در تعلیم و تربیت اینجانب نقش بسزایی داشته‌اند، تقدیم می‌نمایم؛ خصوصاً استاد علم و ادب دکتر مهدی موسوی و اساتید زندگی و اخلاق مهندس مهدی یآوری و مهندس علی‌اصغر خدایاری که با راهنمایی‌های بی‌شائبه خویش همواره چون فانوسی هدایتگر، روشنگر مسیر زندگانی من بوده و خواهند بود.

امیدوارم سایه این اساتید ارجمند همواره بر سر دانشجویان گروه مهندسی معدن دانشکده فنی مستدام و پایدار باشد.

فهرست عناوین

فصل اول: مقدمه.....	۱
فصل دوم: شباه و آنالیز ابعادی.....	۶
۱-۲. پیشگفتار.....	۷
۲-۲. تشابه.....	۹
۱-۲-۲. تشابه هندسی.....	۹
۲-۲-۲. تشابه سینماتیک.....	۹
۳-۲-۲. تشابه دینامیک.....	۱۰
۲-۲. آنالیز ابعادی.....	۱۲
۱-۲-۲. تئوری باکینگهام.....	۱۳
۲-۲-۲. روش باکینگهام.....	۱۴
۳-۲-۲. روش هانسكر و رایتماير.....	۱۵
۴-۲-۲. تغيير سيستم براي يافتن تعداد ابعاد اصلي.....	۱۶
۳-۲. چگونگی طراحی مدل.....	۱۸
۱-۳-۲. مقیاس گذاری مدل.....	۱۹
۲-۳-۲. اثرات مقیاس.....	۲۰
فصل سوم: مدل فیزیکی فضاهای زیرزمینی.....	۲۲
۱-۳. پیش گفتار.....	۲۳
۲-۳. اصول مدل سازی فیزیکی فضاهای زیرزمینی.....	۲۴
۳-۳. تأمین نیروی وارد بر نمونه.....	۲۷
۱-۳-۳. اعمال بار بر مرزهای نمونه.....	۲۷
۲-۳-۳. مدلهای سانتریفیوژ.....	۲۹

- ۳-۳-۳. روش اصطکاک پایه ۳۰
- ۳-۳-۴. مواد مورد نیاز برای ساخت مدل ۳۳
- ۳-۳-۱. استفاده از مواد توده سنگ برجها ۳۳
- ۳-۳-۲. استفاده از مواد مصنوعی ۳۵
- ۳-۳-۵. مدل کردن ناپیوستگی ها ۳۷
- ۳-۳-۱. مدل کردن ریز ترک ها ۳۹
- ۳-۳-۲. مدل سازی فیزیکی ناپیوستگی ها ۴۰
- ۳-۳-۶. ایجاد فضا در بلوک ساخته شده ۵۱
- ۳-۳-۱. سر برشی چرخشی ۵۲
- ۳-۳-۲. سیستم جت آب ۵۲
- ۳-۳-۳. سیستم جک گذاری ۵۳
- ۳-۳-۴. قاب مرجع ۵۳
- ۳-۳-۵. نصب تونل مدل شده ۵۳
- ۳-۳-۷. ابزاربندی و رفتارنگاری مدل ۵۴
- ۳-۳-۱. روشه ای سنتی اندازه گیری در مدل فیزیکی ۵۵
- ۳-۳-۲. روشه ای مدرن اندازه گیری در مدل فیزیکی ۵۸
- فصل چهارم: انتخاب مواد و ساخت مدل فیزیکی ۶۱
- ۴-۱. پیش گفتار ۶۲
- ۴-۲. تعیین خصوصیات مواد ۶۳
- ۴-۲-۱. تعیین مدول الاستیسیته ۶۴
- ۴-۲-۲. تعیین مقاومت کششی ۷۲
- ۴-۲-۳. انتخاب نهایی ماده و تعیین سایر خصوصیات آن ۷۴
- ۴-۲-۴. ساخت مدل فیزیکی ۷۶

فصل پنجم: آزمایش مدل و جمع آوری داده‌ها	۷۸
۱-۵. پیش‌گفتار	۷۹
۱-۵. ساخت محفظه انجام آزمایش	۷۹
۲-۵. روش حفاری تونل در بلوک	۸۳
۳-۵. روش اندازه‌گیری جابجایی‌ها	۸۶
۴-۵. انجام آزمایش مدل	۹۱
۵-۵. تحلیل داده‌ها	۹۴
۶-۵. نتیجه آزمایشات	۱۰۹
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات	۱۱۱
فهرست مراجع	۱۱۶
پیوست: داده‌های حاصل از فتوگرامتری	۱۱۹
<i>Abstract</i>	۱۳۹

فهرست جداول

- جدول ۲-۱) کمیت‌های فیزیکی و دیمانسیون‌های آنها..... ۷
- جدول ۳-۱) خصوصیات فیزیکو مکانیکی مواد و ترکیبات مختلف..... ۳۵
- جدول ۴-۱) درصد وزنی مواد ترکیبی در آزمایش با دستگاه *MTS*..... ۶۳
- جدول ۴-۲) نتایج آزمایش با دستگاه *MTS*..... ۶۶
- جدول ۴-۳) درصد وزنی مواد ترکیبی در آزمایش با دستگاه بارگذاری دستی..... ۶۸
- جدول ۴-۴) نتایج آزمایش با دستگاه بارگذاری دستی..... ۷۰
- جدول ۴-۵) نتایج آزمایشات انجام گرفته بر روی نمونه‌ها..... ۷۲
- جدول ۴-۶) مزایا و معایب استفاده از ترکیبات..... ۷۳
- جدول ۴-۷) خصوصیات فیزیکو مکانیکی ترکیب انتخاب شده..... ۷۵
- جدول ۵-۱) مقایسه نتایج داده‌های روش فتوگرامتری با داده‌های حاصل از *MTS* بر روی تمام نقاط نمونه در یک فریم ثابت..... ۸۹
- جدول ۵-۲) مقایسه نتایج داده‌های روش فتوگرامتری با داده‌های حاصل از *MTS* برای نقطه‌ای به طول $97/969\text{ mm}$ ۸۹
- جدول ۵-۳) همگرایی ماکزیمم نقاط اطراف تونل در چهار فریم اصلی بر حسب mm ۱۰۱
- جدول ۵-۴) مقایسه همگرایی نقاط، حاصله از مدل فیزیکی و نرم افزار *FLAC^{3D}*..... ۱۰۴
- جدول ۶-۱) خصوصیات ترکیب انتخاب شده برای ساخت مدل فیزیکی..... ۱۱۲

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) مدل سازی نگهداری: راست: بدون راک بولت، چپ: با راک بولت..... ۱
- شکل (۲-۱) نقش مدل سازی فیزیکی در طراحی..... ۳
- شکل (۳-۱) مدل فیزیکی یک راهروی معدنی در سنگ های لایه ای..... ۴
- شکل (۱-۳) نحوه اعمال بار خارجی بر مدل: چپ: اتاقک مدل، راست: ابزار اعمال بار..... ۲۶
- شکل (۲-۳) استفاده از صفحات صلب در جوانب مدل برای برقراری ارتباط بین تنش افقی با تنش قائم..... ۲۷
- شکل (۳-۳) نمونه ای از اتاقک دستگاه سانتیفریوژ به همراه ملحقات آن..... ۲۹
- شکل (۴-۳) اجزای دستگاه اصطکاک پایه..... ۳۱
- شکل (۵-۳) نمای از بالای دستگاه اصطکاک پایه..... ۳۱
- شکل (۶-۳) بررسی تأثیر درزه ها بر پایداری تونل های کم عمق به وسیله دستگاه اصطکاک پایه در دو حالت درزه های افقی و درزه های با زاویه 60° ۳۲
- شکل (۷-۳) آزمایش مدل فیزیکی با مواد طبیعی سنگ..... ۳۳
- شکل (۸-۳) تجهیزات پیشرفته طراحی شده برای آزمایش مدل فیزیکی مغار..... ۳۳
- شکل (۹-۳) تقسیم بندی درزه ها بر مبنای نقش آنها در توده سنگ..... ۳۷
- شکل (۱۰-۳) مقادیر JRC برای سطوح مختلف درزه..... ۳۹
- شکل (۱۱-۳) تشکیل سطوح فرکتال برای ناپیوستگی ها بر مبنای تقسیم بندی کنتور..... ۴۰
- شکل (۱۲-۳) نیروی فشاری P روی نمونه در حالت $s=2$ که تولید جابجایی معادل Δ می کند..... ۴۱
- شکل (۱۳-۳) اندازه های متفاوت نمونه به دست آمده از سایز کامل ناپیوستگی برای حالات $s=2$ و $s=3$ ۴۴
- شکل (۱۴-۳) سختی سطوح تماس بی بعد به عنوان تابعی از سایز نمونه در حالت ثابت بودن E_i در رابطه ۳-۴۵..... ۴۶
- شکل (۱۵-۳) سختی سطوح تماس بی بعد به عنوان تابعی از سایز نمونه برای سه دسته پارامتر..... ۴۸
- شکل (۱۶-۳) نتایج آزمایشگاهی تنش برشی بر حسب جابجایی برشی در فشار عمودی $24/5 \text{ kPa}$ ۴۸

شکل ۳-۱۷) <i>a</i> . نتایج سختی تانژانتی و ثانویه بر حسب عرض نمونه‌ها <i>b</i> . نتایج سختی تانژانتی و ثانویه بر حسب مساحت نمونه‌ها.	۴۹
شکل ۳-۱۸) مدل فیزیکی فضای زیرزمینی به همراه ناپیوستگی‌ها.	۴۹
شکل ۳-۱۹) شبیه‌سازی تونل‌سازی کرنش صفحه‌ای دوبعدی.	۵۰
شکل ۳-۲۰) مدل جدیدی از ماشین تونل‌سازی.	۵۱
شکل ۳-۲۱) سر برشی ماشین تونل‌زنی.	۵۱
شکل ۳-۲۲) مراحل نصب تونل.	۵۳
شکل ۳-۲۳) یک نمای کلی از حفاری تونل.	۵۳
شکل ۳-۲۴) استفاده از عکس برداری و لیزر برای اندازه‌گیری جابجایی‌ها در مدل فیزیکی.	۵۴
شکل ۳-۲۵) بررسی تأثیر نیروی خارج از مرکز بر لاینینگ تونل.	۵۵
شکل ۳-۲۶) اتافک ساخته شده برای مدل فیزیکی تونل‌زنی باز.	۵۵
شکل ۳-۲۷) موقعیت سنسورها بر لاینینگ تونل.	۵۵
شکل ۳-۲۸) چپ: موقعیت جابجایی سنج‌های شعاعی، راست: موقعیت فشارسنج‌ها.	۵۶
شکل ۳-۲۹) نحوه مدل کردن تونل‌زنی به روش باز.	۵۷
شکل ۳-۳۰) نحوه مدل کردن تونل‌زنی به روش بسته.	۵۷
شکل ۳-۳۱) محدوده کرنش در ساختارهای ژئوتکنیکی.	۵۸
شکل ۳-۳۲) نقاط انعکاس نور تصب شده روی مدل.	۵۸
شکل ۳-۳۳) تحلیل عکس‌ها به وسیله نرم افزار <i>VMS</i>	۵۹
شکل ۳-۳۴) تحلیل عکس‌ها به وسیله نرم افزار <i>EngVig</i>	۵۹
شکل ۴-۱) شمای کلی باکس اولیه طراحی شده برای آزمایش مدل.	۶۱
شکل ۴-۲) تصویر راست: قالب استوانه‌ای (از جنس <i>PVC</i>) برای ساخت نمونه. تصویر چپ: چند نمونه تهیه شده بوسیله این قالب.	۶۲
شکل ۴-۳) راست: دستگاه برش برای جدا کردن نمونه‌ها در ابعاد مورد نیاز. چپ: دستگاه تراش برای صاف کردن سطوح انتهایی نمونه‌ها.	۶۲
شکل ۴-۴) راست: سیستم کنترل دستگاه و جمع‌آوری داده‌ها، چپ: محفظه دستگاه <i>MTS</i>	۶۳
شکل ۴-۵) منحنی تنش-کرنش حاصله از آزمایش روی ترکیب شماره ۱.	۶۴
شکل ۴-۶) منحنی تنش-کرنش حاصله از آزمایش روی ترکیب شماره ۲.	۶۴
شکل ۴-۷) منحنی تنش-کرنش حاصله از آزمایش روی ترکیب شماره ۳.	۶۴
شکل ۴-۸) منحنی تنش-کرنش حاصله از آزمایش روی ترکیب شماره ۴.	۶۵

- شکل ۴-۹) منحنی تنش-کرنش حاصله از آزمایش روی پی وی سی..... ۶۵
- شکل ۴-۱۰) منحنی تنش-کرنش حاصله از آزمایش روی پلی اتیلن..... ۶۵
- شکل ۴-۱۱) منحنی تنش-کرنش حاصله از آزمایش روی نفلن..... ۶۵
- شکل ۴-۱۲) گرانول های پلیمر در کنار نمونه های استوانه ای پلیمر..... ۶۶
- شکل ۴-۱۳) نمونه های گچی پس از بارگذاری..... ۶۶
- شکل ۴-۱۴) ستاپ دستگاه اعمال بار به همراه گیج های عقربه ای، ولت متر و دستگاه تبدیل ولتاژ ورودی سلول بار..... ۶۷
- شکل ۴-۱۵) بارگذاری روی نمونه های ضعیف؛ راست: ترکیب ماسه و کائولن، چپ: موم..... ۶۸
- شکل ۴-۱۶) منحنی های تنش-کرنش نمونه های با ترکیب ماسه آب و کائولن..... ۶۹
- شکل ۴-۱۷) منحنی های تنش-کرنش نمونه های با ترکیب ماسه پارافین و موم مایع..... ۶۹
- شکل ۴-۱۸) منحنی های تنش-کرنش نمونه های با ترکیب موم سفید و موم مایع..... ۶۹
- شکل ۴-۱۹) منحنی های تنش-کرنش نمونه های با ترکیب موم زرد و ماسه..... ۶۹
- شکل ۴-۲۰) منحنی های تنش-کرنش نمونه های با ترکیب وازلین، باریت و ماسه..... ۷۰
- شکل ۴-۲۱) فک های وارد کننده بار بر نمونه دیسکی در تست برزیلی..... ۷۱
- شکل ۴-۲۲) راست: دستگاه تست برزیلی برای نمونه های مستحکم. چپ: دستگاه تست برزیلی برای نمونه های ضعیف..... ۷۱
- شکل ۴-۲۳) نمونه های پس از شکست در تست برزیلی..... ۷۲
- شکل ۴-۲۴) قالب های ساخته شده برای انجام تست برش مستقیم..... ۷۳
- شکل ۴-۲۵) دستگاه تست برش مستقیم..... ۷۴
- شکل ۴-۲۶) منحنی آزمایش برش مستقیم بر روی ترکیب چهار گچ، باریت و آب..... ۷۴
- شکل ۴-۲۷) مشخصات باکس طراحی شده برای قالب گیری مدل فیزیکی..... ۷۵
- شکل ۴-۲۸) تهیه نمونه در باکس چوبی..... ۷۶
- شکل ۴-۲۹) بلوک ساخته شده جهت انجام آزمایش مدل فیزیکی..... ۷۶
- شکل ۵-۱) صفحات جانبی محفظه مدل..... ۷۸
- شکل ۵-۲) صفحات پلکسی گلاس..... ۷۹
- شکل ۵-۳) قطعه طراحی شده جهت فیکس کردن صفحات پلکسی گلاس روی محفظه مدل..... ۷۹
- شکل ۵-۴) پیچ متری برای اتصال قطعه فیکس کننده پلکسی گلاس به صفحات جانبی..... ۷۹
- شکل ۵-۵) نمایش میزان تنش ماکزیمم ایجاد شده در صفحه پلکسی گلاس توسط نرم افزار

- شکل ۵-۶) بردارهای جابجایی حاصل از بارگذاری روی صفحه پلکسی گلاس..... ۸۰
- شکل ۵-۷) راست: صفحه بارگذاری فوقانی، چپ: نحوه حمل و استقرار آن روی محفظه مدل با جرنقیل..... ۸۱
- شکل ۵-۸) نماهای مختلف محفظه بارگذاری مدل..... ۸۱
- شکل ۵-۹) استقرار بلوک در محفظه انجام آزمایش..... ۸۲
- شکل ۵-۱۰) نحوه استقرار لوله، پین و جک هیدرولیکی برای بیرون کشیدن لوله..... ۸۳
- شکل ۵-۱۱) شبیه سازی جابجایی های ایجاد شده در بلوک در حالت حفاری خود بلوک توسط نرم افزار $FLAC^{3D}$ ۸۴
- شکل ۵-۱۲) شبیه سازی جابجایی های ایجاد شده در بلوک در حالت حضور لوله بجای ماده اصلی توسط نرم افزار $FLAC^{3D}$ ۸۴
- شکل ۵-۱۳) بررسی داده های روش فتوگرامتری با داده های حاصل از تست بارگذاری تک محوره بر روی نمونه تفلن..... ۸۵
- شکل ۵-۱۴) تحلیل داده های عکس برداری در نرم افزار فتوشاپ..... ۸۶
- شکل ۵-۱۵) بررسی نقطه مورد نظر در فریم شماره صفر در نرم افزار *photo shop*..... ۸۷
- شکل ۵-۱۶) بررسی نقطه مورد نظر در فریم شماره هفت در نرم افزار *photo shop*..... ۸۷
- شکل ۵-۱۷) مقایسه نتایج داده های روش فتوگرامتری با داده های حاصل از *MTS* بر روی تمام نقاط نمونه در یک فریم ثابت..... ۸۸
- شکل ۵-۱۸) مقایسه نتایج داده های روش فتوگرامتری با داده های حاصل از *MTS* برای نقطه ای به طول $97/969\text{ mm}$ ۸۸
- شکل ۵-۱۹) نماهای مختلف دوربین *Canon EOS 400D*..... ۹۰
- شکل ۵-۲۰) بلوک آماده شده برای انجام آزمایش..... ۹۰
- شکل ۵-۲۱) افزایش کنتراست عکس برای وضوح بیشتر نقاط توسط نرم افزار فتوشاپ..... ۹۱
- شکل ۵-۲۲) انطباق نشانه های «بعلاوه شکل» برای تسهیل در قرائت نقاط..... ۹۱
- شکل ۵-۲۳) ریختن ماسه بادی بر سطح بلوک..... ۹۲
- شکل ۵-۲۴) موقعیت دوربین نسبت به مدل در هنگام آزمایش..... ۹۳
- شکل ۵-۲۵) جابجایی نقطه ۱ سقف در حین بارگذاری..... ۹۴
- شکل ۵-۲۶) جابجایی نقطه ۲ سقف در حین بارگذاری..... ۹۴
- شکل ۵-۲۷) جابجایی نقطه ۳ سقف در حین بارگذاری..... ۹۵
- شکل ۵-۲۸) جابجایی نقطه ۴ سقف در حین بارگذاری..... ۹۵

- شکل ۵-۲۹) جابجایی نقطه ۵ سقف در حین بارگذاری..... ۹۵
- شکل ۵-۳۰) جابجایی نقطه ۶ سقف در حین بارگذاری..... ۹۶
- شکل ۵-۳۱) جابجایی نقطه ۱ کف در حین بارگذاری..... ۹۶
- شکل ۵-۳۲) جابجایی نقطه ۲ کف در حین بارگذاری..... ۹۶
- شکل ۵-۳۳) جابجایی نقطه ۳ کف در حین بارگذاری..... ۹۷
- شکل ۵-۳۴) جابجایی نقطه ۴ کف در حین بارگذاری..... ۹۷
- شکل ۵-۳۵) جابجایی نقطه ۵ کف در حین بارگذاری..... ۹۷
- شکل ۵-۳۶) جابجایی نقطه ۱ دیوار شمال غربی..... ۹۸
- شکل ۵-۳۷) جابجایی نقطه ۲ دیوار شمال غربی..... ۹۸
- شکل ۵-۳۸) جابجایی نقطه ۳ دیوار شمال غربی..... ۹۸
- شکل ۵-۳۹) جابجایی نقطه ۴ دیوار شمال غربی..... ۹۹
- شکل ۵-۴۰) جابجایی نقطه ۵ دیوار شمال غربی..... ۹۹
- شکل ۵-۴۱) جابجایی نقطه ۱ دیوار جنوب غربی..... ۹۹
- شکل ۵-۴۲) جابجایی نقطه ۲ دیوار جنوب غربی..... ۱۰۰
- شکل ۵-۴۳) جابجایی نقطه ۳ دیوار جنوب غربی..... ۱۰۰
- شکل ۵-۴۴) جابجایی نقطه ۴ دیوار جنوب غربی..... ۱۰۰
- شکل ۵-۴۵) جابجایی نقاط ۵ دیوار جنوب غربی..... ۱۰۱
- شکل ۵-۴۶) جابجایی اطراف تونل تهیه شده با نرم افزار اتوکد..... ۱۰۲
- شکل ۵-۴۷) تنش های قائم زون های بلوک در نرم افزار $FLAC^{3D}$ ۱۰۳
- شکل ۵-۴۸) بردارهای جابجایی نقاط گره بلوک مدل شده در نرم افزار $FLAC^{3D}$ ۱۰۳
- شکل ۵-۴۹) مقایسه همگرایی نقاط سقف و کف در اثر حفاری..... ۱۰۴
- شکل ۵-۵۰) همگرایی بدست آمده تونل حاصل از نرم افزار $FLAC^{3D}$ ۱۰۵
- شکل ۵-۵۱) تصویر داخل تونل پس از اتمام بارگذاری. شکستگی ها سقف، کف و دیواره ها قابل ملاحظه می باشد..... ۱۰۶
- شکل ۵-۵۲) نمای دیگری از شکستگی های بوجود آمده در تونل..... ۱۰۶
- شکل ۵-۵۳) تشکیل ترک های شعاعی در انتهای تونل به دلیل کرنش بیش از حد پلکسی گلاس..... ۱۰۷
- شکل ۵-۵۴) نمای دیگری از ترک های شعاعی ایجاد شده در انتهای تونل..... ۱۰۷
- شکل ۶-۱) نقش مدل سازی فیزیکی در طراحی..... ۱۱۱

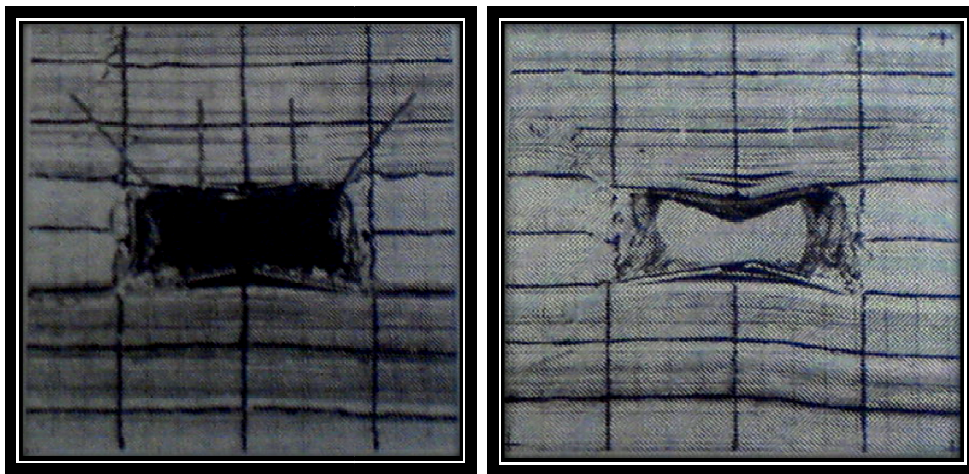
شکل ۶-۲) جابجایی اطراف تونل در طی مراحل مختلف انجام آزمایش.....۱۱۴

شکل ۶-۳) شکستگی های ایجاد شده در سقف، کف و دیواره های تونل در اثر بارگذاری.....۱۱۴

فصل اول:

مقدمه

روش مدل سازی ژئومکانیکی از دهه های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ مبنای کار تحقیقاتی بر روی سنگ و مهندسی زیرزمینی بوده است. دو مثال کلاسیک استفاده از مدل سازی فیزیکی، مدل های هابرت^۱ و ترزاقی^۲ می باشد. هابرت برای بررسی کیفی ریزش تحت اثر نیروی جاذبه از ماسه استفاده کرد و ترزاقی نیز از همان ماده برای مطالعه کیفی پدیده تشکیل قوس شکست در سنگ های خرد شده استفاده نمود. کوربین^۳ آزمایش های مدل فیزیکی را برای توسعه و رسیدن به استفاده از طراحی منطقی نگهداری در ساختارهای زیرزمینی انجام داد. ژائو^۴ پایداری سنگ احاطه کننده فضای زیرزمینی را با استفاده از آزمایش مدل مطالعه و توزیع تنش و جابجایی سنگ را پیرامون این فضا به دست آورد [۱] و تولی^۵ از پین های سربی برای مدل سازی فیزیکی بولت های نگهداری استفاده نمود (شکل ۱-۱).



شکل (۱-۱) مدل سازی نگهداری: راست: بدون راک بولت، چپ: با راک بولت [۲]

با وجود هزینه بالای تجهیزات آزمایشگاهی و در مقابل، هزینه پایین روش های عددی، مدل سازی فیزیکی همچنان به طور گسترده ای در مهندسی زمین استفاده می شود. سرمایه گذاری های پیوسته مهندسی ژئوتکنیک بر تجهیزات مدل سازی فیزیکی برخلاف جهت گیری سایر رشته های مهندسی عمران است. در گرایش های هیدرولیک و یا مکانیک سیالات مدل سازی فیزیکی جای خود را به روش های عددی داده است که دلیل این امر نیز واضح است؛ هزینه بالای مدل های فیزیکی در قیاس با مدل های عددی.

1. Hubbert
2. Terzaghi
3. Corbin
4. Zhao
5. Tully

اما آیا همچنان باید نقشی برای مدل‌های فیزیکی در تحقیقات منظور کرد؟ پاسخ این سؤال «مثبت» است. ابتدا باید دید منظور از نقش چیست و چه منظری از رفتار خاک یا سنگ سعی می‌شود توسط مدل فیزیکی بررسی شود که در مدل عددی قابل مشاهده نیست. جواب پیچیدگی حل مسائل سه بعدی است که ساده‌سازی‌های صورت گرفته در مدل‌سازی‌های عددی پاسخگوی آنها نخواهد بود. برخی از مهمترین دلایلی که اهمیت استفاده از مدل‌سازی فیزیکی در تحقیقات پیش از طراحی را بیان می‌کند عبارتند از:

۱. پیچیدگی پروسه ساخت ناشی از هندسه، تغییر شکل‌های بزرگ و تأثیرات متقابل پیچیده بین مواد خاکی.

۲. خزش یا پدیده استحکام ثانویه^۱ خصوصاً در مورد پایه‌های سنگی.

۳. تأثیر بارگذاری‌های چرخه‌ای نظیر زلزله یا زهکش شدن ساختارهای نزدیک ساحل یا سد.

۴. محدودیت مدل‌های عددی برای پاسخ مواد خاکی و سنگی، بویژه پاسخ‌های غیر خطی، ناهمسانگردی مقاومت و رفتار تخریبی غیرقابل پیش‌بینی مواد سیمانته شده.

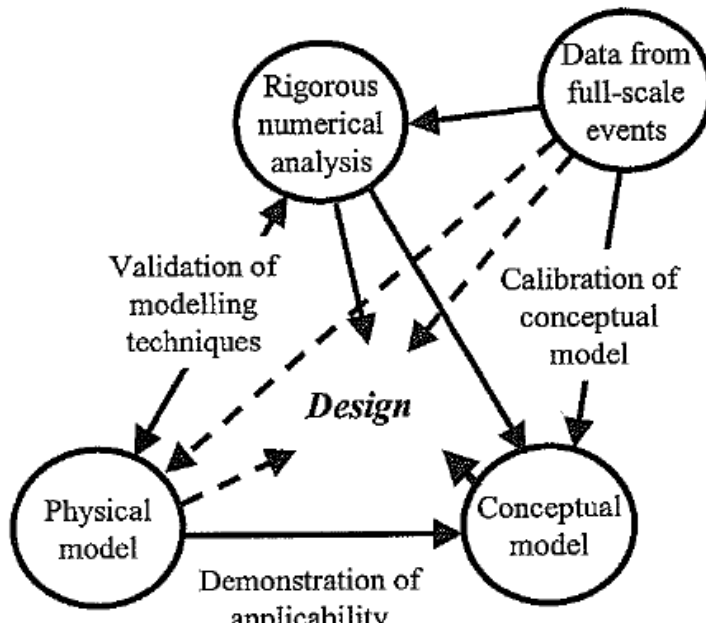
هر چند که لیست فوق جامع و کامل نیست اما پیچیدگی‌های عمده مشکلات مهندسی ژئوتکنیک را نشان می‌دهد و محققین را به مقایسه و در نظر داشتن فواید و نواقص استفاده از مدل‌های فیزیکی و عددی تشویق می‌کند.

نقش مدل‌سازی از دیدگاه‌های گوناگون به طور شماتیک در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. مهمترین بخش طراحی عموماً از مدل ساده فرضی^۲ نتیجه می‌شود که صحت آن به وسیله داده‌های حاصل از آزمایشات برجا و مدل‌سازی‌های فیزیکی و عددی بررسی می‌گردد.

داده‌های آزمایشات برجا و مدل‌سازی فیزیکی برای کالیبره کردن و نشان دادن درستی مدل فرضی به کار می‌روند. اگرچه ممکن است ادعا شود که نتایج حاصل از مدل‌های کوچک شده به اندازه نتایج برجا قابل اطمینان نیست، به همین خاطر مهندسیین از ترکیب نتایج حاصل از این دو روش یا ترکیب نتایج حاصل از مدل‌های فیزیکی و عددی استفاده می‌کنند. [۳ و ۴ و ۵]

1. Secondary Consolidation

2. Conceptual Model

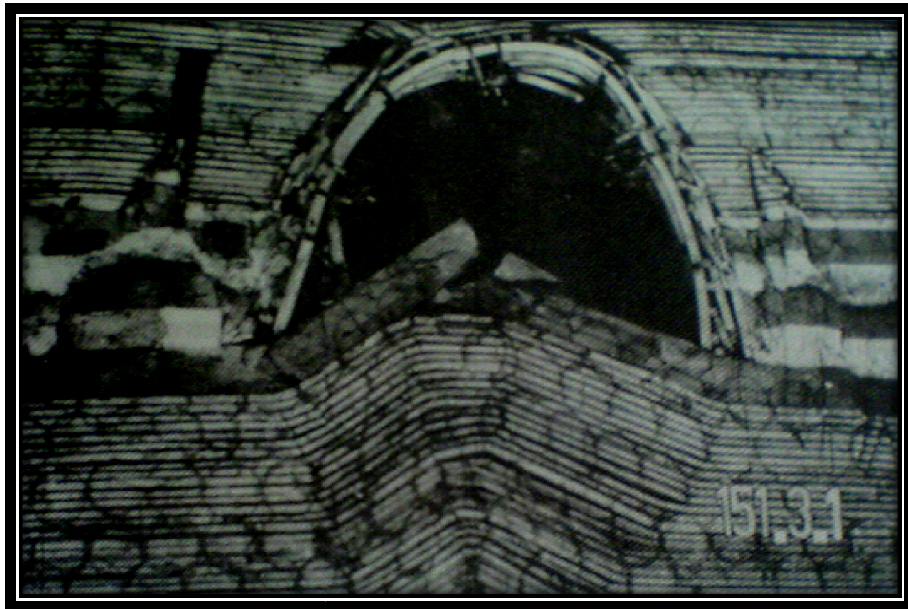


شکل (۲-۱) نقش مدل سازی فیزیکی در طراحی [۳]

هدف از ساخت مدل فیزیکی شبیه سازی رفتار نمونه اصلی در آزمایشگاه است. انتخاب با دقت مواد مدل و روش بارگذاری امکان مطالعه و بررسی رفتار الاستیک، پلاستیک، جریان ویسکوز و ترک خوردگی را به محقق می دهد (شکل ۳-۱).

زمانی که طراحی و ساخت یک مدل فیزیکی به طرز صحیحی صورت گرفته باشد، این وسیله ابزار مناسبی برای طراحی های مهندسی مانند سدهای قوسی که ترکیب سه بعدی پیچیده ای از سنگ و بتن است به دست می دهد که به عنوان مثال بررسی فونداسیون آنها به وسیله برنامه های عددی بسیار مشکل تر است. یکی از مهمترین امتیازات مدل های فیزیکی ارائه مد تغییر شکل و شکستی است که می تواند نتایج غیر قابل انتظار و بسیار مفیدی ارائه کند. اما از مهمترین عیوب آن هزینه و زمان مورد نیاز ساخت و مشکل بودن ساخت مجدد برای مطالعات جدیدتر است.

مدل فیزیکی از مواد ضعیف ساخته می شود. مواد مدل می توانند برای به دست آمدن هر ترکیب دلخواه از خواص زمین مانند لایه ها، درزه ها و یا هر وجه زمین شناسی مورد نظر با هم ترکیب شوند. یک مدل شبیه سازی شده زمانی رفتار مشابه نمونه اصلی را از خود نشان می دهد که شبیه سازی مواد و بارهای وارده به درستی صورت گرفته باشد. [۶]



شکل (۳-۱) مدل فیزیکی یک راهروی معدنی در سنگ‌های لایه‌ای.
 بالآمدگی کف و خمش لایه‌های سقف قابل مشاهده است [۶].

برای استفاده از ابزار مدل‌سازی فیزیکی باید اشراف کاملی به تئوری‌های آنالیز ابعادی و تشابه داشت. مطابق قوانین آنالیز ابعادی و تشابه بطور خلاصه می‌توان اینگونه بیان داشت که چنانچه بتوان بین یک مدل آزمایشگاهی با نمونه واقعی همان مدل تشابه هندسی، سینماتیکی و دینامیکی برقرار کرد، می‌توان با بررسی پارامترهای مؤثر بر مدل آزمایشگاهی، نتایج حاصله را به نمونه اصلی تعمیم داد که این ارتباط به کمک یک سری گروه‌های بی‌بعد (بدون دیمانسیون) صورت می‌پذیرد. توضیحات لازم دربارهٔ این مبحث در فصل دوم آورده شده است. در فصل سوم اصول مدل‌سازی فیزیکی و نکاتی که باید در ساخت مدل و اندازه‌گیری نتایج آزمایش مدل در نظر گرفته شود، مورد بررسی قرار گرفته است. شرح پروسهٔ انتخاب مادهٔ مورد نظر جهت ساخت مدل فیزیکی و نیز ساخت محفظهٔ انجام آزمایش در فصل چهارم آورده شده است و در فصل پنجم چگونگی انجام آزمایش و بررسی داده‌های حاصل از آزمایش توضیح داده شده است. در پایان جمع بندی نتایج پروژه و پیشنهاداتی در راستای تداوم استفاده از این ابزار در آینده در فصل ششم شرح داده خواهد شد.