به نام دادار پاک

خداوند سنگ و خداوند خاک

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی معدن

تحلیل پایداری استاتیکی و دینامیکی تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ

بهنام ابره

اساتید راهنما

دکتر لهراسب فرامرزی

دکتر حمید هاشم الحسینی

۱۳۸۹

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک سنگ آقای بهنام ابره

تحت عنوان

تحلیل پایداری استاتیکی و دینامیکی تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان

تاریخ ۱۳۸۹/۱۲/۲۵ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای اول پایان نامه	دکتر لهراسب فرامرزی
۲- استاد راهنمای دوم پایان نامه	دکتر حمید هاشم الحسینی
۳- استاد مشاور پایان نامه	دکتر مرتضی قارونی نیک
۴- استاد مشاور پایان نامه	دکتر امیر مهدی حلبیان
۵- استاد داور خارجی	دکتر کامران گشتاسبی
۶- استاد داور داخلی	دکتر علیرضا باغبانان
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر راحب باقرپور

تشکر و قدردانی

شکر و سپاس خداوند بخشنده مهربان که همیشه و همه جا لطفش شامل حال بنده حقیر بوده است. بی شک زحمات بندگان خوب او در موفقیت این بنده حقیر تاثیر بسزایی داشته است از این رو وظیفه خود می دانم در ابتدا از پدر و مادرم که همواره مشوق من در طول دوران تحصیل بودند و در این مدت زحمات زیادی برای من کشیدند تشکر کنم.

در ادامه از استاد عزیزم آقای دکتر لهراسب فرامرزی که معلم علم و اخلاق بنده بودند تشکر کنم. از استاد عزیزم آقای دکتر حمید هاشم‌الحسینی نیز تشکر می‌نمایم. از آقای دکتر مرتضی قارونی‌نیک که از هیچ کمکی دریغ ننمودند و در تمامی مراحل این پایان نامه ما را یاری نمودند و همچنین آقای دکتر امیر مهدی حلبیان تشکر می‌نمایم.

از دکتر کامران گشتاسبی و دکتر علیرضا باغبانان به خاطر قبول زحمت داوری این پایان نامه تشکر می‌کنم.

از دوست عزیزم آقای دکتر فرشید دیباجیان که بدون هیچ چشم داشتی در بخش نرم افزار آباکوس مرا یاری دادند تشکر قدردانی می‌کنم. از خانم زهره برامی که در ویراستاری کمک حال بنده بودند، تشکر ویژه دارم.

از تمامی دوستانم که در طول این دوران روزهای خاطره انگیزی را با آنها داشتم و تمامی عزیزانی که به طریقی مرا در این پایان‌نامه یاری کردند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به او

که دنیا دنیا غربت مظلومانه اش

دنیای دوستدارانش را ویرانه کرده

او که جام زهر را سر کشید تا دنیا دنیا عشق از آن بجوشد

او که طلایی گنبدش، چون خورشیدی بر پهنه ایران زمین نور افشان است

تقدیم به او و همه عزیزانی که دوستشان دارم

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
چکیده	۱
فصل اول : کلیات	
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲ مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده	۳
۱-۳ اهداف و ضرورت تحقیق	۵
۱-٤ مروری بر فصل‌های پایان‌نامه	۵
فصل دوم : معرفی ساختگاه و شرایط زمین شناسی تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان	
۲-۱ معرفی پروژه سد و نیروگاه رودبار لرستان	٦
۲-۲ مختصات جغرافیایی و راه‌های دسترسی به محل سد	۷
۲-۳ هواشناسی و هیدرولوژی سد رودبار لرستان	۷
۲-٤ مطالعات ژئوتکنیکی مسیر تونل‌های انتقال آب	۹
۲-۵ مطالعات زمین‌شناسی	۹
۲-۵-۱ زمین‌شناسی ناحیه‌ای	۹
الف بخش شمال خاوری	۹
ب بخش جنوب باختری	۱۱
۲-۵-۲ زمین ریخت‌شناسی	۱۱
۲-۵-۳ چینه‌شناسی مسیر تونل‌های پنستاک	۱۲
۲-۵-٤ زمین ساخت عمومی	۱۳
الف چین‌ها	۱۳
ب گسل‌ها	۱٤
ج شکستگی‌ها	۱٦
۲-٦ مشخصات کلی مسیر انتقال آب از مخزن سد به نیروگاه	۱٦
فصل سوم : تحلیل پایداری براساس روش‌های تجربی و تئوریک	
۳-۱ روشهای تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان	۱۸
۳-۱-۱ روشهای تحلیلی	۱۸
۳-۱-۲ روشهای مشاهده‌ای	۱۹
۳-۱-۳ روشهای تجربی	۱۹
۳-۲ طبقه‌بندی مهندسی سنگ	۱۹
۳-۲-۱ طبقه‌بندی ژئومکانیکی(RMR)	۲۰
۳-۲-۲ طراحی نگهداری تونل‌های پنستاک بر اساس سیستم طبقه‌بندی سنگ RMR	۲۱

۳-۲-۳ شاخص کیفی تونل‌زنی در سنگ (Q) ۲۵
۳-۲-٤ طراحی نگهداری تونل‌های پنستاک براساس سیستم طبقه‌بندی سنگQ ۲۷
۳-۳ مقایسه پایداری محاسبه شده به روش‌های طبقه‌بندی تجربی RMR و Q ۲۹
۳-٤ شاخص مقاومت زمین‌شناختی (GSI) ۳۰
۳-٤-۱ روش‌های محاسبه (GSI) ۳۰
الف روش مشاهدات زمین‌شناسی ۳۰
ب استفاده از سیستم طبقه‌بندی RMR ۳۱
ج استفاده از سیستم طبقه‌بندی Q ۳۱
د استفاده از سیستم امتیاز ساختار و امتیاز سطح ۳۲
۳-۵ محاسبه زمان پابرجایی تونل در حالت بدون نگهداری ۳۳
۳-٦ محاسبه ضخامت شاتکریت مورد نیاز برای نگهداری با استفاده از روابط تحلیلی ۳٤
۳-٦-۱ محاسبه بار وارد بر تونل با استفاده از مقدار RMR ۳٤
۳-٦-۲ محاسبه بار وارد بر تونل با استفاده از روش ترزاقی ۳۵
۳-٦-۳ محاسبه ضخامت شاتکریت ۳۷
جمع‌بندی فصل سوم ۳۸

فصل چهارم : تعیین پارامترهای ژئومکانیکی، ضریب تنش و آنالیز حساسیت
٤-۱ مقدمه ۳۹
٤-۲ تعیین پارامترهای ژئومکانیکی سازندهای مسیر تونل‌های پنستاک ۳۹
٤-۳ آزمایش تعیین دانسیته خشک و اشباع ٤۰
٤-٤ تعیین مدول تغییرشکل‌پذیری بر جای توده‌سنگ مسیر تونل‌های پنستاک ٤۰
٤-٤-۱ آزمایش‌های آزمایشگاهی جهت تخمین مدول تغییرشکل‌پذیری سازند دالان ٤۱
٤-٤-۱-۱ آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری ٤۱
٤-٤-۲ آزمایش‌های برجا جهت تخمین مدول تغییرشکل‌پذیری سازند دالان ٤۱
٤-٤-۲-۱ تعیین مدول تغییرشکل‌پذیری و الاستیسیته توده‌سنگ توسط دیلاتومتر انعطاف‌پذیر با استفاده از اندازه‌گیری تغییرشکل شعاعی برای سازند دالان ٤۲
٤-٤-۳ تخمین مدول تغییرشکل‌پذیری سازندهای هرمز و میلا با استفاده از فرمولهای تجربی ٤٤
٤-۵ تعیین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ مسیر تونل‌های پنستاک ٤٦
٤-۵-۱ آزمایشهای آزمایشگاهی ٤٦
٤-۵-۱-۱ آزمایش مقاومت فشاری سه محوره ٤٦
٤-۵-۲ استفاده از جدولها و فرمولهای تجربی ٤٦
٤-٦ بررسی تخمین تنش‌های برجای قائم و افقی و نسبت تنش ٤۸

٤-٧ آنالیز حساسیت ٥٠
٤-٧-١ مدلسازی ٥٠
٤-٧-٢ بحث ٥٠
جمع‌بندی فصل چهارم ٥٣

فصل پنجم : تحلیل پایداری استاتیکی و طراحی سیستم نگهداری با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D
٥-١ مقدمه ٥٤
٥-٢ روشهای عددی ٥٥
٥-٢-١ روش المان محدود ٥٥
٥-٢-٢ روش تفاضل محدود ٥٥
٥-٢-٣ روش المان مرزی ٥٦
٥-٢-٤ روش المان مجزا ٥٦
٥-٢-٥ روشهای شبکه شکستگی‌های مجزا ٥٦
٥-٢-٦ روش هیبرید ٥٧
٥-٣ انتخاب روش در این پایان‌نامه ٥٧
٥-٤ نرم‌افزار FLAC3D ٥٩
٥-٤-١ مراحل حل مسأله در FLAC3D ٥٩
٥-٤-٢ بررسی تعادل مدل ٦٠
٥-٥ نحوه حفر ٦١
٥-٦ تعیین حداکثر گام پیشروی ٦٢
٥-٦-١ محاسبه گام پیشروی با استفاده از روابط ساکورایی ٦٢
٥-٦-٢ محاسبه گام پیشروی با استفاده از نرم‌افزار ٦٣
٥-٧ استفاده از نمودارهای بدون بعد تغییرشکل تونل ٦٥
٥-٨ تعیین سیستم نگهداری موقت ٦٨
٥-٨-١ شاتکریت ٦٨
٥-٨-٢ پیچ‌سنگ ٧٠
٥-٨-٢-١ طول پیچ‌سنگ ٧٠
٥-٨-٢-٢ فاصله‌داری پیچ‌سنگها ٧١
٥-٨-٢-٣ اجرای پیچ‌سنگ ٧٢
٥-٨-٣ لتیس گیردر ٧٧
٥-٨-٣-١ طراحی لتیس گیردر ٧٧
٥-٨-٣-٢ اجرای لتیس گیردر ٧٨
٥-٩ کنترل نیرو و گشتاور ناشی از بار استاتیکی ٨١
٥-١٠ طراحی نگهداری دائم ٨٣

۵-۱۱ تأثیر حفر تونل‌ها بر یکدیگر ۸۷
جمع‌بندی فصل پنجم ۸۹

فصل ششم : تحلیل پایداری دینامیکی تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان تحت حرکت گسل و بار زلزله

۶-۱ مقدمه ۹۰
۶-۲ مقایسه طراحی‌های لرزه‌ای با طراحی‌های استاتیکی ۹۰
۶-۳ طراحی لرزه‌ای سازه‌های سطحی در مقایسه با سازه‌های زیرزمینی ۹۱
۶-۴ مهمترین عوامل موثر در رفتار تونل‌ها به هنگام زلزله ۹۱
۶-۵ امواج لرزه‌ای ۹۳
۶-۵-۱ امواج حجمی ۹۳
۶-۵-۲ امواج سطحی ۹۴
۶-۶ تأثیر زاویه برخورد امواج به پوشش ۹۴
۶-۷ کلاسه‌بندی الگوهای تخریب در پوشش تونل ۹۵
۶-۸ معرفی نرم‌افزار ABAQUS ۹۶
۶-۹ مدلسازی عددی ۹۷
۶-۹-۱ هندسه مدل ۹۷
۶-۹-۲ شبکه المان ۹۸
۶-۹-۲-۱ معرفی المانهای مورد استفاده ۹۹
۶-۹-۳ خصوصیات مواد و مدل رفتاری ۱۰۰
۶-۹-۴ شرایط مرزی ژئواستاتیک ۱۰۰
۶-۹-۵ تعادل ژئواستاتیک ۱۰۰
۶-۱۰ آماده‌سازی و حل مدل جهت بررسی جابجایی گسل ۱۰۱
۶-۱۰-۱ بارگذاری ۱۰۱
۶-۱۰-۲ شرایط مرزی جهت بررسی جابجایی گسل ۱۰۱
۶-۱۰-۳ تحلیل نتایج مدل‌سازی-گسل ۱۰۲
۶-۱۰-۳-۱ کنترل گسیختگی پوشش ۱۰۳
۶-۱۱ آماده‌سازی و حل مدل جهت بررسی امواج لرزه‌ای ۱۰۶
۶-۱۱-۱ معرفی زلزله اعمالی ۱۰۶
۶-۱۱-۲ معیار کنترل گذردهی امواج برای حل‌های دینامیکی ۱۰۷
۶-۱۱-۳ بارگذاری دینامیکی ۱۰۹
۶-۱۱-۴ شرایط مرزی جهت بررسی امواج لرزه‌ای ۱۱۰
۶-۱۱-۴-۱ فرمولاسیون مرزهای جاذب ۱۱۰
۶-۱۱-۴-۲ میرایی ۱۱۱
۶-۱۱-۵ فرکانس طبیعی سازه ۱۱۳

٦-١١-٦ تحلیل نتایج مدلسازی-زلزله ١١٤
٦-١١-٦-١ مقدار ممان وارده بر پوشش در اثر با دینامیکی زلزله ١١٥
جمع‌بندی فصل ششم ١١٦
جمع بندی و پیشنهادات ١١٧
ضمیمه الف ١٢٠
منابع و مراجع ١٢٥

فهرست جداول

شماره	عنوان	صفحه
۲-۱	خلاصه اطلاعات چینه‌شناسی در محدوده طرح	۱۳
۳-۱	دستورالعملهایی برای حفاری و نگهداری تونل‌هایی با دهانه‌ی ۱۰متر براساس سیستم RMR	۲۱
۳-۲	مقادیر RMR برای توده‌سنگ مسیر تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان – ناحیه دالان گسله D_F	۲۲
۳-۳	مقادیر RMR برای توده‌سنگ مسیر تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان – ناحیه دالان خوب D_G	۲۲
۳-٤	مقادیر RMR برای توده‌سنگ مسیر تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان – ناحیه میلا M	۲۳
۳-۵	مقادیر RMR برای توده‌سنگ مسیر تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان – ناحیه هرمز H_L	۲۳
۳-۶	مقادیر RMR برای توده‌سنگ مسیر تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان – ناحیه هرمز H_{sh}	۲٤
۳-۷	طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان براساس سیستم RMR	۲٤
۳-۸	سیستم نگهداری پیشنهادی طبقه‌بندی سنگ به روش RMR	۲۵
۳-۹	مقدار ESR در رده‌های مختلف فضاهای زیرزمینی	۲۷
۳-۱۰	مقادیر Q برای توده‌سنگ مسیر تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان – ناحیه دالان گسله D_F	۲۷
۳-۱۱	مقادیر Q برای توده‌سنگ مسیر تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان – ناحیه دالان خوب D_G	۲۷
۳-۱۲	مقادیر Q برای توده‌سنگ مسیر تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان – ناحیه میلا M	۲۸
۳-۱۳	مقادیر Q برای توده‌سنگ مسیر تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان – ناحیه هرمز H_L	۲۸
۳-۱٤	سیستم نگهداری پیشنهادی طبقه‌بندی سنگ به روش Q	۲۸
۳-۱۵	محاسبه مقدار RMR با استفاده از مقدار Q توسط رابطه ۳-۳	۲۹
۳-۱٦	مقایسه بین سیستم نگهداری پیشنهادی روشهای RMR و Q	۳۰
۳-۱۷	مقدار GSI محاسبه شده با استفاده از روشهای ارائه شده	۳۲
۳-۱۸	بار وارد بر تونل براساس روش RMR	۳۵
۳-۱۹	برآورد وضعیت نگهداری تونل براساس رده‌بندی اصلاح شده ترزاقی	۳٦
۳-۲۰	ضخامت پیشنهادی شاتکریت با استفاده از روشهای تحلیلی	۳۸
٤-۱	پارامترهای فیزیکی مسیر تونل‌های پنستاک برای سازندهای دالان(D)، هرمز و میلا(M&H)	٤۰
٤-۲	نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای سازند دالان	٤۱
٤-۳	مدول الاستیسیته و تغییرشکل‌پذیری با استفاده از نتایج آزمایش‌های دیلاتومتری برای سازند دالان	٤٤
٤-٤	روابط تجربی جهت تخمین مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ با استفاده از RMR	٤٤
٤-۵	روابط تجربی جهت تخمین مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ با استفاده از GSI	٤٤
٤-٦	مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ برای سازند دالان(D_F) هرمز و میلا با استفاده از روابط تجربی	٤۵
٤-۷	پارامترهای استحکام برشی نمونه‌های سنگ بکر حاصل از نتایج آزمایش‌های سه محوره سازند دالان	٤٦
٤-۸	مقادیر پیشنهادی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ با استفاده از RMR	٤۷
٤-۹	چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سازند دالان، هرمز و میلا	٤۸
٤-۱۰	مقادیر نهایی ارائه شده پارامترها جهت مدلسازی	٤۸

٤-١١	مقادیر ضریب تنش با توجه به فرمولهای ارائه شده	٥٠
٤-١٢	پارامترهای نهایی جهت مدلسازی برای سازندهای مسیر تونل‌های پنستاک هرمز و میلا بعد از آنالیز حساسیت	٥٣
٤-١٣	مقادیر نهایی پارامترهای ارائه شده برای مدلسازی	٥٣
٥-١	کارایی روشهای عددی در مدلسازی تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی	٥٨
٥-٢	گام پیشروی بدست آمده برای مقاطع مشخصات مقطع‌های دالان خوب،دالان گسله، هرمز و میلا	٦٤
٥-٣	شعاع پلاستیک و جابجایی بدست آمده با استفاده از نمودارهای بدون بعد هوک	٦٦
٥-٤	شعاع پلاستیک و جابجایی بدست آمده با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$	٦٧
٥-٥	روابط پیشنهادی برای محاسبه طول پیچ سنگ	٧٠
٥-٦	روابط پیشنهادی برای محاسبه فاصله داری پیچ سنگ	٧١
٥-٧	طول و فاصله داری محاسبه شده برای شبکه پیچ سنگ	٧٢
٥-٨	خصوصیات مقاومتی شاتکریت مورد استفاده برای مقطع D_G	٧٣
٥-٩	خصوصیات پیچ‌سنگهای مورد استفاده برای مقطع D_G	٧٣
٥-١٠	ماکزیمم مقادیر نیروی محوری، گشتاور خمشی و جابجایی در مقطع D_G بعد از ١٥ متر پیشروی با نگهداری شاتکریت مسلح و پیچ‌سنگ	٧٤
٥-١١	مشخصات لتیس‌گیردر طراحی شده با سطح مقطع مثلثی	٧٨
٥-١٢	خصوصیات مقاومتی شاتکریت مورد استفاده برای مقطع H&M	٧٨
٥-١٣	ماکزیمم مقادیر نیروی محوری، گشتاور خمشی و جابجایی در مقطع H&M بعد از ١٤/٤ متر پیشروی با نگهداری شاتکریت مسلح و لتیس‌گیردر	٧٨
٥-١٤	خصوصیات مقاومتی لاینینگ مورد استفاده برای مقطع H&M	٨٤
٦-١	خسارت وارده بر تونل‌ها	٩٢
٦-٢	تنش‌های مجاز بتن و فولاد در طراحی به روش تنش‌های بهره‌برداری	١٠٤
٦-٣	ماکزیمم مقادیر تنش فشاری در اثر جابجایی‌های مختلف گسل	١٠٤

فهرست شکل‌ها

شماره	عنوان	صفحه
۲-۱	نقشه دسترسی و موقعیت سد رودبار لرستان	۷
۲-۲	عکس ماهواره‌ای محدوده طرح سد و نیروگاه رودبار لرستان	۸
۲-۳	نقشه و مقطع زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه	۱۰
۲-٤	مورفولوژی خشن و ستیغ‌های بلند مربوط به سازند دالان در اطراف تونل‌های پنستاک	۱۱
۲-۵	متروی لس‌آنجلس و چگونگی طراحی	۱۵
۲-۶	نمایی از صفحه گسل سراوند –بزنوید در شمال خاور گله‌مویه در مسیر گله‌مویه به کیش	۱۵
۲-۷	مقطع زمین‌شناسی و بخش‌های مختلف تونل‌های پنستاک	۱۷
۳-۱	نمودار اصلاح شده نگهداری پیشنهادی بر حسب سیستم Q	۲٦
۳-۲	نمودار شماتیک برای انتخاب GSI با استفاده از مشاهدات زمین‌شناسی	۳۱
۳-۳	نمودار تصحیح شده GSI پیشنهاد شده توسط سونمز و همکاران	۳۳
۳-٤	محاسبه زمان پابرجایی تونل با استفاده از مقدار RMR	۳٤
۳-۵	نمایی شماتیک از حرکت سنگ سست شده به طرف تونل و انتقال بار به اطراف	۳۷
۳-٦	مقادیر RMR و Q و GSI برای مقاطع مورد نظر	۳۸
٤-۱	مقطع ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی محور سد رودبار لرستان	٤۳
٤-۲	نمونه‌ای از نمودار فشار – جابجایی بدست آمده از آزمایش دیلاتومتری	٤۳
٤-۳	تغییرات مدول شکل‌پذیری توده‌سنگ سازند دالان گسله و هرمز با میلا با استفاده از روشهای تجربی	٤٦
٤-٤	رابطه بین زاویه اصطکاک و GSI و رابطه بین نسبت مقاومت چسبندگی به مقاومت تراکمی تک‌محوری سنگ بکر و GSI برای مقادیر مختلف m_r	٤۷
٤-۵	ماکزیمم جابجایی در سقف تونل ناشی از تغییرات چسبندگی محیط	۵۱
٤-٦	ماکزیمم جابجایی در سقف تونل ناشی از تغییرات زاویه اصطکاک داخلی	۵۱
٤-۷	ماکزیمم جابجایی در سقف تونل ناشی از تغییرات مدول تغییرشکل‌پذیری	۵۲
٤-۸	ماکزیمم جابجایی در سقف تونل ناشی از تغییرات ضریب تنش	۵۲
۵-۱	طرحهای مختلف مدلسازی توده‌ی سنگ	۵٦
۵-۲	کاربرد روش هیبرید در حفاری تونل	۵۷
۵-۳	محدوده پیشنهادی برای استفاده از روشهای پیوسته و ناپیوسته براساس مقدار Q	۵۸
۵-٤	هندسه مدل ساخته شده و مش‌بندی انجام شده در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$	٦۰
۵-۵	شرایط مرزی در جهات مختلف x و y و z	٦۰

٥-٦	نیروی نامتعادل بعد از به تعادل رساندن استاتیکی برای سازند هرمز و میلا (H&M)	٦١
٥-٧	ترتیب حفاری در تونل‌های پنستاک سد رودبار لرستان	٦١
٥-٨	رابطه بین مدول تغییرشکل و کرنش بحرانی	٦٢
٥-٩	نیروی نامتعادل بعد از ١/٢ متر پیشروی برای سازند هرمز و میلا (H&M)	٦٤
٥-١٠	نیروی نامتعادل بعد از ١/٤ متر پیشروی برای سازند هرمز و میلا (H&M)	٦٤
٥-١١	نسبت مقاومت توده سنگی به تنش برجای حاکم محیط	٦٥
٥-١٢	ارتباط تغییرشکل تونل و مقاومت توده‌سنگ در بر گیرنده، در شرایط تنش برجا	٦٦
٥-١٣	ماکزیمم تغییرشکل در سقف تونل در مقابل پیشروی در مقطع H&M	٦٧
٥-١٤	ماکزیمم زون پلاستیک در سقف تونل مقابل پیشروی در مقطع H&M	٦٧
٥-١٥	زون پلاستیک برای مقطع بعد از ١ گام پیشروی	٦٨
٥-١٦	زون پلاستیک برای مقطع H&M بعد از ٦ گام پیشروی و تخریب کامل تونل	٦٨
٥-١٧	تغییرات ماکزیمم جابجایی در سقف برای مقطع H&M برای شاتکریت با ضخامت‌های ٣٠،٢٠،١٥،١٠cm	٦٩
٥-١٨	تغییرات ماکزیمم گشتاور برای مقطع H&M برای شاتکریت با ضخامت‌های ٣٠،٢٠،١٥،١٠ cm	٦٩
٥-١٩	قرار گرفتن پیچ سنگها با فاصله داری ١/٢×١/٢m در ناحیه پلاستیک بعد از ٩ گام پیشروی برای مقطع H&M	٧٣
٥-٢٠	به تعادل رسیدن جابجایی‌ها در سقف، کف و دیواره‌ی تونل پنستاک در سازند دالان خوب	٧٤
٥-٢١	درصد کاهش جابجایی در هر پیشروی برای سقف، کف و دیواره‌ی در ٥ گام پیشروی برای مقطع D_G	٧٤
٥-٢٢	مقادیر جابجایی‌های سقف و دیواره‌هادر ٥ گام پیشروی در جهت قائم برای مقطع D_G	٧٥
٥-٢٣	نمایش وضعیت شاتکریت و پیچ سنگهای اعمالی در ٥ گام پیشروی در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$	٧٥
٥-٢٤	لنگر خمشی وارد شده به پوشش بعد از ٥ گام پیشروی	٧٦
٥-٢٥	تغییرات تنش عمودی بعد از ٥ گام حفاری	٧٦
٥-٢٦	مقادیر جابجایی‌های سقف و دیواره‌ها در ١٢ گام پیشروی در جهت قائم برای مقطع H&M	٧٩
٥-٢٧	لنگر خمشی وارد به پوشش طراحی شده در ١٢ گام پیشروی برای مقطع H&M	٧٩
٥-٢٨	نیروی محوری وارد به پوشش طراحی شده در ١٢ گام پیشروی برای مقطع H&M	٨٠
٥-٢٩	درصد کاهش جابجایی در ١٢ گام پیشروی برای مقطع H&M برای سقف تونل پنستاک برای سه نگهداری متفاوت	٨٠
٥-٣٠	مقادیر جابجایی‌های سقف و دیواره‌ها در ١٢ گام پیشروی بعد از برداشتن بنچینگ، در جهت قائم برای مقطع H&M	٨١

۵-۳۱	نمایش بار محوری و لنگر خمشی وارد بر یک ستون با بار محوری در یک خروج از مرکزیت e	۸۲
۵-۳۲	منحنی اثر متقابل بار محوری و لنگر خمشی در ستون بتن آرمه	۸۲
۵-۳۳	نیروی فشاری و گشتاور خمشی وارد بر پوشش ناشی از بار استاتیکی برای مقطع‌های دالان گسله و هرمز و میلا	۸۳
۵-۳٤	نیروی فشاری و گشتاور خمشی وارد بر پوشش ناشی از بار استاتیکی برای مقطع دالان خوب	۸۳
۵-۳۵	لنگر خمشی وارد به لاینینگ طراحی شده برای مقطع H&M	۸٤
۵-۳٦	نیروی محوری وارد به لاینینگ طراحی شده برای مقطع H&M	۸۵
۵-۳۷	نیروی فشاری و گشتاور خمشی وارد بر پوشش دائم ناشی، از بار استاتیکی برای مقطع‌های دالان گسله و هرمز و میلا	۸۵
۵-۳۸	مقطع طولی سیستم نگهداری پیشنهادی برای سازند دالان خوب	۸٦
۵-۳۹	مقطع عرضی سیستم نگهداری پیشنهادی برای سازند دالان خوب	۸٦
۵-٤۰	مقطع طولی سیستم نگهداری پیشنهادی برای مقطع هرمز و میلا و دالان گسله	۸۷
۵-٤۱	مقطع عرضی سیستم نگهداری پیشنهادی برای مقطع هرمز و میلا و دالان گسله	۸۷
۵-٤۲	نقاط شاهد در نظر گرفته شده برای بررسی تأثیر حفر تونل‌ها بر یکدیگر	۸۸
۵-٤۳	جابجایی نقاط شاهد در ۱۲ گام حفاری بعد از نگهداری موقت	۸۸
٦-۱	موج اولیه و موج ثانویه	۹٤
٦-۲	موج رایلی و موج لاو	۹٤
٦-۳	تغییر مقدار حداکثر تنش‌های محوری و خمشی نسبت به تغییر زاویه برخورد موج برشی به پوشش	۹۵
٦-٤	تغییر مقدار حداکثر تنش‌های محوری و خمشی نسبت به تغییر زاویه برخورد موج طولی به پوشش	۹۵
٦-۵	پوشش قیچی شده	۹٦
٦-٦	هندسه مدل ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس	۹۸
٦-۷	موقعیت صفحه گسل و برخورد آن با تونل‌های پنستاک در نرم‌افزار آباکوس	۹۸
٦-۸	شبکه‌بندی مدل ساخته شده در نرم‌افزار آباکوس	۹۹
٦-۹	المان میراگر نوع اول و دوم	۹۹
٦-۱۰	تعادل مدل به صورت ژئواستاتیک بعد از نصب سیستم نگهداری تونل‌های پنستاک	۱۰۱
٦-۱۱	اعمال شرایط مرزی و حرکت گسل به مدل	۱۰۲
٦-۱۲	تنش میزز ایجاد شده در پوشش بر اثر حرکت گسل با ماکزیمم جابجایی ۲cm	۱۰۲
٦-۱۳	تنش میزز ایجاد شده در پوشش بر اثر حرکت گسل با ماکزیمم جابجایی ۲۰ cm	۱۰۳
٦-۱٤	تنش میزز ایجاد شده در پوشش بر اثر حرکت گسل با ماکزیمم جابجایی ۱ متر	۱۰۳

٦–١٥	تنش فشاری ایجاد شده در پوشش بر اثر حرکت گسل با ماکزیمم جابجایی ۱۰ cm	۱۰۵
٦–١٦	تنش فشاری ایجاد شده در پوشش بر اثر حرکت گسل با ماکزیمم جابجایی ۱ متر	۱۰٦
٦–١٧	ماکزیمم شتاب زمین بر اثر زلزله ناغان	۱۰۷
٦–١٨	نمودار توان-فرکانس موج زلزله	۱۰۸
٦–١٩	ابعاد شبکه و مش‌بندی جهت تحلیل لرزه‌ای موج	۱۰۹
٦–٢٠	اعمال بارگذاری دینامیکی به مدل برای شبیه‌سازی زلزله	۱۱۰
٦–٢١	تکیه‌گاه‌های متقارن و متقارن معکوس در هر گره	۱۱۱
٦–٢٢	مرزهای جاذب در آنالیز دینامیکی	۱۱۱
٦–٢٣	فرکانس طبیعی سازه	۱۱٤
٦–٢٤	مقطع تغییرشکل یافته پوشش تونل بر اثر بار لرزه‌ای	۱۱٤
٦–٢٥	تنش S11 بر اثر بار لرزه ای	۱۱۵
٦–٢٧	تنش برشی S12 بر اثر بار لرزه ای	۱۱۵
٦–٢٨	نیروی فشاری و گشتاور خمشی وارد بر پوشش، ناشی از بار دینامیکی زلزله برای مقطع مورد نظر	۱۱٦

چکیده

سد و نیروگاه رودبار لرستان در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب شهرستان الیگودرز قرار دارد. سیستم انتقال آب این سد شامل یک تونل آب‌بر با قطر ٦ متر است که در ادامه به دو تونل پنستاک با قطر ۸ متر تبدیل می‌شود. توده‌سنگ مسیر انتقال آب به نیروگاه، به لحاظ سنگ‌شناسی متنوع بوده و از ساختار نسبتاً پیچیده‌ای برخوردار است. ساختار ناحیه عمدتًا متأثر از عملکرد گسل‌های زیاد و متوالی است. محدوده مورد مطالعه شامل سنگ‌های آهکی، دولومیتی و مارن و لایه‌های شیلی می‌باشد.گسل سراوند- بزنوید که متقاطع با تونل‌های پنستاک است در گزارش‌های لرزه زمین‌ساخت گسلی فعال محسوب می‌شود و حداکثر جابجایی آن حدود ٤ متر پیش‌بینی شده است.

هدف از انجام این پروژه، ابتدا طراحی و تحلیل پایداری سیستم نگهداری موقت و دائم تونل‌های پنستاک تحت شرایط استاتیکی است. سپس به منظور کاهش خسارات ناشی از گسل سراوند- بزنوید، تأثیر دینامیکی زلزله به صورت جابجایی دائم(جابجایی گسل) و گذرای آن(لرزه) بر سازه مذکور، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

با توجه به تنوع ساختار سنگی، تعیین پارامترهای ژئومکانیکی جهت تحلیل پایداری این تونل‌ها در درجه اهمیت قرار دارد. با استفاده از آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا خواص مقاومتی و تغییرشکل‌پذیری توده سنگ ارزیابی شد. سپس روی مقادیر تخمینی با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ آنالیز حساسیت انجام گرفت.

با استفاده از سیستم طبقه‌بندی مهندسی سنگ، توده‌سنگ مسیر تونل‌ها به چهار ناحیه تقسیم‌بندی شد که یک ناحیه در کلاسII و سه ناحیه دیگر در کلاسIV قرار گرفتند. سپس بحرانی‌ترین مقاطع انتخاب و با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ سیستم نگهداری موقت و دائم پیشنهاد گردید. برای سه مقطع کلاس IV، سیستم نگهداری توسط روش تجربی استفاده از شاتکریت با پیچ‌سنگ به همراه قاب فولادی پیشنهاد شد. با استفاده از نرم‌افزار مشخص شد که پیچ‌سنگ عملاً تأثیری در نگهداری ندارد. به همین علت استفاده از یک نگهداری سنگین‌تر مد نظر قرار گرفت. قاب فولادی به خاطر هزینه بالا و انعطاف‌پذیری کم جزو گزینه‌های آخر قرار گرفت. در نهایت بعد از تحلیل با لتیس‌گیردر، این نتایج بدست آمد که نگهداری موقت سه مقطع کلاس IV با استفاده از ۱۵ cm شاتکریت مسلح با دو لایه مش فولادی و لتیس‌گیردر با فواصل ۱/۲ متر و برای نگهداری دائم آنها، لاینینگ با ضخامت ۳۰cm بهینه‌ترین نگهداری برآورد شده است. برای مقطع کلاس II نیز ۵cm شاتکریت با یک لایه مش فولادی و پیچ‌سنگ با فواصل ۲×۳m به عنوان نگهداری موقت و لاینینگ با ضخامت ۱۵cm به عنوان نگهداری دائم پیشنهاد شد.

در ادامه بعد از نصب سیستم نگهداری، با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS دو مدل یکی جهت تحلیل در برابر گسلش(جابجایی ماندگار) و دیگری جهت تحلیل پایداری تونل‌ها در برابر زمین‌لرزه(جابجایی گذرا) ساخته شد. بعد از اعمال شرایط مرزی روی مدل ساخته شده برای بررسی حرکت گسل این نتیجه به دست آمد که طبق استاندارد ACI 318، دیواره تونل‌ها با پوشش طراحی شده حدود ۱۲cm از جابجایی‌ها را می‌تواند تحمل نماید و بیشتر از آن باعث شکست پوشش می‌شود. تنش فشاری وارد به کف تونل نیز در مقادیر جابجایی بیشتر از۲cm از حد مجاز خود عبور می‌کند و در نهایت باعث گسیختگی کامل پوشش در کف می‌شود. با اعمال بار زلزله به صورت تاریخچه سرعت و کنترل گشتاور و نیروی وارده با آن مشخص شد که این پوشش تحت بارهای دینامیکی پایدار است.

کلمات کلیدی: سد رودبار لرستان، تونل‌های پنستاک، آنالیز پایداری، سیستم نگهداری، آنالیز حساسیت، پارامترهای ژئومکانیکی، جابجایی‌های ماندگار و گذرا.

فصل اول
کلیات

۱-۱. مقدمه

اگرچه حفر فضاهای زیرزمینی توسط بشر جهت استحصال مواد معدنی به گذشته‌های بسیار دور بر می‌گردد، اما در این دوران نیز بسیاری از کارها به صورت تجربی انجام می‌گیرد. طی دهه‌های اخیر، با پیشرفت و توسعه کامپیوتر، محاسبات سازه‌ای نظیر هوا فضا، مکانیک و ساختمان پیشرفت فوق‌العاده‌ای داشته است، اما طراحی و نگهداری فضاهای زیرزمینی همچنان با تردید انجام می‌گیرد و چندان اطمینانی به بهینه بودن طراحی‌ها وجود ندارد[۱].

برای مثال، استفاده از پیچ‌سنگ به دلیل سهولت استفاده اجرای آن، روشی رایج در نگهداری تونل‌ها است، تونل‌های بسیاری نیز وجود دارند که به این طریق نگهداری شده‌اند، ولی عملکرد آنها بیانگر به کارگیری نادرست این روش بوده است. این مشکل قبل از هر چیز به پیچیدگی تونل‌ها و عدم امکان شناسایی مناسب برای شناخت کامل آنها باز می‌گردد به طوری که بارها اتفاق افتاده است که مهندسین احساس کرده‌اند با مساله روشن و مشخصی روبرو نیستند[۱].

مثالهای متعددی می‌توان از نقش و تأثیر عمده تونلسازی در گذشته تا حال ذکر کرد. تونل مشهور مونت بلان، دو کشور فرانسه و ایتالیا را به هم متصل می‌سازد و عملیات ساختمانی آن در سال ۱۹۵۹ آغاز گردید و حفر این تونل فاصله بین میلان و پاریس را به طول ۳۰۴ کیلومتر کوتاهتر نموده است[۲]. در این بین طراحی‌های انجام گرفته با گذشت زمان در اثر بارهای دینامیکی خصوصا زلزله مورد خسارت قرار می‌گرفتند. هر چند تاریخ نشان می‌دهد که سازه‌های زیرزمینی در مقایسه با سازه‌های سطحی در برابر بارهای دینامیکی ایمن‌تر می‌باشند و خسارت کمتری در

طول زمان به آنها وارد شده است ولی در بسیاری از سازه‌ها به خاطر اهمیت بالای آنها، طراحی دینامیکی لازم به نظر می‌رسد[۳].

۱-۲. مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده

در سال ۱۸۷۹ ریتر[1] سعی کرد برای طراحی تونل‌ها بخصوص طراحی نگهدارنده‌های مورد نیاز تونل‌ها، یک راه حل عملی و به صورت فرمول بندی ارائه کند. سال ۱۹۴۶ ترزاقی[2] برای نگهداری تونل‌ها از سیستم طبقه‌بندی سنگ استفاده کرد بطوریکه بارهای اعمال شده توسط توده‌سنگ توسط قاب‌های فولادی که بر پایه طبقه‌بندی توصیفی تخمین زده شده‌اند، نگهداری می‌شود. لوفر[3] در سال ۱۹۵۸ پیشنهاد کرد که زمان خودپایداری یک دهانه نگهداری نشده ، به کیفیت توده‌سنگی که دهانه در آن حفاری شده بستگی دارد[۴].

سال ۱۹۶۶ کلاف و وود وارد[4] از روشهای عددی برای مشخص کردن تنش‌ها و گشتاور در خاکریز استفاده کردند و دی‌یر و ریس[5] کاربرد این روش‌ها را برای تحلیل تونل‌ها و حفاری در سنگ توضیح دادند[۵]. در سال ۱۹۶۷ دیر و همکارانش[6] شاخص کیفیت سنگ[7] (RQD) را برای ارائه یک تخمین کمی از کیفیت توده سنگ که از مغزه‌های حفاری حاصل می‌شود، پیشنهاد کردند. ویکهام و همکاران[8] (۱۹۷۲) طبقه بندی امتیازدهی به ساختار سنگ[9] (RSR) را ابداع نمودند. در سال ۱۹۷۴ بارتن و همکاران[10] سیستم طبقه بندی شاخص کیفیت سنگ را با نام شاخص کیفیت تونل‌زنی[11] Q مطرح شد. بنیاوسکی[12](۱۹۷۶) طبقه بندی دیگری با نام طبقه بندی ژئومکانیک یا سیستم امتیاز دهی به توده سنگی[13] (RMR) را مطرح نمود. این طبقه‌بندی پس از گسترش و کاربرد زیاد در سال ۱۹۸۹ توسط خود بنیاوسکی اصلاح شد[۴]. روش نمودار پایداری طی سال‌های ۱۹۸۸ تا ۱۹۹۲ میلادی توسط پوتوین و همکاران[14] در پی کارهای اولیه ماتیوس برای طراحی سیستم‌های نگهداری پیچ‌سنگ ارائه و تکمیل شد[۶]. هوک[15] در سال۱۹۹۴ شاخص مقاومت زمین شناختی[16] را ارائه کرد و در سال ۱۹۹۸ توسط هوک و همکاران با توجه به مشاهدات سرزمین بهبود یافت. نمودار تصحیح شده GSI توسط سونمز و همکاران در سال۲۰۰۴پیشنهاد شد[۷].

در سال ۲۰۰۰، لیلی با استفاده از جابجایی‌های اندازه‌گیری شده توسط مدل‌های عددی به ارزیابی پایداری تونل‌ها پرداخت و با استفاده از روابط کرنش بحرانی ارائه شده توسط ساکورایی، حد مجاز جابجایی برای طراحی نگهداری تونل‌های مهندسی ارائه کرد[۸]. کاردارلی و همکاران[17] (۲۰۰۳) با استفاده از روشهای ژئوفیزیکی برای تعیین کردن پارامترهای الاستیک توده‌سنگ در خلال فاز حفاری تونل استفاده کردند با استفاده از روشهای ژئوفیزیکی استفاده نمودند[۹]. در سال ۲۰۰۳ جینگ[18] طی مقاله‌ای به گردآوری روشهای عددی پیوسته و ناپیوسته و کاربردشان پرداخت[۱۰]. در سال ۲۰۰۴ سانگ و سون شین[19]، تأثیر مطالعات دقیق زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی اولیه در تعیین نوع حفاری و سیستم نگهداری تونل‌ها را در زمین‌های سست بررسی کردند و نشان دادند استفاده از روشهای عددی در طراحی سیستم نگهداری بهینه در کنار روش تجربی ضروری می‌باشد[۱۱]. آکسوی و همکاران[20](۲۰۱۰) نیز مطالعاتی در مورد تخمین مقاومت فشاری تک‌محوره با استفاده از BPI[21] پرداختند[۱۲]. فرامرزی و همکاران(۲۰۱۱)

---

1 Ritter
2 Terzaghi
3 Lauffer
4 Clough and Wood ward
5 Deer and Reyes
6 Deere et al.
7 Rock Quality Designation
8 Wickham et al.
9 Rock Stracture Rating
10 Barton et al.
11 Tunneling Quality Index
12 Bieniawsky
13 Rock Mass Rating
14 Potvin
15 Hoek
16 Geological Strengh Index
17 Cardarelli
18 Jing
19 Sung O. Chio , Hee Soon Shin
20 Aksoy et al.
21 The Block Punch(BPI)