دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت

پایان نامه کارشناسی ارشد

(گرایش استخراج معدن)

تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل های قطعه دو راه آهن قزوین - رشت به روشهای تجربی و عددی

نگارش:

بهروز رحیمی

استاتید راهنما:

دکتر کورش شهریار

دکتر مصطفی شریف زاده

زمستان ۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی‌تکنیک تهران)

بسمه تعالی

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی- ارشد و دکترا

تاریخ:
شماره:

معاونت پژوهشی
فرم پروژه تحصیلات تکمیلی ۷

مشخصات دانشجو:

نام و نام خانوادگی: بهروز رحیمی | دانشجوی آزاد ● | بورسیه ○ | معادل ○

شماره دانشجوئی: ۸۵۱۲۷۰۳۰ | دانشکده: مهندسی معدن و متالورژی | رشته تحصیلی: مهندسی معدن گروه: استخراج

مشخصات استاد راهنما:

نام و نام خانوادگی: دکتر کورش شهریار | درجه و رتبه: عضو هیئت علمی دانشکده معدن - استاد

نام و نام خانوادگی: دکتر مصطفی شریف زاده | درجه و رتبه: عضو هیئت علمی دانشکده معدن - استادیار

مشخصات استاد مشاور:

نام و نام خانوادگی: | درجه و رتبه:

نام و نام خانوادگی: | درجه و رتبه:

عنوان پایان‌نامه به فارسی : تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل های قطعه دو راه آهن قزوین – رشت به روش های تجربی و عددی

عنوان پایان‌نامه به انگلیسی:

Stability Analysis and Support Design of Tunnels in Railway RASHT – GHAZVIN

نوع پروژه: کارشناسی○ | ارشد● | دکترا ○ | سال تحصیلی: ۸۸ - ۸۷

کاربردی ● | بنیادی ○ | توسعه‌ای ○ | نظری ○

تاریخ شروع : ۸۶/۷/۱ | تاریخ خاتمه : بهمن ۸۷ | تعداد واحد : ۶ | سازمان تأمین کننده اعتبار :

واژه‌های کلیدی به فارسی: تونل، روش های طراحی، تحلیل پایداری، طراحی سیستم نگهداری، روش های تجربی، روش های عددی، راه آهن قزوین – رشت

واژه‌های کلیدی به انگلیسی :

Tunnel, Design Methods, Stability Analysis, Design Support, Classification System, Numerical Modeling, Railway RASHT – GHAZVIN

مشخصات ظاهری	تعداد صفحات ۱۳۴	تصویر ● جدول ● نمودار ● نقشه ● واژه‌نامه ○	تعداد مراجع ۳۶	تعداد صفحات ضمائم
زبان متن	فارسی ●	انگلیسی ○	چکیده	فارسی ● انگلیسی ●
یادداشت				

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه

استاد:

دانشجو:

امضاء استاد راهنما: **تاریخ:**

۱ : ارائه به معاونت پژوهشی به همراه یک نسخه الکترونیکی از پایان‌نامه و فرم اطلاعات پایان‌نامه بصورت PDF همراه چاپ چکیده (فارسی انگلیسی) و فرم اطلاعات پایان‌نامه

۲ : ارائه به کتابخانه دانشکده (شامل دو جلد پایان نامه به همراه نسخه الکترونیکی فرم در لوح فشرده طبق نمونه اعلام شده در صفحه خانگی کتابخانه مرکزی)

چکیده

در دهه های اخیر استفاده از فضاهای زیرزمینی اعم از تونل های راه، راه آهن، مترو، مغارها، فضاهای زیرزمینی برای نیروگاهها، مخازن ذخیره نفت و گاز و سایر موارد رشد به سزایی داشته است. از آنجا که این فضاهای زیرزمینی مدت زمان نسبتاً زیادی باید استفاده شود، بنابراین پایداری آنها در مدت زمان بهره برداری از اهمیت زیادی برخوردار است. مهمترین فاکتور برای ایجاد پایداری در این فضاها، طراحی سیستم نگهداری مناسب و کافی برای آنها می باشد. پروژه حاضر به تحلیل پایداری تونل شماره یک قطعه دو راه آهن قزوین – رشت و ارائه سیستم نگهداری مناسب می پردازد. بدین منظور طراحی سیستم نگهداری با استفاده از روش های تجربی RMR، Q، وزن نگهداری، سیستم طبقه بندی سطح سنگ (SRC)، پتانسیل لهیدگی تونل ها و روش های عددی استفاده شده است. در این تحقیق اصول و روش های طراحی فضاهای زیرزمینی، توصیف رفتار زمین و دستورالعمل های مربوط به مدل سازی بیان شده است. برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ (مقاومت فشاری، مدول تغییر شکل پذیری، ثابت های هوک – براون و موهر – کولمب) و تنش های برجا، روش های تجربی مختلف ارائه شده است. پارامترهای ژئومکانیکی و تنش های برجای محدوده تونل شماره یک با استفاده از نتایج آزمایش های آزمایشگاهی و تحلیل های آماری تعیین شد. نتایج حاصل از مطالعات نشان داد که رفتار زمین در محدوده تونل مورد مطالعه به صورت پایدار با پتانسیل سقوط بلوکها، سست شدگی در حضور آب، شکست برشی کم عمق، رفتار پلاستیک و رفتار شکننده می باشد. همچنین جهت طراحی سیستم نگهداری تونل مورد مطالعه استفاده از روش های طبقه بندی تجربی، NATM، مدل سازی عددی و قضاوت مهندسی مناسب می باشد. استفاده از مدل سازی عددی به کمک نرم افزارهای FLAC و Plaxis ۳D Tunnel انجام گرفت. با تلفیق نتایج حاصل از روشهای تجربی و عددی، سیستم نگهداری مناسب برای تونل استفاده از شاتکریت به ضخامت ۲۰ سانتیمتر همراه با یک لایه مش و نصب قاب فولادی (IPE۱۶۰) به فاصله ۱ تا ۲ متری پیشنهاد شد.

کلمات کلیدی: تونل، روش های طراحی، تحلیل پایداری، طراحی سیستم نگهداری، روش های تجربی، روش های عددی، راه آهن قزوین – رشت

فهرست مطالب

عنوان.....صفحه

مقدمه ۱

فصل اول: اصول کلی در طراحی فضاهای زیرزمینی..... ۳

۱-۱- ملاحظات کلی در طراحی سازه های زیرزمینی ۴

۱-۲- مطالعات زمین شناسی..... ۴

۱-۳- رفتار زمین..... ۵

۱-۴- انواع رفتار زمین ۷

۱-۵- روش ها و ابزارهای طراحی ۱۲

۱-۵-۱- اصول طراحی و مراحل آن ۱۳

۱-۵-۲- فرآیند طراحی مهندسی سنگ..... ۱۷

۱-۶- ابزارها و روش های متداول طراحی و مهندسی سنگ برای سازه های زیرزمینی..... ۲۱

۱-۶-۱- روش های تجربی (سیستم های طبقه بندی مهندسی سنگ)..... ۲۲

۱-۶-۲- روش های محاسبه ای..... ۲۴

۱-۷- انتخاب روش های طراحی مناسب با نوع رفتار زمین ۲۶

فصل دوم: مشخصات زمین شناسی عمومی، ساختمانی و مهندسی ساختگاه تونل..... ۲۸

۲-۱- زمین شناسی عمومی..... ۲۹

۲-۱-۱- واحد آندزیت بازالتی ۲۹

۲-۱-۲- واحد توفیت ۲۹

۲-۱-۳- نهشته های کواترنر..... ۳۱

۲-۲- زمین شناسی ساختمانی..... ۳۲

۲-۲-۱- گسل ها..... ۳۳

۲-۲-۲- درزه ها..... ۳۳

۲-۲-۳- آبهای زیرزمینی ۳۴

۲-۳- زمین شناسی مهندسی ۳۵

۲-۳-۱- واحد آنزیت بازالتی..... ۳۵

۲-۳-۲- واحد توفیت ۳۶
۲-۳-۳- واحد آبرفتی Q ۳۶
۲-۳-۴- ناپیوستگی های توده سنگ ۳۶
۲-۳-۵- بخش بندی در طول تونل ۳۶

فصل سوم: روش های تجربی طبقه بندی توده سنگ ۴۱
۳-۱- طبقه بندی ژئومکانیکی(RMR) ۴۲
۳-۲- طبقه بندی براساس شاخص کیفیت تونل سازی Q ۴۲
۳-۲-۱- روابط تجربی بین پارامترها بر حسب Q برای ارزیابی مشخصات محل و طراحی تونل ۴۷
۳-۳- پیش بینی سیستم نگهداری مورد نیاز بر اساس مفهوم وزن نگهداری ۵۱
۳-۴- سیستم طبقه بندی سطح سنگ (SRC) ۵۴
۳-۴-۱- تنش های برجا در طبقه بندی توده سنگ ۵۸
۳-۵- طبقه بندی توده سنگ بر اساس پتانسیل لهیدگی در تونل ها ۶۰
۳-۵-۱- استفاده از سیستم طبقه بندی Q برای محاسبه کرنش بحرانی ۶۳
۳-۶- شاخص مقاومت زمین شناختی ۶۵

فصل چهارم: پارمترهای ژئومکانیکی توده سنگ ۶۹
۴-۱- مقاومت توده سنگ ۷۰
۴-۲- مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ ۷۴
۴-۳- برآورد ثابت های هوک – براون و پارامترهای موهر – کولمب ۷۶
۴-۴- تنش های برجا و القائی ۷۸
۴-۴-۱- تخمین تنش قائم برجا ۷۹
۴-۴-۲- روش های محاسبه تنش افقی ۸۱
۴-۵- جمع بندی ۸۵

فصل پنجم: طراحی سیستم نگهداری تونل به روش های تجربی ۸۷
۵-۱- رفتار زمین در محدوده تونل ۸۸
۵-۲- طراحی سیستم نگهداری به روش های طبقه بندی تجربی ۹۰

۵-۲-۱- طراحی سیستم نگهداری بر اساس طبقه بندی RMR ۹۰
۵-۲-۲- طبقه بندی بر اساس شاخص کیفیت تونل سازی Q ۹۱
۵-۲-۳- تعیین سیستم نگهداری تونل بر اساس مفهوم وزن نگهداری ۹۳
۵-۲-۴- به کارگیری طبقه بندی SRC در تعیین سیستم نگهداری تونل ۹۳
۵-۲-۵- تعیین سیستم نگهداری بر اساس پتانسیل لهیدگی تونل ها ۹۵
۵-۲-۶- توصیف ساختار توده سنگ مسیر تونل با استفاده از شاخص مقاومت زمین شناسی ۹۶
۵-۳- جمع بندی روش های تجربی برای توصیه سیستم نگهداری ۹۸

فصل ششم: طراحی سیستم نگهداری به روش های عددی ۱۰۰
۶-۱-طراحی سیستم نگهداری به روش های عددی ۱۰۱
۶-۲- آشنایی با نرم افزار FLAC ۱۰۸
۶-۲-۱- تحلیل پایداری تونل شماره یک راه آهن قزوین – رشت با نرم افزار FLAC ۱۰۹
۶-۲-۲- نتایج مربوط به تحلیل تونل شماره یک با نرم افزار FLAC ۱۱۶
۶-۳- آشنایی کلی با نرم افزار Plaxis ۳D Tunnel ۱۱۶
۶-۳-۱- تحلیل پایداری و طراحی نگهداری تونل شماره یک با نرم افزار
Plaxis ۳D Tunnel ۱۱۷
۶-۳-۲- نتایج مربوط به تحلیل تونل شماره یک با نرم افزار Plaxis ۳D Tunnel ۱۲۵
۶-۴- سیستم نگهداری پیشنهادی تونل بر اساس نتایج روش های تجربی،
عددی و قضاوت مهندسی ۱۲۶

فصل هفتم: بحث، نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۲۷
۷-۱- بحث ۱۲۸
۷-۲- نتایج ۱۲۹
۷-۳- پیشنهادات ۱۳۰
منابع ۱۳۱

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل (۱-۱): انواع اصلی ناپایداری در سازه های زیرزمینی ۹

شکل (۱-۲): انواع اصلی رفتار زمین ۱۲

شکل (۱-۳): ارتباط بین رفتار زمین و طراحی و مهندسی سنگ ۱۳

شکل (۱-۴): نمودار مربوط به مراحل اساسی در طراحی سازه های زیرزمینی ۱۴

شکل (۱-۵): نمودار روشهای مدل سازی در مکانیک سنگ ۱۶

شکل (۱-۶): مثال مربوط به روش های مدل سازی در طراحی مغار در سنگ رسوبی ۱۷

شکل (۱-۷): نمودار ساده شده برای انتخاب روش طراحی ۱۸

شکل (۱-۸): نمودار به روز شده برای فرآیند طراحی مهندسی سنگ ۱۹

شکل (۱-۹): نمودار عمومی طراحی حفاری زیرزمینی ۲۱

شکل (۱-۱۰): فاصله پیشنهادی پیچ سنگ ها در سیستم Q ۲۳

شکل (۲-۱): نقشه زمین شناسی عمومی ساختگاه تونل شماره یک راه آهن قزوین – رشت ۳۰

شکل (۲-۲): رخنمون لایه های آندزیت بازالتی ضخیم لایه در محدوده خروجی تونل ۳۱

شکل (۳-۲): لایه های نازک توفیتی که آندزیت بازالتها را پوشش داده اند ۳۱

شکل (۲-۴): نمایی از رسوبات (Q^{sd}) در بخش شرقی دهانه خروجی تونل ۳۲

شکل (۲-۵): آبرفتها و واریزه های دامنه ای ریزدانه Q^{m} در محدوده ورودی تونل ۳۲

شکل (۲-۶): نهشته های آبرفتی(Q^{t}) در آبراهه های منتهی به رودخانه ملاعلی ۳۳

شکل (۲-۷): نمایی از چین خوردگی های به وقوع پیوسته در سنگهای آندزیتی ۳۳

شکل (۲-۸): دسته درزه هایی با شیب نسبتاً قائم، موجب تشکیل ریختار تقریباً پرتگاهی ۳۴

شکل (۲-۹): پرشدگی کلسیتی در برخی درزه های با بازشدگی بیشتر از ۲ میلیمتر ۳۴

شکل (۲-۱۰): استریوگرافی ناپیوستگی ها و لایه بندی در محدوده ورودی و میانی تونل ۳۸

شکل (۲-۱۱): استریوگرافی ناپیوستگی ها و لایه بندی در محدوده خروجی تونل ۳۸

شکل (۲-۱۲): شکل مربوط به نیمرخ طولی تونل شماره یک راه آهن قزوین – رشت ۳۹

شکل (۳-۱): نمودار اصلاح شده سیستم Q برای انتخاب نگهداری و تقویت تونل ها ۴۹

شکل (۳-۲): محدودیت سیستم Q در تعیین سیستم نگهداری ۵۰

شکل (۳-۳): ارتباط تجربی بین V_p , Q , σ_c، عمق، تخلخل و مدول تغییر شکل استاتیکی ۵۰

شکل (۳-۴): نمایش نمودار سیستم Q بارتون بر حسب وزن نگهداری ۵۲

شکل (۳-۵): وزن نگهداری بر اساس سیستم Q برای دهانه های ۴، ۱۰ و۲۰ متر ۵۳

شکل (۳-۶): وزن نگهداری برای دهانه های ۶، ۱۰ و ۱۴ متری بر اساس داده های آماری ۵۴

شکل (۳-۷): تأثیر نسبی پارامترها در طبقه بندی توده سنگ RMR، SRC و Q ۵۹

شکل (۳-۸): منحنی عمومی تنش – کرنش و انواع کرنش ها ۶۱

شکل (۳-۹): رابطه بین ویژگیهای سنگ بکر و توده سنگ ۶۲

شکل (۳-۱۰): رابطه بین نسبت مدولی و کرنش پیک ۶۳

شکل (۳-۱۱): ارتباط بین شاخص مقاومت زمین شناسی و مقاومت چسبندگی توده سنگ ۶۶

شکل (۳-۱۲): ارتباط بین شاخص مقاومت زمین شناسی و زاویه اصطکاک ۶۶

شکل (۳-۱۳): ارتباط بین شاخص مقاومت زمین شناسی و مقاومت فشاری سنگ بکر ۶۷

شکل (۴-۱): وزن مخصوص تعداد ۵۴۸ نتیجه آزمایش ۸۰

شکل (۴-۲): تنش برجای قائم به عنوان تابعی از عمق ۸۰

شکل (۴-۳): نسبت تنش های افقی به قائم برای مدول تغییر شکل بر اساس رابطه شئوری ۸۲

شکل (۴-۴): رابطه بین عمق و ضریب K براساس آزمایش های تنش های برجای قائم و افقی ۸۳

شکل (۴-۵): رابطه بین عمق و ضریب K بر اساس نتایج تنش های برجای قائم و افقی ۸۴

شکل (۵-۱): وضعیت لایه بندی و ابعاد قطعات سنگ در محدوده تونل ۸۹

شکل (۵-۲): وضعیت لایه بندی و ابعاد قطعات سنگ در محدوده ورودی تونل ۸۹

شکل (۶-۱): تقسیم زمین به سه مدل: a)پیوسته، b)ناپیوسته و c)شبه پیوسته ۱۰۲

شکل (۶-۲): ابعاد و مراحل حفاری مقطع تونل ۱۱۰

شکل (۶-۳): تغییرات جابجایی قائم در قسمت فوقانی تونل بدون نگهداری در محدوده Ta ۱۱۱

شکل (۶-۴): تغییرات جابجایی قائم در اطراف تونل بدون نصب نگهداری در محدوده Ta ۱۱۱

شکل (۶-۵): فاکتور ایمنی تونل بدون نصب نگهداری در محدوده Ta ۱۱۱

شکل (۶-۶): تغییرات جابجایی قائم در اطراف تونل بعد از نصب نگهداری ۱۱۲

شکل (۶-۷): تغییرات جابجایی افقی در اطراف تونل بعد از نصب نگهداری ۱۱۳

شکل (۶-۸): توزیع تنش σ_1 در اطراف تونل بعد از نصب نگهداری ۱۱۴

شکل (۶-۹): محدوده زون پلاستیک و مقادیر فاکتور ایمنی تونل بعد از نصب نگهداری ۱۱۵

شکل (۶-۱۰): تغییرات نیروهای محوری سیستم نگهداری در اطراف تونل در محدوده Tb ۱۱۶

شکل (۶-۱۱): اولین مرحله حفاری قسمت فوقانی و تغییرات جابجایی در محدوده Ta ۱۱۸

شکل (۶-۱۲): تغییرات جابجایی در مقطع فوقانی تونل در محدوده Ta ۱۱۸

شکل (۶-۱۳): تغییرات جابجایی کل در اطراف تونل ۱۱۹
شکل (۶-۱۴): تغییرات جابجایی قائم تونل ۱۲۰
شکل (۶-۱۵): تغییرات جابجایی افقی در جهت دیواره تونل ۱۲۱
شکل (۶-۱۶): تغییرات جابجایی افقی در جهت سینه کار تونل ۱۲۲
شکل (۶-۱۷): توزیع تنش های اصلی در اطراف تونل ۱۲۳
شکل (۶-۱۸): محدوده زون پلاستیک در اطراف تونل ۱۲۴
شکل (۶-۱۹): تغییرات تغییر شکل قائم در المان نگهداری نصب شده در تونل ۱۲۵
شکل (۶-۲۰): تغییرات تغییر شکل افقی در المان نگهداری نصب شده در تونل ۱۲۵

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول (۱-۱): طبقه بندی توده سنگ بر اساس رفتار زمین و پیشنهادات مربوط به روش اتریشی ۸

جدول (۱-۲): انواع رفتار زمین در سازه های زیرزمینی ۱۰

جدول (۱-۳): انواع اصلی رفتار زمین در سازه های زیرزمینی ۱۱

جدول (۱-۴): توضیحات مربوط به مراحل فرآیند طراحی مهندسی سنگ ۲۰

جدول (۱-۵): برخی از سیستم های مهندسی سنگ ۲۳

جدول (۱-۶): مناسبت روشهای طراحی مهندسی با رفتار زمین ۲۷

جدول (۲-۱): ویژگیهای دسته درزه ها و لایه بندی ورودی و میانی تونل شماره یک ۳۷

جدول (۲-۲): ویژگیهای دسته درزه ها و لایه بندی محدوده خروجی تونل شماره یک ۳۷

جدول (۲-۳): پارامترهای مربوط به سنگ بکر در محدوده تونل ۴۰

جدول (۳-۱): جدول رده بندی ژئومکانیکی RMR ۴۳

جدول (۳-۲): جدول مربوط به تعیین شاخص RQD سنگ ۴۴

جدول (۳-۳): جدول تعیین ضریب مربوط به تعداد دسته درزه ۴۴

جدول (۳-۴): جدول تعیین ضریب مربوط به زبری درزه ها ۴۴

جدول (۳-۵): جدول تعیین ضریب مربوط به هوازدگی درزه ۴۵

جدول (۳-۶): جدول تعیین ضریب مربوط به کاهش آب درزه ۴۵

جدول (۳-۷): جدول تعیین ضریب مربوط به کاهش تنش ۴۶

جدول (۳-۸): اندازه عددی ضریب *ESR* در وضعیت های مختلف ۴۷

جدول (۳-۹): طبقه بندی ژئومکانیکی توده سنگ به روشSRC ۵۶

جدول (۳-۱۰): تعدیل امتیازات مربوط به داده های سطحی در طبقه بندی SRC ۵۵

جدول (۳-۱۱): تعدیل امتیازات طبقه بندی SRC بر اساس فاکتورهای ساخت ۵۷

جدول (۳-۱۲): دستورالعملهای حفاری و نگهداری تونل ها بر اساس سیستم RMR ۵۸

جدول (۳-۱۳): مقایسه روشهای مربوط به رده بندی لهیدگی در تونل ها ۶۰

جدول (۳-۱۴): طبقه بندی پیشنهادی برای پتانسیل لهیدگی در تونل ها ۶۴

جدول (۳-۱۵): ارتباط بین کرنش، ایده های ژئوتکنیکی و انواع نگهداری ۶۵

جدول (۳-۱۶): توصیف توده سنگ بلوکی بر اساس قفل شدگی و شرایط درزه ۶۸

جدول (۴-۱): معادلات تجربی پیشنهاد شده برای محاسبه مقاومت فشاری توده سنگ ۷۱
جدول (۴-۲): نتایج محاسبات مربوط به تعیین مقاومت فشاری توده سنگ ۷۳
جدول (۴-۳): نتایج تحلیل آماری مربوط به تعیین مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ ۷۳
جدول (۴-۴): معادلات تجربی برای برآورد مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ ۷۵
جدول (۴-۵): نتایج محاسبات مربوط به تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ ۷۶
جدول (۴-۶): نتایج تحلیل آماری مربوط به تعیین مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ ۷۶
جدول (۴-۷): روابط تجربی پیشنهادی جهت محاسبه ثابت های هوک – براون ۷۷
جدول (۴-۸): دستورالعمل های مربوط به تعیین فاکتور پراکندگی ۷۹
جدول (۴-۹): نتایج محاسبات مربوط به تعیین ثابت های هوک – براون و موهر – کولمب ۷۸
جدول (۴-۱۰): نتایج محاسبات مربوط به تعیین تنش های برجا در محدوده تونل ۸۵
جدول (۴-۱۱): مقادیر پیشنهادی پارامترهای ژئومکانیکی و تنش های برجای تونل ۸۶
جدول (۵-۱): پیش بینی رفتار زمین در محدودهٔ تونل ۹۰
جدول (۵-۲): طبقه بندی RMR توده سنگ مسیر تونل ۹۱
جدول (۵-۳): تعیین سیستم نگهداری تونل بر اساس دستورالعمل های طبقه بندی RMR ۹۲
جدول (۵-۴): طبقه بندی Q توده سنگ مسیر تونل ۹۲
جدول (۵-۵): تعیین سیستم نگهداری تونل بر اساسشاخص کیفیت تونل سازی Q ۹۳
جدول (۵-۶): برآورد وزن نگهداری تونل ۹۳
جدول (۵-۷): تعیین سیستم نگهداری تونل بر اساس مفهوم وزن نگهداری ۹۳
جدول (۵-۸): طبقه بندی توده سنگ مسیر تونل شماره یک به روشSRC ۹۴
جدول (۵-۹): تعیین سیستم نگهداری تونل بر اساس دستورالعمل های طبقه بندی RMR ۹۵
جدول (۵-۱۰): محاسبه کرنش بحرانی(درصد) تونل به روش های تجربی ۹۵
جدول (۵-۱۱): محاسبه شاخص لهیدگی(SI) تونل به روش های تجربی ۹۶
جدول (۵-۱۲): پیشنهادات ژئوتکنیکی و سیستم نگهداری تونل بر اساس شاخص لهیدگی ۹۶
جدول (۵-۱۳): توصیف توده سنگ محدوده تونل بر اساس شاخص GSI ۹۷
جدول (۵-۱۴): توصیه های سیستم نگهداری تونل بر اساس روش های تجربی مختلف ۹۹
جدول (۶-۱): پارامترهای مقاومتی شاتکریت و قاب فولادی مورد استفاده در تونل ۱۱۰

مقدمه

تونل شماره یک قطعه دو راه آهن قزوین – رشت در حدود ۵۰ کیلومتری شمال غربی قزوین قرار دارد. این تونل در محدوده کیلومتر ۴۴+۹۷۵m تا ۴۵+۶۵۵m طرح راه آهن قزوین – رشت قرار گرفته است. مقطع این تونل به شکل نعل اسبی با دهانه ۱۱/۳۰m و ارتفاع ۹/۴m می باشد. از نظر تقسیمات زمین ساختاری این تونل در ناحیه البرز غربی قرار گرفته است. ساختگاه تونل شماره یک را عوارض ناهموار و کوهستانی متعلق به سازند کرج در میان گرفته اند. این سازند با گسترش وسیع، نشانگر تکاپوهای انفجاری شدید آتشفشانهای زیردریایی در زمان ائوسن است که گاه تا ۳۰۰۰ متر ضخامت دارد. سنگهای در برگیرنده تونل مورد مطالعه عمدتاً متعلق به ائوسن اند و از سنگهای توفیت و آندزیت بازالت تشکیل یافته است.

امروزه سازه های زیرزمینی نقش مهمی در توسعه کشورها ایفا می کنند. این سازه ها در بسیاری از فعالیتهای عمرانی نظیر توسعه راه و راه آهن، مترو، خطوط انتقال آب، گاز و فاضلاب، نیروگاههای زیرزمینی، دفن زباله های هسته ای، ذخیره مواد سوختنی، تأسیسات نظامی و . . . احداث می شوند. ارزیابی پایداری حفریات زیرزمینی و از آن جمله تونل ها از مهمترین پارامترهای مؤثر در طراحی این سازه ها است. در سازه های ناپایدار سیستم نگهداری مناسبی نیاز است که متناسب با شرایط محیط، طراحی شود. انواع و روشهای مختلف طراحی وجود دارد که با توجه به اطلاعات حاصل از شرایط زمین بکار می روند، برخی از این روشها شامل مدل سازی عددی، محاسبات تحلیلی، روشهای تجربی و روشهای مشاهده ای می باشد. شرایط زمین شناسی و توده سنگهای با تنوع زیاد ممکن است و مهم است که ابزارهای طراحی مناسب با شرایط زمین و توده سنگ انتخاب شود. واضح است که پیدا کردن یک راه حل منفرد برای مسائل پایداری تونل کار ساده ای نیست. عدم قطعیت در پارامترهای مقاومتی سنگ و شرایط تنش موانع این هدف است. روشهای تجربی و عددی ابزارهای مفیدی برای غلبه بر این مشکلات است. هر دو روش می تواند برای بهتر کردن، سریع کردن و استفاده از قضاوت های مهندسی به کار گرفته شود. بدلیل سهولت کاربرد روشهای طبقه بندی، از این روشها در حد گسترده ای استفاده می شود و بیش از ۳۰ سال است که کاربرد دارند. استفاده از سیستم های طبقه بندی توده سنگ در سالهای اخیر، مقدار زیادی داده تولید کرده و اجازه داده است که ارزیابی تونل های با ابعاد، ضخامت روباره و تحت شرایط زمین شناسی متفاوت امکان پذیر باشد. به دلیل پیچیده بودن مسائل و مشکلاتی که در حفریات زیر زمینی با آنها مواجه می شویم، روشهای تجربی به تنهائی نمی توانند مسائل به وجود آمده را حل و فصل نمایند. بنابراین اکثر کارشناسان بر این باورند که همزمان با روشهای تجربی، برای رسیدن به نتایج مطلوب می توان از روشهای عددی استفاده کرد. روش های عددی این مزایا را دارد؛ (۱) با استفاده از روش های عددی می توان هر سازه زیرزمینی با هر شکل سطح مقطعی را تحلیل نمود. (۲) با استفاده از روش های عددی می توان تنش و جابجایی را به راحتی در تمام نقاط سیستم و در هر زمان که لازم باشد بدست آورد. (۳) در روش‌های عددی می توان روند حفاری، نصب نگهداری و سایر فعالیت‌های تونل سازی را درنظر گرفت.

روش های تجربی در کوتاه مدت پایداری تونل را مورد بررسی قرار می دهند ولی روشهای عددی پوشش دائمی تونل را در دراز مدت ارزیابی می نمایند. می توان نتیجه گرفت که روش های تجربی و عددی به صورت مکمل و در کنار هم بسیار موفقیت آمیز می باشند.

هدف از انجام این پروژه طراحی سیستم نگهداری مناسب برای تونل شماره یک راه آهن قزوین – رشت به روش های تجربی و عددی می باشد. با توجه به اهمیت موضوع طراحی، در فصل اول اصول کلی طراحی فضاهای زیرزمینی بیان می شود و با در نظر گرفتن پارامترها و توصیف انواع رفتار زمین، روش یا روش های مورد نیاز برای طراحی سیستم نگهداری تعیین می شود. در فصل دوم مطالعات زمین شناسی عمومی، ساختمانی و مهندسی ساختگاه تونل شماره یک راه آهن قزوین – رشت ارائه شده است. فصل سوم به معرفی سیستم های طبقه بندی توده سنگ مانند RMR و Q جهت تعیین نگهداری مورد نیاز تونل به روش های تجربی می پردازد. روش های تجربی مختلف جهت تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ (مقاومت فشاری توده سنگ، مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ، ثابت های هوک – براون و پارامترهای موهر- کولمب) در فصل چهارم ارائه و برای محدوده تونل مورد مطالعه محاسبه شده است، همچنین تعیین تنش های برجا با استفاده از روش های تجربی مختلف برای تونل شماره یک برآورد شده است. در فصل پنجم سیستم نگهداری مورد نیاز تونل با استفاده از روش های تجربی ارائه شده در فصل سوم و همچنین رفتار زمین در محدوده مورد مطالعه ارائه شده است. فصل ششم شامل طراحی سیستم نگهداری تونل با استفاده از روش های عددی (نرم افزارهای *FLAC* و *Plaxis ۳D Tunnel*) می باشد و با تلفیق نتایج حاصل از روش های تجربی و عددی سیستم نگهداری مناسب برای تونل شماره یک راه آهن قزوین – رشت تعیین شده است. فصل هفتم شامل بحث کلی در مورد موضوع بوده و در پایان نتایج حاصل از این تحقیق و پیشنهادات ارائه شده است.

با داشتن پارامترهای ژئوتکنیکی تونل مورد مطالعه، طراحی سیستم نگهداری با استفاده از روش های تجربی RMR، Q، مفهوم وزن نگهداری، SRC و پتانسیل لهیدگی تعیین می شود. طراحی سیستم نگهداری با استفاده از روش های عددی به کمک نرم افزارهای FLAC و Plaxis ۳D Tunnel انجام می گیرد و در نهایت با تلفیق نتایج حاصل از روش های تجربی و عددی، سیستم نگهداری مناسب برای تونل انتخاب می شود.

فصل اول :

اصول کلی در طراحی فضاهای زیرزمینی

۱-۱- ملاحظات کلی در طراحی سازه های زیرزمینی

طراحی فضاهای زیرزمینی، به مفهوم وسیع کلمه، عبارت از طراحی سیستم‌های حائل برای این سازه‌ها است. این موضوع دامنهٔ گسترده‌ای را تشکیل می‌دهد که از حفاری‌های موقت معدنی که در سنگ خوب احداث می‌شوند و نیاز به حائل ندارند، تا فضاهای بزرگ زیرزمینی دائمی در مهندسی عمران که شامل سیستم حائل، مرکب از تزریق کامل همراه با سنگ دوزهای پیش‌تنیده و تور فولادی و بتن پاشی است را شامل می‌شود. این دو حد از سیستم حائل را می‌توان به عنوان حد بالا و حد پائین طراحی سیستم حائل در فضاهای زیرزمینی در نظر گرفت.

محور اساسی در طراحی هر فضای زیرزمینی باید بر پایه‌ی مورد استفاده قراردادن خود سنگ به عنوان مصالح اصلی سازه‌ای باشد. در طی فرآیند حفاری تا جائی که ممکن است، میزان شکستگی و سست شدگی سنگ اطراف فضاهای زیرزمنیی به حداقل برسد تا نیاز به حائل بتنی یا فولادی کمتر شود. عمدتاً سنگ‌های سخت در حالت بکر و قبل از قرارگیری در معرض تنش های فشاری، به مراتب قوی‌تر از بتن بوده و بسیاری از آنها به لحاظ مقاومت هم ردیف فولاد قرار می‌گیرند. در نتیجه اقتصادی نیست که مصالحی را مثل سنگ که ممکن است کاملاً و به اندازه کافی مقاوم باشد با مصالحی مثل بتن که معلوم نیست بهتر از سنگ باشد، عوض نمود.

وسعت و دامنهٔ استفاده از خود سنگ به عنوان حفاظ و نگهدارنده، بستگی به شرایط زمین شناسی دارد که در ساختگاه و سایت فضای زیرزمینی حاکم است و بستگی به این دارد که طراحی تا چه میزان نسبت به این شرایط حساس است و تا چه میزان می‌خواهد آنها را در طرح تأثیر داده در نظر بگیرد. بنابراین، تفسیر دقیق زمین‌شناسی منطقه حفاری از شروط ضروری برای طراحی منطقی است[۱].

۱-۲- مطالعات زمین شناسی

مطالعات زمین شناسی از طریق سطح زمین، اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی، مغزه های اکتشافی، اطلاعات مفیدی را مستقیماً در دسترس قرار می‌دهند، اما با همین درجه از اهمیت برای فرد زمین شناس، ممکن است کسب آگاهی از زمین‌شناسی منطقه ای و تاریخ زمین‌شناسی منطقه مورد نظر بوده، و نیز درک و ملاحظات کلی از رفتار و پاسخ سنگ‌ها در محیط‌های زمین‌شناسی متغیر مورد نظر باشد. این قبیل اطلاعات و آشنایی‌ها به طراح اجازه می‌دهد تا به نحو بسیار خوب تخمینی نیمه عددی از انواع عوارض ساختاری و محل تقریبی آنها که در عمق مواجه خواهد شد، بدست آورد.

متغیر بودن شرایط زمین شناسی و ژئوتکنیکی در ساختگاه پروژه های مختلف، روش های طراحی، محاسبه و اجرای متفاوتی را می طلبد و نیز ایجاب می کند که از تجربه های گذشته و اصول علمی و فنی به طور مداوم استفاده شود. مطالعات دقیق زمین شناسی، سنگ شناسی، بررسی های چینه شناسی منطقه و اطلاعات لازم از ناپیوستگی ها و طرز قرار گیری آنها و مناطق دگرسان شده، تنش های در جای زمین و شناخت رفتار

زمین در برابر آب، زلزله و فشارهای وارده و لرزش های اعمال شده به مجموعه فضای زیرزمینی در انتخاب ترتیب و توالی حفاری تونل و مغار می تواند راهنمای مناسبی باشد و دانستن آن از اهمیت ویژه ای برخوردار است.
بنابراین قبل از شروع طراحی و ساخت هر پروژه زیرزمینی باید مطالعات زمین شناسی صحرایی، زمین شناسی مهندسی، ژئوفیزیک، هیدروژئولوژی، ژئومکانیک و آزمایشهای برجا و آزمایشگاهی جهت تعیین پارامترهای طراحی با دقت بسیار بالایی انجام گیرد تا در مرحله طراحی بتوان با اعتماد بالاتری از آنها استفاده کرد و میزان اعتبار نتایج حاصله از این پارامترها نیز بالا باشد. تنها با دانستن مسائل فوق است که اتخاذ تصمیم در مورد مسائل اجرایی طرح و روش حفاری و همچنین انتخاب نوع سیستم نگهدارنده میسر خواهد شد[۲].

۱-۳- رفتار زمین

یک مرحله اساسی و مهم در عملیات طراحی، تشخیص و تعیین رفتار زمین بوده و بدون آگاهی از رفتار زمین نمی توان عملیات مهندسی مناسب و محاسبات مربوط به سیستم های نگهداری را انجام داد. پایداری حفریات زیرزمینی به رفتار زمین آنها بستگی دارد. زمانی که پیش بینی رفتار زمین مشکل است، استفاده از روش مشاهده ای[۱] مناسب است. شوبرت[۲] مراحل طراحی تونل ها را تا مرحلهٔ ساخت به صورت زیر بیان کرده است:

۱. مرحلهٔ اول تعیین نوع و ساختار توده سنگ،
۲. مرحلهٔ دوم تعیین نوع رفتار زمین در اطراف تونل.

در این قسمت عوامل مؤثر بر روی رفتار زمین و اثرات آنها و همچنین انواع رفتارهای زمین در اطراف حفریات زیرزمینی بررسی می شود.

۱) تأثیر نیروهای وارده

نیروهای مؤثر بر توده سنگ اطراف یک سازه زیرزمینی، بستگی به عمق سازه و موقعیت زمین شناسی آن دارد. شدت و جهت این نیروها ممکن است تحت تأثیر توپوگرافی منطقه و تاریخچه زمین شناسی منطقه باشد. علاوه بر تنش های بر جا و تنش های ناشی از آب زیرزمینی، ارتعاشات ناشی از زمین لرزه ها یا آتشکاری نزدیک سازه می توانند بر روی پایداری آن اثر بگذارند[۳].

۲) تأثیر پارامترهای مربوط به سازه های زیرزمینی

مهمترین پارامتر ها و مشخصه های مربوط به سازه زیرزمینی که بر روی پایداری آن تأثیر دارند، در زیر بیان شده است.

۱. Observational method
۲. Schubert

الف) تأثیر اندازه و هندسه حفریات زیرزمینی

اندازه و ابعاد حفریات زیرزمینی، پایداری و رفتار سازه را تحت تأثیر قرار می دهد. در واقع تغییر شکلهای یک سازه، با افزایش شعاع آن، زیاد می شود. در زمینهایی که تحت تنش بیش از اندازه هستند، میزان کرنش ها و بارهای وارد بر سیستم نگهداری افزایش می یابد.

بر اساس تحقیقات انجام گرفته، ثابت شده است که مقاومت توده سنگ با افزایش ابعاد و اندازه منطقه بارگذاری شده کاهش می یابد. مهمترین فاکتور که بایستی هنگام طراحی به آن توجه نمود، نسبت متوسط درجه درزه داری به قطر تونل می باشد. جهت مقاصد مهندسی سنگ، پیوستگی زمین با استفاده از فاکتور پیوستگی([1]CF) توصیف می گردد، که مقدار این فاکتور برابر است با نسبت بین قطر تونل به قطر بلوک $\left(\frac{D_t}{D_b}\right)$ این فاکتور نشان دهنده تعداد بلوک های واقع شده در امتداد سقف تونل می باشد.

پالمستروم و استیل[2] با استفاده از روشهای محیطهای پیوسته، محیطهای پیوسته معادل و محیطهای ناپیوسته، تقسیم بندی زیر را ارائه کرده اند:

I. پیوسته – سالم: تعداد درزه ها کم یا فاصله بین درزه ها خیلی زیاد، دارای کمتر از ۶ بلوک، در امتداد سقف یا ارتفاع دیواره سازه زیرزمینی(CF< ۶).

II. ناپیوسته (بلوکی): توده سنگهای با درزه داری کم تا زیاد، دارای ابعاد بلوکهای متغیر از dm^3 تا m^3. تعداد بلوکها بین حدوداً ۳ تا ۳۰ در سقف سازه (CF = ۳-۳۰).

III. پیوسته – توده ای: ذرات دانه ها یا قطعات، بدون چسبندگی یا با چسبندگی کم، همچنین سنگهای رسوبی شکننده و سست و سنگهای به شدت درزه دار و خرد شده با ابعاد قطعات متغیر بین mm^3 تا dm^3، در این حالت بیشتر از ۱۵ بلوک در امتداد سقف یا دیواره سازه وجود دارد (CF > ۱۵).

همان طور که در بالا مشاهده می شود، در رفتارهای پیوسته و ناپیوسته، یک همپوشانی در مقدارCF وجود دارد که این همپوشانی در محدوده های زیر می باشد[۳]:

IV. ۳ تا ۶ =CF، پیوسته – سالم تا ناپیوسته (بلوکی)

V. ۱۵تا ۳۰=CF، ناپیوسته (بلوکی) تا پیوسته – توده ای

ب) تأثیر روش حفاری

در طی مراحل برنامه ریزی، مشخصات و خصوصیات سنگ بکر مربوط به قبل از عملیات حفاری می باشد. اما در طول حفاری ترکیب توده سنگ ممکن است تغییر کند، این امر سبب استفاده از عملیات حفاری متعدد و

[1]. Continuity Factor

[2]. Palmstorm and Still

متفاوت می باشد که باعث ایجاد یک سری درزه و شکاف اضافی و تشکیل زونهای آسیب دیده و آشفته در توده سنگ اطراف تونل می شود. از میان روشهای متعدد حفاری، چالزنی و آتشباری بیشترین تأثیر منفی را بر روی توده سنگهای اطراف سازه دارد[۳].

ج) تأثیر سیستم نگهداری و زمان نصب آن

طراحی سیستم نگهداری سنگ عمدتاً بر اساس منحنی عکس العمل زمین می باشد. سیستم نگهداری بایستی قبل از آنکه شکست اتفاق بیفتد نصب شود، اما چنانچه امکان داشته باشد می توان نصب آن را برای کاهش بار وارد بر سیستم نگهداری به تعویق انداخت. زمان پایداری، بر اساس تجربه بدست می آید و سنگهای با کیفیت بهتر دارای زمان پایداری طولانی تری خواهند بود. زمان پایداری بلوکهای منفرد در توده سنگهای خوب، خیلی محدود خواهد بود. در زمینهایی که تحت تنش بیش از اندازه قرار دارند، میزان تغییر شکلها به روش نگهداری، میزان و سختی سیستم نگهداری و همچنین زمان نصب آن بستگی دارد[۳].

۱-۴- انواع رفتار زمین

غالباً شکست بر اثر ناپایداری ایجاد می شود. در توده سنگها، انواع متعدد و متفاوت شکست ممکن است اتفاق بیفتد که به عواملی نظیر ترکیب توده سنگ، تأثیر تنش ها و فشار آب زیرزمینی و همچنین اندازه سازه بستگی دارد.

آشکار سازی و پیش بینی زونهای با پتانسیل مشکل ساز (عمدتاً بوسیله حفاری و کنترل کردن)، به ویژه وقتی که تونل با شرایط زمین متفاوت از جمله لایه های دگرگونی، چین خورده، گسله دار و زونهای با فشار آب بالا، از اهمیت بالایی برخوردار است. مقاومت پائین، تغییر شکل پذیری بالا و ناهمگنی[۱] توده سنگ از جمله مشکلات موجود در پیش بینی عملکرد[۲] تونل زنی می باشد. ترتیب حفاری و سیستم های نگهداری بر اساس روش اتریشی[۳] در جدول(۱-۱) نشان داده شده است. [۴].

[۱]. heterogeneity
[۲]. performance
[۳]. NATM

جدول(۱-۱): طبقه بندی توده سنگ بر اساس رفتار زمین و پیشنهادات مربوط به حفاری – نگهداری براساس روش اتریشی [۴]

رفتار توده سنگ	نیازهای کلی حفاری و نگهداری
سنگ پایدار	بدون نگهداری؛ حفاری تمام جبهه
بیش شکنی[۱]	نگهداری سقف؛ حفاری تمام جبهه یا پله ای
شکننده[۲]	نگهداری سقف؛ حفاری پله ای
خیلی شکننده	نگهداری سقف و دیواره؛ حفاری پله ای
زمین رونده[۳]	نگهداری سقف و دیواره، در صورت نیاز نگهداری کف؛ حفاری پله ای
انفجار سنگ	نگهداری سقف، دیواره و کف؛ حفاری پله ای
لهیدگی	نگهداری سقف، دیواره و کف، در صورت نیاز نگهداری جبهه کار؛ حفاری پله ای
لهیدگی شدید	نگهداری سقف، دیواره، کف و جبهه کار، حفاری پله ای
جریانی	نگهداری خاص نیاز است؛ حفاری پله ای
تورمی	نگهداری خاص نیاز است؛ حفاری پله ای

اساساً ناپایداری (شکست) در توده سنگهای اطراف سازه زیرزمینی به دو گروه اصلی و مهم تقسیم می شود:

۱) **شکست بلوکی**، که در این حالت بلوکهای موجود در سقف و دیواره های جانبی بر اثر حفاری شروع به حرکت می کنند. هوک و براون از این شکست ها به عنوان "شکست های ساختاری منظم و جهت دار"[۴] یاد کرده اند که شامل انواع مختلفی نظیر شل شدگی[۵]، سقوط بلوکها و . . . می شوند.

۲) گروه دیگر از شکستها، **شکستهای ناشی از تمرکز تنش** می باشند، به آن معنا که وقتی تنش های موجود در زمین از مقاومت مواد تجاوز کند، این شکستها اتفاق می افتند، و ممکن است به صورتهای زیر مشاهد شود:

I. تمرکز تنش در سنگهای سالم و توده ای (که به صورت انفجار سنگ[۶]، پوسته پوسته شدن و ترکیدن سنگ مشاهده می شود).

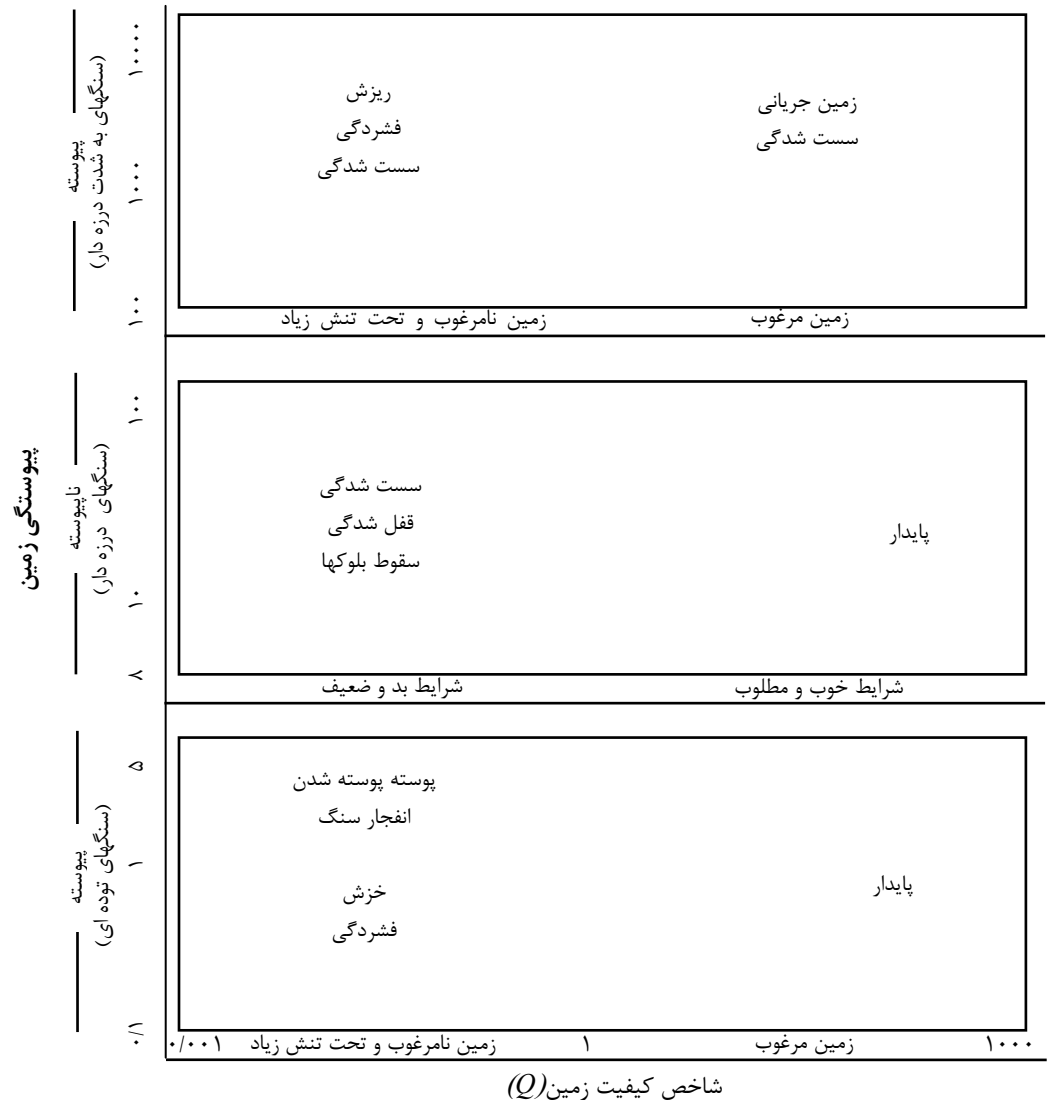
II. تمرکز تنش گذاری در مواد ناپیوسته مانند خاک و سنگهای به شدت درزه دار (که باعث ایجاد خزش[۷] و فشارش می شود).

شکل (۱-۱) به طور شماتیک، انواع اصلی ناپایداری را در سازه های زیرزمینی نشان می دهد که در آن ناپایداریها بر اساس شاخص کیفیت زمین(Q) و پیوستگی(CF) بیان شده اند[۳]. در این شکل پیوستگی زمین در سه گروه

۱. Over – breaking
۲. Friable
۳. Rolling
۴. Structurally controlled failure
۵. Loosening
۶. Rock Burst
۷. Creep

پیوسته (سنگ های به شدت درزه دار)، ناپیوسته (سنگ های درزه دار) و پیوسته (سنگ های توده ای) تقسیم بندی شده است. پیوستگی زمین(محور عمودی) بر اساس شاخص کیفیت زمین(Q) نشان داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، در محدوده ای که شاخص کیفیت زمین کم است ناپایداری وجود دارد.

در سال ۲۰۰۴ شوبرت و گورکی[۱]، بسیاری از انواع ناپایداری حفریات زیرزمینی را مطابق جدول (۱-۲) ارائه کردند. شوبرت و گورکی رفتار زمین را به ۱۱ نوع تقسیم بندی کرده است، مطابق این تقسیم بندی در محیط هایی که پتانسیل لغزش و یا سقوط بلوک ها کم است رفتار زمین می تواند پایدار باشد، اما در جاهایی که ناپیوستگی وجود دارد و همچنین محیط دارای تنش زیاد است انواع ناپایداری ها از جمله شکست های برشی، انفجار سنگ و شکست خمشی ممکن است رخ بدهد و به طور کلی می توان گفت که رفتار زمین مدام تغییر می کند.



شکل (۱-۱): انواع اصلی ناپایداری در سازه های زیرزمینی[۳]

[۱]. Schubert and Goricki