

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج

انتخاب سیستم نگهداری مناسب تونل انتقال آب بهشت آباد با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MADM)

دانشجو: رامین رفیعی

اساتید راهنما:

دکتر محمد عطایی

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

اساتید مشاور:

مهندس رضا میکائیل

مهندس سعید مهدوری

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

آذر ماه ۱۳۸۸



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای / رامین رفیعی

تحت عنوان: انتخاب سیستم نگهداری مناسب تونل انتقال آب بهشت آباد با استفاده از روش‌های
تصمیم‌گیری چند معیاره (MADM)

در تاریخ ۱۳۸۸/۹/۲۱ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن مورد ارزیابی و با درجه عالی.
مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی: رضا میکائیل		نام و نام خانوادگی: محمد عطائی
	نام و نام خانوادگی: سعید مهدوری		نام و نام خانوادگی: سید محمد اسماعیل جلالی

امضاء	نمایندة تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: رضا خالو کاکائی		نام و نام خانوادگی: فرهنگ سرشکی
		نام و نام خانوادگی: رضا خالو کاکائی	
		نام و نام خانوادگی:	
		نام و نام خانوادگی:	

تقدیم بہ پدر و مادر عزیزم

آنان کہ خمیدنتا راست قامت بانم

آنان کہ موی سپید کردنتا روی سپید بانم

تقدیر و تشکر

خداوند متعال را شکر هستم که توفیق انجام این تحقیق را بر من ارزانی داشت. بی شک در این مسیر طولانی دست یاری عزیزان فراوانی همراه من

بود که شایسته است تا مراتب سپاس گذاری خود را از آنان اعلام دارم. بر خود لازم می دانم که از تمامی عزیزانی که در طول انجام پایان نامه از

راهنمایی ایشان استفاده کرده ام تشکر کنم. از اساتید راهنمای عزیز جناب آقای دکتر محمد عطائی و آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و نیز مشاور عزیزم

جناب آقای مهندس رضا میکانیل که در بسیاری از مواقع از راهنمایی های ارزنده ایشان استفاده نمودم کمال تشکر و امتنان را دارم.

از برادر و خواهر مهربانم و همچنین از کلیه دوستانم خصوصاً آقایان مهندس مهدی نجفی، سید علی حسینی سعید یوسفی و احسان علی نژاد که در طی دوران

تحصیل فضایی آرام و دوستانه و فریبگی را با ایشان تجربه کردم سپاس گذاری می کنم.

تعهد نامه

اینجانب رامین رفیعی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد / دکتری رشته مهندسی استخراج معدن
دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه / رساله انتخاب سیستم نگهداری مناسب تونل،
انتقال آب بهشت آباد با استفاده از روشهای تصمیم - تحت راهنمایی دکتر عطائی و جلالی ... متعهد می شوم .
گیری چند معیاره (MADM)

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه / رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا یافتههای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ :

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد .

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه / رساله وجود داشته باشد .

چکیده

در این تحقیق انتخاب سیستم نگهداری بهینه (موقت) برای تونل انتقال آب بهشت آباد مورد بررسی قرار می‌گیرد. تونل انتقال آب بهشت آباد با طول ۶۵ کیلومتر و قطر ۶ متر با مقطع نعل اسبی یکی از بزرگترین پروژه‌های آب رسانی که با هدف انتقال آب به فلات مرکزی ایران در حال احداث می‌باشد. سست بودن ساختگاه تونل و قرارگیری بخش اعظم تونل در زیر سطح ایستایی از مهم‌ترین ویژگی‌هایی است که در زمان اجرا، فعالیت تونل‌سازی را کاملاً تحت تأثیر قرار می‌دهد. مهم‌ترین مساله در طراحی و اجرای این پروژه انتخاب سیستم نگهداری مناسب، به منظور پایداری توده سنگ و کاهش گسترش ناحیه پلاستیسیته در اطراف تونل است. در این تحقیق ۶ نوع سیستم نگهداری به عنوان گزینه‌های احتمالی برای این تونل در نظر گرفته شده است و با استفاده از نرم افزار $FLAC^{2D}$ مقادیر جابه‌جایی و ضریب اطمینان برای هر یک از گزینه‌ها محاسبه شده است، سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) و با توجه به شش معیار هزینه، ضریب اطمینان، زمان، قابلیت اجرا، جابه‌جایی و قابلیت مکانیزاسیون، سیستم نگهداری بهینه انتخاب شده است. مطالعات نشان داد پیچ سنگ‌های تزریقی به طول ۳ متر و به فواصل $1/5 \times 1/5$ متر همراه با ۱۰ سانتی‌متر شاتکریت بهترین سیستم نگهداری برای تونل مذکور می‌باشد. در ادامه تحقیق با استفاده از نرم افزار Crystal Ball منحنی توزیع آماری مشخصات زمین رسم و با استفاده از نرم افزار Rocsupport، احتمال شکست و قابلیت اعتماد سیستم نگهداری بهینه به ترتیب ۲۵/۱۲ درصد و ۷۴/۸ درصد محاسبه شده است.

کلمات کلیدی: تونل انتقال آب بهشت آباد، سیستم نگهداری بهینه، FAHP، احتمال شکست، قابلیت

اعتماد

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

۱- تخمین جریان نشت آب های زیرزمینی به تونل انتقال آب بهشت آباد با استفاده از روش های

تحلیلی و عددی- سومین کنفرانس مهندسی معدن- دانشگاه یزد، بهمن ۱۳۸۸

۲- تحلیل احتمالاتی پایداری تونل انتقال آب بهشت آباد با استفاده از روش شبیه سازی لاتین

هایپرکیوب- سومین کنفرانس مهندسی معدن- دانشگاه یزد، بهمن ۱۳۸۸

3-The optimum support selection by using FAHP method for Beheshtabad water transporting tunnel in Naien (تحت داوری)

4-Probabilistic stability analysis of Beheshtabad water transporting tunnel and select the proper support system using TOPSIS approach (تحت داوری)

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه

- ۱-۱- ضرورت طراحی سیستم نگهداری برای سازه‌های زیرزمینی..... ۱
- ۲-۱- مراحل انجام تحقیق..... ۲

فصل دوم: معرفی ساختگاه تونل انتقال آب بهشت‌آباد

- ۱-۲- مقدمه..... ۵
- ۲-۲- زمین ریخت‌شناسی..... ۶
- ۳-۲- زمین‌شناسی مهندسی..... ۷
- ۱-۳-۲- پهنه‌بندی تونل..... ۷

فصل سوم: طراحی سیستم‌های نگهداری و تحلیل استاتیکی آن‌ها

- ۱-۳- مقدمه..... ۱۷
- ۲-۳- مدل‌سازی با نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ ۱۸
- ۱-۲-۳- محدوده‌ی مدل‌سازی..... ۱۹
- ۲-۲-۳- انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن..... ۲۰
- ۳-۲-۳- ترسیم هندسه تونل..... ۲۱
- ۴-۲-۳- حل مدل و به تعادل رساندن آن قبل از حفاری..... ۲۲
- ۵-۲-۳- حفاری تونل و نصب سیستم‌های نگهداری اولیه در نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ ۲۳

- ۲۴ ۱-۵-۲-۳ انتخاب گام پیشروی و فاصله جبهه کار از پوشش
- ۲۵ ۲-۵-۲-۳ رسم منحنی مشخصه زمین
- ۲۵ ۳-۵-۲-۳ اعمال ترخیص تنش معادل با همگرایی به وجود آمده تا لحظه استقرار پوشش
- ۲۹ ۴-۵-۲-۳ نصب پوشش اولیه و تعیین نیروها و گشتاور خمشی به وجود آمده در پوشش اولیه تونل
- ۳۴ ۶-۲-۳ تحلیل پایداری پوشش اولیه
- ۳۷ ۱-۶-۲-۳ ضریب اطمینان کششی پیچ سنگ
- ۳۷ ۲-۶-۲-۳ ضریب اطمینان شاتکریت در برابر نیروی برشی
- ۳۷ ۳-۶-۲-۳ ضریب اطمینان شاتکریت در برابر نیروی محوری

فصل چهارم: انتخاب سیستم نگهداری بهینه با استفاده از روش FAHP

- ۳۹ ۱-۴ مقدمه
- ۴۰ ۲-۴ انواع حالت‌های تصمیم‌گیرنده
- ۴۲ ۳-۴ فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)
- ۴۲ ۴-۴ مراحل محاسبه وزن در روش تحلیل سلسله مراتبی
- ۴۲ ۱-۴-۴ ساختن سلسله مراتب
- ۴۳ ۲-۴-۴ محاسبه وزن
- ۴۴ ۳-۴-۴ سازگاری سیستم

- ۴-۵ مزایای فرآیند تحلیل سلسله مراتبی ۴۴
- ۴-۶ استفاده از AHP به صورت فازی ۴۶
- ۴-۷ انتخاب سیستم نگهداری بهینه ۵۰

فصل پنجم: تحلیل احتمالاتی پایداری تونل

- ۵-۱ مقدمه ۶۱
- ۵-۲ انواع ابهامات ۶۲
- ۵-۲-۱ ابهامات تصادفی (طبیعی) ۶۲
- ۵-۲-۲ ابهامات قوانین ۶۲
- ۵-۲-۳ ابهامات تصمیم‌گیری ۶۳
- ۵-۳ منابع ابهام (عدم قطعیت) در کارهای ژئوتکنیکی ۶۳
- ۵-۳-۱ روش‌های تحلیل ابهامات ژئوتکنیکی ۶۴
- ۵-۴ ضرورت طراحی احتمالاتی ۶۴
- ۵-۵ تحلیل احتمالاتی تونل انتقال آب بهشت‌آباد ۶۹
- ۵-۶ تحلیل قابلیت اعتماد ۷۴

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۶-۱ نتایج ۷۵
- ۶-۲ پیشنهادات ۷۶

فهرست مراجع ۷۸

پیوست الف: روش همگرایی - همجواری ۸۱

پیوست ب: روش عددی تفاضل محدود (نرم افزار $FLAC^{2D}$) ۸۷

فهرست جدول‌ها

۷	جدول ۱-۲- وضعیت پهنه‌های مختلف زمین‌شناسی در مسیر انتقال آب
۲۱	جدول ۱-۳- خصوصیات ژئومکانیکی ساختگاه تونل استفاده شده در نرم‌افزار Flac2D
۳۰	جدول ۲-۳- مشخصات سیستم نگهداری شماره ۱
۳۲	جدول ۳-۳- مشخصات سیستم نگهداری شماره ۲
۳۲	جدول ۴-۳- مشخصات سیستم نگهداری شماره ۳
۳۳	جدول ۵-۳- مشخصات سیستم نگهداری شماره ۴
۳۳	جدول ۶-۳- مشخصات سیستم نگهداری شماره ۵
۳۳	جدول ۷-۳- مشخصات سیستم نگهداری شماره ۶
۴۳	جدول ۱-۴- مقادیر ترجیحات برای مقایسه‌های زوجی بین پارامترها
۵۱	جدول ۲-۴- معیارهای مورد نظر برای انتخاب سیستم نگهداری بهینه
۵۲	جدول ۳-۴- مقادیر ضریب اطمینان و جابه‌جایی به دست آمده از تحلیل عددی مدل‌های ارائه شده
۵۲	جدول ۴-۴- هزینه انواع سیستم نگهداری
۵۲	جدول ۵-۴- مشخصات تیر آهن‌های ۱۶۰ و ۱۸۰
۵۲	جدول ۶-۴- هزینه مربوط به سیستم نگهداری شماره ۱ برای یک متر از طول تونل
۵۳	جدول ۷-۴- هزینه مربوط به سیستم نگهداری شماره ۲ برای یک متر از طول تونل
۵۳	جدول ۸-۴- هزینه مربوط به سیستم نگهداری شماره ۳ برای یک متر از طول تونل
۵۳	جدول ۹-۴- هزینه مربوط به سیستم نگهداری شماره ۴ برای یک متر از طول تونل

- جدول ۴-۱۰- هزینه مربوط به سیستم نگهداری شماره ۵ برای یک متر از طول تونل ۵۳
- جدول ۴-۱۱- هزینه مربوط به سیستم نگهداری شماره ۶ برای یک متر از طول تونل ۵۳
- جدول ۴-۱۲- وزن نهایی معیارها ۵۶
- جدول ۴-۱۳- وزن نهایی گزینه‌ها نسبت به معیار هزینه ۵۸
- جدول ۴-۱۴- وزن نهایی گزینه‌ها نسبت به معیار ضریب اطمینان ۵۸
- جدول ۴-۱۵- وزن نهایی گزینه‌ها نسبت به معیار کارایی ۵۹
- جدول ۴-۱۶- وزن نهایی گزینه‌ها نسبت به معیار زمان ۵۹
- جدول ۴-۱۷- وزن نهایی گزینه‌ها نسبت به معیار جابه‌جایی ۵۹
- جدول ۴-۱۸- وزن نهایی گزینه‌ها نسبت به معیار مکانیزاسیون ۵۹
- جدول ۴-۱۹- امتیاز نهایی گزینه‌ها ۶۰
- جدول ۵-۱- پارامترهای ژئومکانیکی تونل انتقال آب بهشت آباد ۶۸
- جدول ۵-۲- خلاصه آماری از توزیع پارامترهای تونل ۷۰

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱- مراحل انجام تحقیق و ساختار پایان‌نامه ۴
- شکل ۱-۲- موقعیت جغرافیای رودخانه بهشت آباد ۶
- شکل ۲-۲- نقشه پهنه‌بندی زمین‌شناسی ایران و موقعیت تونل ۶
- شکل ۱-۳- ابعاد مدل ایجاد شده در نرم‌افزار ۱۹
- شکل ۲-۳- مرحله اول حفاری تونل ۲۱
- شکل ۳-۳- مرحله دوم حفاری تونل ۲۲
- شکل ۴-۳- کنتورهای جابه‌جایی قائم قبل از حفاری تونل ۲۳
- شکل ۵-۳- کنتورهای تنش قائم قبل از حفاری تونل ۲۳
- شکل ۶-۳- منحنی LDP در شرایط زمین خشک ۲۴
- شکل ۷-۳- منحنی مشخصه زمین (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$) ۲۵
- شکل ۸-۳- تغییرات نرخ ناهمجواری بر حسب فاصله از جبهه کار ۲۶
- شکل ۹-۳- تعیین میزان ترخیص تنش از روی نمودار GRC ۲۷
- شکل ۱۰-۳- کرنش برشی در اطراف تونل در مقطع مورد نظر ۲۸
- شکل ۱۱-۳- جابه‌جایی در اطراف تونل در مقطع مورد نظر ۲۹
- شکل ۱۲-۳- نیروی محوری وارده بر پوشش اولیه در بخش نخست حفاری ۳۰
- شکل ۱۳-۳- گشتاور خمشی وارده بر پوشش اولیه در بخش نخست حفاری ۳۰
- شکل ۱۴-۳- نیروی برشی وارده بر پوشش اولیه در بخش نخست حفاری ۳۱

- شکل ۳-۱۵- نیروی محوری وارده بر پوشش اولیه پس از اتمام حفاری ۳۱
- شکل ۳-۱۶- گشتاور خمشی وارده بر پوشش اولیه پس از اتمام حفاری ۳۱
- شکل ۳-۱۷- نیروی برشی وارده بر پوشش اولیه پس از اتمام حفاری ۳۲
- شکل ۳-۱۸- نیروی محوری وارد بر پیچ سنگ‌ها بعد از حفاری کامل ۳۳
- شکل ۳-۱۹- کنترل مقطع تونل برای بررسی پایداری پوشش اولیه در طاق تونل برای سیستم نگهداری شماره ۱ ۳۶
- شکل ۳-۲۰- کنترل مقطع تونل برای بررسی پایداری پوشش اولیه در دیواره تونل برای سیستم نگهداری شماره ۱ ۳۶
- شکل ۳-۲۱- کنترل مقطع تونل برای بررسی پایداری پوشش اولیه در کف تونل برای سیستم نگهداری شماره ۱ ۳۶
- شکل ۳-۲۲- کنترل مقطع تونل برای بررسی پایداری پوشش اولیه در طاق تونل برای سیستم نگهداری شماره ۳ ۳۶
- شکل ۳-۲۳- کنترل مقطع تونل برای بررسی پایداری پوشش اولیه در دیواره تونل برای سیستم نگهداری شماره ۳ ۳۶
- شکل ۳-۲۴- کنترل مقطع تونل برای بررسی پایداری پوشش اولیه در کف تونل برای سیستم نگهداری شماره ۳ ۳۶
- شکل ۴-۱- تقاطع بین M_1 و M_2 ۴۹
- شکل ۴-۲- نمودار تحلیل سلسه مراتبی انتخاب سیستم نگهداری بهینه ۵۱
- شکل ۴-۳- نمودار میله‌ای وزن گزینه‌ها نسبت به معیار هزینه ۵۸
- شکل ۴-۴- نمودار میله‌ای وزن گزینه‌ها نسبت به معیار ضریب اطمینان ۵۸
- شکل ۴-۵- نمودار میله‌ای وزن گزینه‌ها نسبت به معیار کارایی ۵۹
- شکل ۴-۶- نمودار میله‌ای وزن گزینه‌ها نسبت به معیار زمان ۵۹
- شکل ۴-۷- نمودار میله‌ای وزن گزینه‌ها نسبت به معیار جابه‌جایی ۵۹
- شکل ۴-۸- نمودار میله‌ای وزن گزینه‌ها نسبت به معیار مکانیزاسیون ۵۹

- شکل ۵-۱- انواع ابهامات ۶۳
- شکل ۵-۲- تعریف احتمال شکست از نقطه نظر ریاضی ۶۶
- شکل ۵-۳- رابطه‌ی تقریبی بین کرنش و گسترش تونل در سنگ‌های مچاله شونده ۶۷
- شکل ۵-۴- توزیع نمایی مدول الاستیسته ۶۹
- شکل ۵-۵- توزیع نرمال زاویه اصطکاک ۶۹
- شکل ۵-۶- توزیع لوگ نرمال مقاومت فشاری تک محوره ۶۹
- شکل ۵-۷- توزیع نرمال تنش برجا ۶۹
- شکل ۵-۸- توزیع لوگ نرمال نسبت پوسان ۷۰
- شکل ۵-۹- مدل اولیه تونل در نرم افزار Rocsupport قبل از نصب سیستم نگهداری ۷۱
- شکل ۵-۱۰- تغییر زون پلاستیک بعد نصب سیستم نگهداری ۷۲
- شکل ۵-۱۱- منحنی مشخصه زمین بعد از نصب سیستم نگهداری ۷۲
- شکل ۵-۱۲- نمودار تابع توزیع احتمال ضریب اطمینان ۷۳
- شکل ۵-۱۳- نمودار احتمال تجمعی ضریب اطمینان ۷۳

فصل اول

مقدمه

۱-۱- ضرورت طراحی سیستم نگهداری برای سازه‌های زیرزمینی

با توجه به توسعه روز افزون سازه‌های زیرزمینی، کاربری‌های متعدد آن‌ها، هزینه‌های فراوانی که برای ساخت هر یک از این سازه‌ها صرف می‌شود و نیز اهمیت آن‌ها در شبکه حمل و نقل بین شهری و داخل شهری و با در نظر گرفتن خطراتی که در صورت آسیب دیدگی آن‌ها متوجه جان مردم می‌شود، لازم است که مقاومت این سازه‌ها در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی مورد بررسی قرار گیرد. بخش نخست از طراحی یک سازه زیرزمینی طراحی استاتیکی است. پایدارسازی در برابر بارهای استاتیکی ناشی از روبراه و نیروهای هیدرواستاتیکی آب مهم‌ترین فاکتور در بخش نخست طراحی است. طراحی استاتیکی سازه‌های زیرزمینی متناسب با شرایط محیطی در برخی موارد به‌خصوص در شرایط آبدار پیچیده و مشکل می‌باشد. از جمله مشکلات می‌توان به سختی کار برای پرسنل و در برخی مواقع توقف کامل عملیات اشاره کرد.

از طرفی طراحی یک سازه زیرزمینی باید به نحوی انجام شود که ضمن تامین نیازهای کاربر، پایداری و ایمنی فضای زیرزمینی در طول دوره احداث و پس از آن تامین شود و عملکرد سازه زیرزمینی همان گونه باشد که از آن انتظار می‌رود.

طراحی و ساخت تونل در محیط‌های متفاوت به روش و روندی نیاز دارد که از خیلی جهات با طراحی و اجرای دیگر پروژه‌ها متفاوت است، چرا که به جای مصالح معمولی مهندسی، توده سنگ خود، از مصالح اصلی است. طبیعتاً نوعی عدم قطعیت در برخی خواص سنگ و آب زیرزمینی وجود دارد. به منظور مقابله با این عدم قطعیت‌ها، لازم است طراحی درست و انعطاف‌پذیری انجام شود و در اجرا نیز ایمنی

کامل رعایت شود. از طرفی مهندسان بارها با موقعیت‌هایی برخورد کرده‌اند که باید از میان گزینه‌های موجود، گزینه مناسب را انتخاب کنند. گزینه مناسب می‌تواند توسط تجربیات مهندسان با توجه به قوانین موجود انتخاب شود. با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری می‌توان با درجه اطمینان بالاتری گزینه مناسب را انتخاب کرد (Yavuz et al, 2007). فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی یا (FAHP)¹ یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است که از ساختار مقایسه زوجی استفاده می‌کند که می‌تواند در این زمینه کارگشا باشد.

هدف از این تحقیق ارائه یک سیستم نگهداری مناسب با توجه به معیارهای موثر در انتخاب سیستم نگهداری تونل است. که در نهایت به توان یک سیستم نگهداری ارائه کرد که هم از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد هم ایمنی لازم را تامین کند.

۱-۲- مراحل انجام تحقیق

تونل انتقال آب بهشت آباد یکی از بزرگترین پروژه‌های آبرسانی است که با هدف انتقال آب به فلات مرکزی ایران در حال احداث می‌باشد. این تونل با راستای شمال شرقی-جنوب غربی در نزدیکی شهر اردل واقع شده است. از ورودی تونل تا حوالی کیلومتر ۱۷ مسیر تونل در زون زاگرس رورانده و از آن پس تا خروجی، تونل در زون سنندج-سیرجان قرار می‌گیرد. هدف از این طرح انتقال آب بهشت آباد با آورد سالانه ۱۰۷۰ میلیون مترمکعب برای رفع کمبودهای آبی در بخش‌های شرب، صنعتی و کشاورزی در فلات مرکزی ایران است. در این تحقیق برای مدل کردن تونل و تحلیل استاتیکی آن با توجه به پیوسته بودن محیط از نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ استفاده شده است. فعالیت‌های این تحقیق از شش مرحله اصلی که در شکل (۱-۱) نشان داده شده تشکیل شده است. در اولین مرحله طی یک جستجوی گسترده کتابخانه‌ای، منابع داخلی و خارجی در دسترس گردآوری شده تا زمینه علمی لازم برای انجام تحقیق فراهم شود.

¹ Fuzzy analytical Hierarchy Process

در مرحله دوم که فصل دوم این پایان نامه را در بر می گیرد ضمن معرفی ساختگاه تونل انتقال آب بهشت آباد، جانمایی مجموعه و زمین شناسی ساختگاه تونل، مشخصات ژئومکانیکی و هیدروژئولوژیکی منطقه مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل سوم پایان نامه به طراحی سیستم نگهداری اولیه و تحلیل استاتیکی آن پرداخته شده است. در این فصل با استفاده از روش همگرایی- همجواری و رسم منحنی مشخصه زمین با کمک نرم افزار $FLAC^{2D}$ و اعمال ترخیص تنش در مدل معادل با همگرایی به وجود آمده تا لحظه استقرار پوشش، سیستم های نگهداری اولیه مناسب برای تونل پیشنهاد شده است و در ادامه نیروها و گشتاورهای وارده از روباره به این پوشش مورد بررسی قرار گرفته است.

فصل چهارم پایان نامه به انتخاب سیستم نگهداری بهینه با استفاده از روش های تصمیم گیری چند معیاره اختصاص یافته است. در این فصل ابتدا به طور مختصر روش AHP توضیح و معایب و مزایای آن بررسی شده، سپس روش FAHP معرفی و مراحل انجام روش توضیح داده شده است. در نهایت با استفاده از روش FAHP سیستم نگهداری بهینه انتخاب شده است.

فصل پنجم پایان نامه به تحلیل احتمالاتی پایداری تونل اختصاص یافته است. در این فصل ابتدا از کلیاتی در مورد منابع ابهام در روش های ژئوتکنیکی سخن گفته شده است. سپس با استفاده از نرم افزار Crystal Ball نمودارهای توزیع متغیرهای ورودی رسم و در نهایت با استفاده از نرم افزار Rocsupport، احتمال شکست و قابلیت اعتماد سیستم نگهداری بهینه برای کل مسیر تونل مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل ششم این پایان نامه ضمن جمع بندی و نتیجه گیری تحلیل های استاتیکی، انتخاب سیستم نگهداری بهینه و تحلیل احتمالاتی پایداری تونل انتقال آب بهشت آباد، پیشنهاداتی برای مطالعات بعدی ارائه شده است.



شکل ۱-۱ - مراحل انجام تحقیق و ساختار پایان نامه

فصل دوم

معرفی ساختگاه تونل انتقال آب بهشت آباد

۲-۱- مقدمه

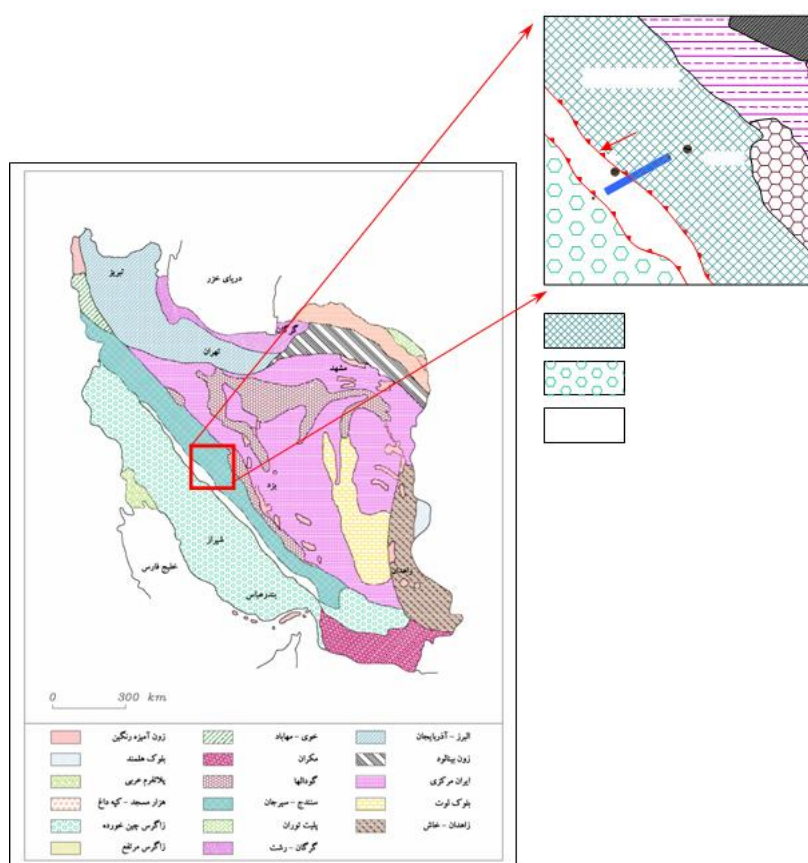
تونل انتقال آب بهشت آباد به طول تقریبی ۶۵ کیلومتر و قطر ۶ متر با مقطع نعل اسبی یکی از بزرگترین پروژه‌های آبرسانی که با هدف انتقال آب به فلات مرکزی ایران در حال احداث است. این تونل با راستای شمال شرقی-جنوب غربی در نزدیکی شهر اردل (شهرستان اردل در ۹۰ کیلومتری مرکز چهارمحال و بختیاری می باشد) واقع شده است (شکل ۲-۱). از ورودی تونل تا حوالی کیلومتر ۱۷ مسیر تونل در زون زاگرس رورانده و از آن پس تا خروجی تونل در زون سنندج-سیرجان قرار می‌گیرد. هدف از طرح، انتقال آب با آورد سالانه ۱۰۷۰ میلیون مترمکعب برای رفع کمبودهای آبی در بخش‌های شرب، صنعتی و کشاورزی به فلات مرکزی ایران می‌باشد (هاشمی، ۱۳۸۶).



شکل ۲-۱- موقعیت جغرافیای رودخانه بهشت آباد (هاشمی، ۱۳۸۶)

گستره ساختگاه تونل انتقال آب به فلات مرکزی ایران در پهنه‌بندی زمین‌شناسی ایران در بخش

کوهزاد زاگرس واقع است. تراست اصلی زاگرس در اغلب پهنه‌بندی‌های انجام شده در زمین‌شناسی ایران به عنوان مرز بین پهنه سنندج- سیرجان و زاگرس رورانده معرفی شده است. بدین ترتیب از ورودی تونل تا حوالی کیلومتر ۱۷، مسیر تونل در پهنه زاگرس رورانده و از آن پس تا خروجی تونل در پهنه سنندج- سیرجان قرار می‌گیرد. در شکل (۲-۲) ساختگاه تونل انتقال بر روی نقشه پهنه‌بندی زمین‌شناسی ایران نمایش داده شده است (هاشمی، ۱۳۸۶).



شکل ۲-۲- نقشه پهنه‌بندی زمین‌شناسی ایران و موقعیت تونل (هاشمی، ۱۳۸۶)

۲-۲- زمین ریخت‌شناسی

گستره مسیر تونل بهشت‌آباد از نظر زمین‌ریختی عمدتاً در مناطق کوهستانی بلند با دشت‌های محصور میان‌کوهی قرار گرفته است. پست‌ترین نقطه ارتفاعی در این گستره در بخش ورودی تونل است. این نقطه در خروجی تنگ درکش ورکش در نزدیکی پل بهشت‌آباد، حدود ۱۶۸۰ متر از سطح دریا بلندتر است. این در حالی است که مرتفع‌ترین نقطه در مسیر تونل انتقال، در کوه هزار قرار گرفته و حدود

۲۹۷۰ متر از سطح دریا بلندا دارد. بدین ترتیب بیشترین میزان اختلاف ارتفاع، در گستره مورد مطالعه در حدود ۱۲۹۰ متر می‌باشد. اغلب پدیده‌ها و واحدهای ژئومورفیک تحت تأثیر عامل اصلی به وجود آورنده خود (کوهزاد زاگرس) امتداد شمال غربی- جنوب شرقی دارند. این روند، تقریباً عمود بر مسیر تونل است. به واسطه‌ی گستردگی منطقه مورد مطالعه، انواع تیپ‌های زمین‌ریختی در آن قابل شناسایی است. کوه‌های مرتفع با دامنه‌های پرشیب و نامنظم، در کنار کوه‌های کم ارتفاع با دامنه‌های محدب کم شیب و دشت‌های محصور میان کوهی نمودهایی از تنوع زمین ریختی منطقه هستند. تکتونیک به عنوان عامل ایجاد کننده و فرسایش به عنوان عامل تغییر دهنده، مهمترین پارامترهای تاثیرگذار در ریخت منطقه هستند (هاشمی، ۱۳۸۶).

۲-۳- زمین شناسی مهندسی

برای شناسایی دقیق سنگ بستر تونل انتقال آب، عملیات زیر در قالب مطالعات فاز یک انجام شده است:

- حفر ۲۱ گمانه اکتشافی در بخش‌های مختلف مسیر با مغزه‌گیری پیوسته تا عمق حداکثر ۷۱۵ متر.
- انجام آزمایش‌های نفوذپذیری و بار نقطه‌ای
- انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی مورد نیاز
- مطالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع نازک
- انجام بررسی‌های ژئوفیزیکی

۲-۳-۱- پهنه بندی تونل

در این بخش مسیر تونل، به ۲۹ پهنه تقسیم شده است که موقعیت، ارتفاع روباره، سنگ‌شناسی، زمین‌ساخت، هیدرولوژی و ملاحظات مهندسی در هر یک از این پهنه‌ها در جدول (۲-۱) درج شده است.

جدول ۱-۲- وضعیت پهنه‌های مختلف زمین‌شناسی در مسیر انتقال آب (هاشمی، ۱۳۸۶)

پهنه اول	موقعیت	دامنه جنوب غربی کوه خرسی
	ارتفاع روباره (m)	بین صفر تا ۱۷۰ متر
	سنگ‌شناسی	آهک ضخیم لایه تا توده‌ای
	زمین ساخت	این بخش تحت تأثیر گسل اصلی اردل و شاخه‌های فرعی آن قرار دارد، بنابراین سنگ‌ها خردشده و بلوکی هستند شیب لایه‌ها به علت تکتونیزه بودن آن‌ها کاملاً مشخص نیست. لیکن شیب عمومی لایه‌ها بین ۲۰ تا ۸۰ درجه به سمت جنوب غرب (ورودی تونل) می‌باشد.
	هیدرولوژی	سطح آب زیرزمینی پائین‌تر از رقوم تونل است. لیکن با توجه به نزدیکی به مخزن سد، پس از آبگیری، سطح آب زیرزمینی معادل ارتفاع آب در دریاچه سد خواهد بود.
	ملاحظات مهندسی	خردشدگی سنگ‌ها، تأثیر فعالیت گسل اردل و اشباع شدن توده سنگ اطراف تونل پس از آبگیری مخزن
پهنه دوم	موقعیت	کوه سوخته
	ارتفاع روباره (m)	بین ۱۷۰ تا ۳۷۰ متر
	سنگ‌شناسی	آهک و آهک مارنی متوسط تا نازک لایه با میان لایه‌های شیل و لنزهای چرت
	زمین ساخت	گسل‌های مهم A ₂ با ۲۰ متر، A ₃ با ۱۰ متر و A ₅ با ۱۰ متر زون تحت تأثیر در این پهنه قرار گرفته‌اند. شیب عمومی لایه‌ها به سمت ورودی تونل می‌باشد. شیب گسل‌ها معمولاً زیاد و نزدیک به قائم است.
	هیدرولوژی	سطح آب زیرزمینی پائین‌تر از رقوم تونل است. لیکن با توجه به نزدیکی به مخزن سد، پس از آبگیری، سطح آب زیرزمینی معادل ارتفاع آب در دریاچه سد خواهد بود.
	ملاحظات مهندسی	خردشدگی و ناپایداری سنگ در مقطع حفاری به ویژه در زون‌های گسلی تأثیر فعالیت گسل اردل، اشباع شدن توده سنگ اطراف تونل بعد از آبگیری مخزن و افزایش ناگهانی فشار آب در این لایه پس از بارندگی‌های سریع
پهنه سوم	موقعیت	منطقه زیر سایه
	ارتفاع روباره (m)	بین ۱۳۰ تا ۳۵۰ متر
	سنگ‌شناسی	آهک‌ها و دولومیت‌های ضخیم لایه تا توده‌ای
	زمین ساخت	در این منطقه هر چند گسل‌های مهمی نظیر A ₆ , A ₇ , A ₈ در مسیر تونل انتقال قرار دارند، لیکن لایه‌بندی‌ها دارای انتظام بیشتری است و به غیر از مناطق گسله، سنگ بستر از وضعیت مطلوبی برخوردار است. لایه‌ها در بیشتر طول پهنه تقریباً افقی هستند.
	هیدرولوژی	تحت تأثیر گسل‌های مذکور، در سنگ‌های پوشاننده این واحد کارست توسعه یافته است. سطح آب زیرزمینی در ناحیه بالاتر از رقوم تونل است
	ملاحظات مهندسی	خردشدگی و ناپایداری سنگ در بخش‌های گسله.

ادامه جدول (۱-۲)

تهنه چهارم	موقعیت	کوه سوخته
	ارتفاع روباره (m)	بین ۳۳۰ تا ۹۲۰ متر، روباره به سمت خروجی افزایش می‌یابد.
	سنگ‌شناسی	آهک، آهک مارنی متوسط تا نازک لایه، با میان لایه‌های شیل و لنزهای چرت
	زمین ساخت	لایه‌ها نسبت به پهنه‌های قبلی از نظم زمین‌شناسی بیشتری برخوردارند و گسل‌ها توسعه کمتری یافته‌اند. شیب لایه‌ها در این بخش بین ۲۵ تا ۳۵ درجه به سمت خروجی تونل (در جهت حفاری) در تغییر است.
	هیدرولوژی	سطح آب زیرزمینی در این بخش بالاتر از رقوم تونل است. نفوذپذیری به غیر از مناطق خردشده گسلی پایین و کارست در آن توسعه چندانی ندارد.
	ملاحظات مهندسی	ناپایداری موضعی در مناطق گسله، وجود لایه‌های مارنی و بین لایه‌های شیلی بیتومینه که احتمال تورم و یا همگرایی تونل را افزایش می‌دهد.
تهنه پنجم	موقعیت	کوه هزارگری
	ارتفاع روباره (m)	بین ۶۳۰ تا ۱۲۴۰ متر
	سنگ‌شناسی	آهک ضخیم لایه تا توده‌ای همراه با ندول‌های چرت در برخی قسمت‌ها
	زمین ساخت	به صورت موضعی توسط گسل‌های کم تعداد بریده و جابه‌جا شده است. پهنه تحت تأثیر گسل‌ها کمتر از ۲۰ متر است. شیب لایه‌ها بین ۲۵ تا ۴۰ درجه در جهت پیشروی حفاری (به سمت خروجی) می‌باشد.
	هیدرولوژی	در بخش‌های مختلف کوه سوخته و به ویژه در امتداد شکستگی‌ها، آثار انحلالی به وفور دیده می‌شوند. سطح آب زیرزمینی در این ناحیه حدود ۴۰ تا ۱۰۰ متر بالاتر از رقوم تونل است.
	ملاحظات مهندسی	وجود ناپایداری موضعی در نواحی گسله، احتمال هجوم آب به ویژه در نواحی گسلی، احتمال رخداد پدیده ترکیدگی سنگ در روباره‌های بالا و احتمال وجود گاز در مقطع حفاری.
تهنه ششم	موقعیت	کوه هزارگری
	ارتفاع روباره (m)	۱۲۴۰ تا ۱۱۸۰ متر
	سنگ‌شناسی	تناوبی از کنگلومرا، ماسه سنگ و سیلتستون با سیمان سیلیسی و آهکی و بین لایه‌ها و عدسی‌هایی از مارن
	زمین ساخت	درزه‌های سیستماتیک باعث بلوکی شدن کنگلومرا در سطح زمین شده است.
	هیدرولوژی	نفوذپذیری این واحد به علت سیمان سیلیسی-آهکی و وجود بین لایه‌های مارنی چندان زیاد نیست، لیکن وجود درزه‌های متعدد در سنگ، رفتار آب زیرزمینی در آن را با لایه‌های آهکی مجاورش مشابه ساخته است.
	ملاحظات مهندسی	با توجه به روباره زیاد لهیدگی، به ویژه در بین لایه‌های مارنی دور از انتظار نیست.

ادامه جدول (۲-۱)

پهنه هفتم	موقعیت	کوه هزارگری
	ارتفاع روباره (m)	۱۱۸۰ تا ۳۷۰ متر، روباره به سمت خروجی کاهش می‌یابد.
	سنگ‌شناسی	در این قسمت به دلیل چین‌خوردگی واحدها، به تناوب آهک و دولومیت‌های نازک تا متوسط لایه جهرم و آهک و آهک مارنی متوسط تا ضخیم لایه آسماری در تونل رخنمون می‌یابد.
	هیدرولوژی	خش‌های آهکی سازند آسماری، استعداد فراوانی جهت انحلال و توسعه پدیده کارست دارند. شرایط مذکور به علاوه ویژگی‌های اقلیمی منطقه، توسعه کارست را در این واحد سنگی باعث شده است.
پهنه هشتم	ملاحظات مهندسی	احتمال ناپایداری و هجوم آب به ویژه در بخش‌های گسلی
	موقعیت	روستای سلم
	ارتفاع روباره (m)	۳۱۰ تا ۳۶۰ متر، روباره به سمت خروجی کاهش می‌یابد.
	سنگ‌شناسی	مارلستون و مارن آهکی ضخیم لایه با بین لایه‌هایی از آهک مارنی و لوماشل
	زمین ساخت	شیب لایه‌ها در ابتدای پهنه (از سمت ورودی) هم جهت با حفاری و در انتهای آن مخالف با جهت حفاری است. چین‌خوردگی فرعی و گسل‌های پراکنده در این واحد دیده می‌شود.
	ملاحظات مهندسی	احتمال وقوع پدیده تورم و همگرایی تونل، به ویژه در مناطق خرد شده و بخش‌هایی که میزان رس در ترکیب سنگ افزایش یافته است. احتمال هجوم آب‌های تحت فشار موجود در آهک‌های آسماری از طریق درزه و شکستگی‌های موجود در مارن‌ها
پهنه نهم	موقعیت	روستای سلم
	ارتفاع روباره (m)	حدود ۳۱۰ متر
	سنگ‌شناسی	آهک‌ها و آهک‌های مارنی متوسط تا ضخیم لایه آسماری
	زمین ساخت	طاقدیس سلم و گسل‌های پس‌رانده در بخش انتهایی پهنه، فرم ساختاری این ناحیه را شکل داده‌اند.
	هیدرولوژی	ضور چشمه دائمی سلم با دبی متوسط یک مترمکعب بر ثانیه نشان‌دهنده ارتباط هیدرولیکی این توده آهکی با آهک‌های کوه هزارگری است. بنابراین کلیه شرایط هیدروژئولوژیکی پهنه هفتم را برای این قسمت نیز می‌توان صادق دانست.
	ملاحظات مهندسی	احتمال هجوم آب به مقطع حفاری به ویژه در پهنه‌های خرد شده و از جمله پهنه گسله

ادامه جدول (۲-۱)

پهنه دهم	موقعیت	دشت کیار و شلمزار
	ارتفاع روباره (m)	۲۸۰ متر
	سنگ‌شناسی	مارلستون و مارن آهکی ضخیم لایه باین لایه‌هایی از آهک مارنی و لوماشل
	زمین ساخت	تحت تأثیر تنش‌های طولانی مدت، نهشته‌های تغییر شکل‌پذیر، چین‌خورده و یا توسط گسل‌های مدفون و کور جابجا شده‌اند.
	هیدرولوژی	سطح ایستابی در این ناحیه نزدیک به سطح زمین است، لیکن به دلیل نفوذپذیری پائین نهشته‌های مارنی، هجوم آب به داخل تونل دور از انتظار بوده و صرفاً نشت‌های جزئی از مناطق گسله محتمل خواهد بود.
پهنه یازدهم	ملاحظات مهندسی	احتمال ناپایداری و نشت آب در مناطق گسله، احتمال تورم و یا همگرایی قابل توجه، به ویژه در بخش‌هایی که رس بیشتری در ترکیب سنگ وجود دارد.
	موقعیت	ساحل راست رودخانه کیار
	ارتفاع روباره (m)	۳۰۰ تا ۳۷۰ متر
	سنگ‌شناسی	ماسه سنگ، مادستون، سیلستون و کنگلومرا با سیمان آهکی نسبتاً سخت، معادل سازند بختیاری
	زمین ساخت	به صورت یک چین تک شیب (شیب ۳۰ تا ۴۰ درجه به سمت خروجی و هم جهت با حفاری) با گسل‌های فرعی و کوچک مقیاس و درزه‌های پراکنده
پهنه دوازدهم	هیدرولوژی	در این منطقه، مسیر تونل در زیر سطح ایستابی قرار دارد.
	ملاحظات مهندسی	احتمال ناپایداری و ریزش‌ها، جزئی و پراکنده در مناطقی که سیمان‌شدگی ضعیفی وجود دارد. تراوش و نشت آب در مسیر تونل و احتمال حضور آب در کنتاکت‌ها و مناطق گسله.
	موقعیت	دشت شلمزار و کیار
	ارتفاع روباره (m)	بین ۳۰۰ تا ۴۳۰ متر
	سنگ‌شناسی	مادستون، سیلستون با بین لایه‌هایی از ماسه سنگ و کنگلومرا
پهنه دوازدهم	زمین ساخت	فرم ساختاری اصلی این ناحیه یک ناودیس باز با چین‌خوردگی‌های کوچک فرعی در درون ناودیس اصلی می‌باشد. پوشیده شدن منطقه توسط آبرفت‌های عهد حاضر تعیین دقیق ساختارها را با مشکل مواجه ساخته است.
	هیدرولوژی	سطح آب زیرزمینی در این پهنه در عمق حدود ۴۰ متری سطح زمین قرار دارد و بخش اعظم آبرفت ضخیم دشت از آب اشباع است. بخش اعظم این پهنه که از مادستون و سیلستون تشکیل شده‌اند، دارای نفوذپذیری پائینی هستند.
	ملاحظات مهندسی	احتمال ایجاد پدیده‌ی لهیدگی در بخش‌های دارای رس بیشتر و با روباره زیاد، احتمال زه‌کشی آبرفت سطحی توسط بین لایه‌های کنگلومرایی

ادامه جدول (۲-۱)

پهنه سیزدهم	موقعیت	دامنه جنوب غربی کوه جهان‌بین
	ارتفاع روباره (m)	۴۲۰ تا ۵۱۰ متر
	سنگ‌شناسی	بازالت‌های خرد شده و هوازده که برخی قسمت‌ها تحت تأثیر دگرسانی به سرپانتینیت تبدیل شده‌اند.
	زمین ساخت	ابتدای پهنه گسله اصلی زاگرس است که تحت تأثیر این گسله سنگ‌ها به شدت خرد شده و هوازده شده‌اند.
	هیدرولوژی	هوازده‌گی و آلتراسیون سنگ‌ها و تبدیل آن‌ها به سرپانتینیت باعث کاهش نفوذپذیری آن‌ها شده است. بنابراین با وجود بالا بودن سطح آب زیرزمینی در این ناحیه، احتمال حضور آب قابل توجه در این بخش از تونل بسیار ضعیف است.
	ملاحظات مهندسی	مشکلات حین حفاری با توجه به ریزش‌های محتمل و وجود پدیده لهیدگی و احتمال هجوم آب در کنتاکت این واحد با واحدهای آهکی دوران دوم.
پهنه چهاردهم	موقعیت	دامنه جنوب غربی کوه جهان‌بین
	ارتفاع روباره (m)	۵۱۰ تا ۶۲۰ متر
	سنگ‌شناسی	آهک، آهک مارنی و شیل درهم ریخته و خرد شده، در برخی قسمت‌ها برش گسلی متشکل از قطعات آهک و کنگلومرا
	زمین ساخت	درزه، شکستگی و خردشدگی بسیار زیاد. در برخی قسمت‌ها تغییرات در حد تشکیل گوژ گسلی و میلونیتی شدن دیده می‌شود.
	هیدرولوژی	سطح آب زیرزمینی در این ناحیه بالا است، لیکن نفوذپذیری این بخش به علت توسعه گوژ و میلونیتی شدن بالا نیست.
	ملاحظات مهندسی	احتمال حضور آب در کنتاکت این پهنه با آهک‌های مارنی، احتمال وجود ریزش حین حفاری در مقطع تونل
پهنه پانزدهم	موقعیت	دره دولاخور
	ارتفاع روباره (m)	۴۶۰ تا ۷۵۰ متر
	سنگ‌شناسی	تناوب درهم ریخته‌ای از آهک، آهک مارنی، آهک کرین‌دار، مارن و شیل
	زمین ساخت	این پهنه از چندین ورقه رانده تشکیل شده که نهشته‌های متناوب کریناته را بر روی هم رانده است و باعث پیچیدگی بیشتر این ناحیه از نظر زمین‌شناسی شده است.
	هیدرولوژی	در این پهنه با توجه به وجود ریزش‌های جوی زیاد و بالا بودن سطح آب زیرزمینی احتمال هجوم آب به داخل تونل در بخش‌های گسله وجود دارد.
	ملاحظات مهندسی	احتمال ریزش حین حفاری در بخش‌های گسله، احتمال هجوم آب همراه با گل و لای و احتمال رخداد پدیده لهیدگی در نهشته‌های تغییر شکل پذیر شیلی و مارنی

ادامه جدول (۱-۲)

پهنه شانزدهم	موقعیت	کوه جهان‌بین
	ارتفاع روباره (m)	۳۷۰ تا ۴۴۰ متر، روباره به سمت خروجی کاهش می‌یابد. در این قسمت با ایجاد شکستگی در مسیر تونل، میزان روباره نسبت به گزینه قبلی در حدود ۶۰۰ متر کاهش یافته است.
	سنگ‌شناسی	در این پهنه در سطح زمین آهک‌های سفید شیری با استعداد کارستی شدن نسبتاً بالا قرار گرفته است.
	زمین ساخت	ریز گسل‌های متعدد در جهات مختلف لایه‌ها را بریده و جابجا کرده‌اند.
	هیدرولوژی	سطح آب زیرزمینی در این بخش حدود ۳۰۰ متر از رقوم تونل بالاتر است.
	ملاحظات مهندسی	احتمال ریزش در بخش‌های گسله، احتمال رخداد پدیده لهیدگی در نهشته‌های تغییر شکل‌پذیر شیلی و مارنی.
پهنه هفدهم	موقعیت	تنگ خراجی
	ارتفاع روباره (m)	بین ۳۰۰ تا ۴۴۰ متر
	سنگ‌شناسی	آهک مارنی، اسلیتی و بعضاً شیلی با بین لایه‌هایی از آهک کربن‌دار و آهک ماسه‌ای
	زمین ساخت	گسل ۷ در حوالی از جمله گسل‌های مهم منطقه است.
	هیدرولوژی	سطح آب زیرزمینی در این پهنه نزدیک به سطح زمین است. به علت نفوذپذیری کم سنگ بستر احتمال نشت آب به تونل فقط در نواحی گسله و بخش‌های آهکی قابل توجه می‌باشد.
	ملاحظات مهندسی	احتمال ناپایداری و ریزش به ویژه در بخش‌های گسلی، احتمال تورم در بخش‌های مارنی و درزه‌هایی که با رس گرافیتی پر شده‌اند.
پهنه هجدهم	موقعیت	کوه نثار
	ارتفاع روباره (m)	۳۹۰ تا ۶۸۰
	سنگ‌شناسی	تناوب آهک مارنی اسلیتی، بین لایه‌های آهک ماسه‌ای و آهک کربن‌دار
	زمین ساخت	تنش‌های شدید و درازمدت ناشی از کوهزاد زاگرس نهشته‌های تغییر شکل‌پذیر این ناحیه را تحت تأثیر خود قرار داده‌اند.
	هیدرولوژی	سطح آب زیرزمینی در این ناحیه بالاست، لیکن به علت نفوذپذیری کم سنگ بستر احتمال هجوم آب به مقطع حفاری در این پهنه ضعیف می‌باشد.
	ملاحظات مهندسی	احتمال ناپایداری و ریزش به ویژه در زون‌های شدیداً تغییر شکل یافته

ادامه جدول (۲-۱)

پهنه نوزدهم	موقعیت	کوه نसार
	ارتفاع روباره (m)	۴۸۰ تا ۷۹۰ متر
	سنگ‌شناسی	شامل تناوب درهم ریخته‌ای از آهک مارنی، آهک ماسه‌ای سیلیس‌دار، ماسه سنگ با سیمان کربناته.
	زمین ساخت	این پهنه نیز از نظر زمین‌شناسی مشابه پهنه قبلی می‌باشد، با این تفاوت که میزان دگر ریختی‌ها و تغییرات ساختاری در این زون شدیدتر است.
پهنه بیستم	ملاحظات مهندسی	احتمال ناپایداری و ریزش به ویژه در بخش‌های دارای خردشدگی بالا (نواحی گسله) و وجود پدیده لهیدگی در مناطق دارای روباره بالا.
	موقعیت	کوه نसार
	ارتفاع روباره (m)	۴۶۰ تا ۴۷۰ متر
	سنگ‌شناسی	آهک‌ها و آهک‌های دولومیتی ضخیم لایه تا توده‌ای با رگه‌های کلیستی فراوان و بین لایه‌هایی از آهک شیلی و آهک ماسه‌ای
پهنه بیست و یکم	هیدرولوژی	محدود بودن رخنمون‌های سطحی و جابجایی لایه آهکی توسط گسل‌های متعدد، امکان تشکیل یک آب خوان گسترده در این آهک‌ها را کاهش داده است.
	ملاحظات مهندسی	احتمال ناپایداری و ریزش در بخش‌های خرد شده گسلی و بین لایه‌های شیلی
	موقعیت	کوه نसार و دشت فرخ‌شهر
	ارتفاع روباره (m)	۴۶۰ متر
پهنه بیست و دوم	سنگ‌شناسی	ماسه سنگ، آهک مارنی، آهک کربن‌دار کمی دگرگون شده
	زمین ساخت	شبه پهنه نوزدهم
	هیدرولوژی	با توجه به نفوذپذیری پائین سنگ بستر، احتمال حضور آب در رقوم تونل زیاد نیست.
	ملاحظات مهندسی	احتمال ناپایداری و ریزش به ویژه در مناطق خرد شده، احتمال وقوع پدیده لهیدگی و احتمال وجود گازهای خطرناک.
پهنه بیست و سوم	موقعیت	دشت فرخ‌شهر و ارتفاعات تنگ صیاد
	ارتفاع روباره (m)	۴۷۰ تا ۸۴۰ متر
	سنگ‌شناسی	مارن آهکی و آهک مارنی متوسط تا ضخیم لایه، اسلیتی درزه‌دار و گسله با بین لایه‌هایی از آهک ماسه‌ای
	زمین ساخت	چین‌های کوچک مقیاس که توسط گسل‌های اصلی و فرعی بریده شده‌اند.
	هیدرولوژی	با توجه به پایین بودن نفوذپذیری سنگ وضعیت آب زیرزمینی در این پهنه بحرانی نیست.
پهنه بیست و چهارم	ملاحظات مهندسی	احتمال ناپایداری و ریزش در زون‌های خرد شده گسلی، احتمال رخداد پدیده‌های لهیدگی و تورم در بخش‌های مارنی و احتمال زهکشی آب به سمت تونل در بخش‌های گسله و بین لایه‌های آهکی

ادامه جدول (۲-۱)

پهنه بیست و سوم	موقعیت	کوه تنگ صیاد
	ارتفاع روباره (m)	۴۸۰ تا ۶۲۰ متر
	سنگ‌شناسی	آهک‌های رس‌دار و کربن‌دار توده‌ای و سخت
	زمین ساخت	آهک‌های این ناحیه درزه‌دار بوده و گسل‌های اصلی و فرعی به صورت پراکنده در آنها دیده می‌شود.
	هیدرولوژی	با توجه به درزه‌داری و وجود شکستگی‌های پراکنده در آهک‌های این ناحیه تشکیل یک آب‌خوان در این آهک‌ها را نمی‌توان از نظر دور داشت
	ملاحظات مهندسی	احتمال هجوم آب بر مقطع تونل از طریق شکستگی‌ها و احتمال ناپایداری در زون‌های خرد شده گسلی
پهنه بیستم و چهارم	موقعیت	دشت‌های زردریا (جاده شهرکرد- بروجن)
	ارتفاع روباره (m)	۴۸۰ تا ۵۵۰ متر
	سنگ‌شناسی	مارن سنگ و آهک مارنی اسلیتی با میان لایه‌های آهک
	زمین ساخت	تحت تأثیر تنش‌های وارده، بخش زیادی از سنگ‌ها ساختار اسلیتی یافته‌اند
	هیدرولوژی	سطح آب زیرزمینی در این ناحیه نزدیک به سطح زمین می‌باشد. لیکن آب‌گذری پایین سنگ‌های مارنی و ضخامت زیاد آنها تا رقوم تونل احتمال زهکشی آب به سمت تونل را کاهش می‌دهد.
	ملاحظات مهندسی	احتمال ناپایداری و ریزش در بخش‌های گسله، احتمال زهکشی آب به داخل تونل در پهنه‌های گسله.
پهنه بیست و پنجم	موقعیت	دشت زردریا (جاده شهرکرد- بروجن)
	ارتفاع روباره (m)	۵۴۰ تا ۶۰۰ متر
	سنگ‌شناسی	این پهنه شامل بخش خرد شده و درهم ریخته دشت زردریا است
	زمین ساخت	گسل‌های R_1 و R_2 و شکستگی‌های حد فاصل آنها، جابجایی و درهم ریختگی قابل توجهی را در لایه‌های آهکی و مارنی ایجاد نموده است.
	هیدرولوژی	به علت وجود زون‌های خرد شده گسلی و بین لایه‌های آهکی احتمال زهکشی آب به داخل تونل وجود دارد.
	ملاحظات مهندسی	احتمال ناپایداری و ریزش، احتمال زهکشی آب به داخل تونل
پهنه بیست و ششم	موقعیت	کوه تخت شاه‌لرا
	ارتفاع روباره (m)	۵۳۰ تا ۱۰۷۰ متر
	سنگ‌شناسی	مارن سنگ آهکی و آهک مارنی متوسط تا ضخیم لایه، با بین لایه‌هایی از آهک
	زمین ساخت	چین‌های مزوسکپیک، گسل‌های فرعی و کم اهمیت
	هیدرولوژی	ترکیب رس‌دار سنگ‌های منطقه امکان تشکیل آب‌خوان‌های کارستی را در این پهنه محدود ساخته است. بنابراین علیرغم بالا بودن سطح آب زیرزمینی در محدوده دشت شولی امکان هجوم آب به داخل تونل چندان زیاد نیست.
	ملاحظات مهندسی	احتمال هجوم آب‌های محبوس به داخل تونل، احتمال وقوع پدیده لهیدگی به ویژه در محدوده زیر کوه شاه‌لرا. حداکثر میزان روباره در این بخش.

ادامه جدول (۲-۱)

پهنه بیست و هفتم	ارتفاعات کوه تخت شاهلرا و دامنه شمال شرق آن	موقعیت
	۶۲۰ تا ۱۰۲۰ متر	ارتفاع روباره (m)
	این ناحیه در واقع زون انتقالی آهک‌های شیلی و مارنی به ولکانیک‌های ژوراسیک می‌باشد.	سنگ‌شناسی
	گسل‌های متعدد در دامنه جنوب غربی این ناحیه در این ناحیه قرار دارد	زمین ساخت
	با توجه به گسله بودن این ناحیه و وجود زون‌های خرد شده متعدد و بالا بودن هد استاتیک آب زیرزمینی در بالادست تونل، احتمال هجوم آب به تونل در این پهنه را نمی‌توان نادیده گرفت.	هیدرولوژی
احتمال ناپایداری و ریزش و احتمال هجوم آب همراه با گل و لای در پهنه‌های گسله	ملاحظات مهندسی	
پهنه بیست و هشتم	دامنه شمال شرقی کوه رخ و دشت چرمهین	موقعیت
	۶۲۰-۹۰ متر	ارتفاع روباره (m)
	شامل توف آندزیتی، آندزیت با بافت بادامکی و دایک‌های آندزیتی	سنگ‌شناسی
	این بخش از پهنه سنندج- سیرجان نیز تحت تأثیر گسل‌های مختلف قرار گرفته است.	زمین ساخت
	سطح آب زیرزمینی در این بخش بالاتر از رقوم تونل است، لیکن به علت نفوذپذیری پایین توده سنگ احتمال هجوم آب در رقوم تونل زیاد نیست. آب خوان اصلی منطقه، آب خوان آبرفتی است که عمدتاً از ارتفاعات آهکی منطقه تغذیه می‌شود.	هیدرولوژی
احتمال ناپایداری و ریزش در زون‌های خرد شده	ملاحظات مهندسی	
پهنه بیست و نهم	جنوب شرق باغ‌بهداران	موقعیت
	صفر الی ۱۱۰ متر	ارتفاع روباره (m)
	تناوبی از ماسه سنگ با سیمان آهکی قوی و شیل	سنگ‌شناسی
	این پهنه نیز مانند سایر نواحی تحت تأثیر تکتونیک پیچیده زون سنندج- سیرجان قرار دارد.	زمین ساخت
	در این پهنه انتظار هجوم آب در رقوم تونل غیر محتمل است. عدم حضور آبرفت‌های رودخانه زاینده‌رود در مسیر حفاری تونل اطمینان بیشتری را در این زمینه ایجاد می‌نماید.	هیدرولوژی
ریزش و ناپایدار بودن بخش‌هایی از تونل و احتمال تورم در برخی قسمت‌ها	ملاحظات مهندسی	

فصل سوم

طراحی انواع سیستم‌های نگهداری و تحلیل
استاتیکی آنها

۳-۱- مقدمه

بر خلاف سنگ‌های مستحکم که مسائل ناپایداری و گسیختگی آنها از طریق مشخصات ساختاری کنترل می‌شود، موارد بسیاری نیز وجود دارد که در آنها تونل‌ها و سازه‌های زیرزمینی در توده سنگ‌هایی اجرا می‌شوند که به علت درزه‌داری بسیار شدید و یا به خاطر ضعیف بودن سنگ بکر، از مقاومت پائینی برخوردار می‌باشند. از جمله مسائل مهم در طراحی و اجرای تونل‌ها در زمین‌هایی با مشخصات ژئومکانیکی پائین، تنش‌زدائی و گسترش بیش از حد ناحیه پلاستیک در بخش فوقانی فضای حفاری شده می‌باشد که ممکن است موجب ریزش شده و قسمت حفاری شده را پر کند. از این رو تعیین میزان پیشروی، زمان اجرای حفاری و نصب پوشش اولیه مناسب از جمله موارد مهم در طراحی این قبیل سازه‌ها می‌باشد که با اجرا و طراحی مناسب می‌توان از بروز حوادث و مشکلات مذکور جلوگیری کرد (کی‌نیا، ۱۳۸۴).

هنگام ساخت فضای زیرزمینی حتی اگر تنش‌های برجا در حد متوسط خود باشند، احتمال بروز گسیختگی ناشی از القای تنش در توده سنگ‌های ضعیف در برگیرنده وجود دارد. گسیختگی از این نوع که بیشتر در توده سنگ‌های ضعیف در برگیرنده یک سازه زیرزمینی رخ می‌دهد، مشکلاتی را از لحاظ طراحی به وجود می‌آورد، به طوری که هم‌اکنون نه تنها هیچ‌گونه مدل ساده عددی برای آن وجود ندارد، بلکه محاسبات دقیق ضریب ایمنی که در طی آن بتوان محدوده مجاز و قابل قبول این گونه فرآیندهای گسیختگی را تعریف کرد، نیز در دسترس نمی‌باشد. قضاوت مهندسی در خصوص کفایت طراحی سیستم نگهداری، باید بر اساس ارزیابی صحیحی از عواملی نظیر بزرگی و توزیع تغییر مکان در سنگ‌ها و همچنین

بزرگی و نحوه توزیع تنش‌ها در المان‌های تشکیل دهنده سیستم نگهداری انجام شود. از آن‌جا که اکثر حفاریات زیرزمینی شکل منظم ندارند و از طرفی تحت تأثیر شرایط محیطی خود می‌باشند، روش‌های فرم بسته^۱ برای محاسبه تنش‌ها، جابه‌جائی‌ها و شکست توده سنگ با محدودیت‌هایی مواجه خواهند شد. خوشبختانه تعدادی از روش‌های عددی در طی چند دهه گذشته توسعه یافته‌اند و این روش‌ها قادر به حل تقریبی این‌گونه مسایل می‌باشند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش تفاضل محدود اشاره کرد (پیوست الف) در این بخش برای طراحی و مدل‌سازی انواع مختلف پوشش اولیه تونل انتقال آب بهشت آباد از روش عددی تفاضل محدود با کمک نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ استفاده شده است.

۳-۲- مدل‌سازی با نرم‌افزار $FLAC^{2D}$

تعیین پوشش اولیه مناسب به منظور حفظ پایداری فضای حفاری شده و کمک به ایجاد تعادل جدید در زمین از جمله موارد مهم در طراحی به‌شمار می‌آید. برای تعیین پوشش اولیه از روش همگرایی-همجواری (پیوست ب) و رسم منحنی مشخصه زمین با کمک نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ استفاده شده است. در مدل‌سازی، ابعاد مدل به اندازه‌ای در نظر گرفته شده است که محدوده تونل تحت اثر ناشی از مرزها قرار نگیرد. تحلیل رفتار پلاستیک مدل با استفاده از مدل موهر-کولمب و برای مدل کردن رفتار پوشش از المان تیر که دارای رفتار ارتجاعی می‌باشد، استفاده شده است. با توجه به اصول مدل‌سازی عددی و همچنین ترتیب عملیات اجرایی، مراحل مدل‌سازی با برنامه $FLAC^{2D}$ به ترتیب زیر صورت گرفته است:

۱- انتخاب محدوده مناسبی از توده سنگ اطراف تونل

۲- انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن

۳- ترسیم هندسه تونل

۴- حل مدل و به تعادل رساندن آن قبل از حفاری

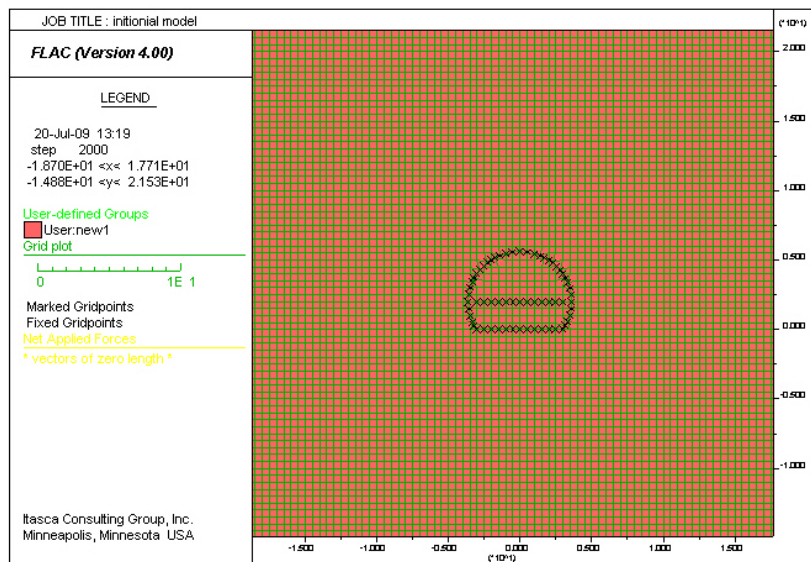
۵- حفاری بخش‌های مختلف تونل و نصب سیستم نگهداری موقت و تحلیل پایداری آن

¹ Closed form solution methods

۳-۲-۱- محدودی مدل سازی

ایده‌ی اولیه در این زمینه مربوط به حل دقیق ریاضی در محیط‌های الاستیک (روابط کرچ^۱) می‌باشد که حداکثر زون تأثیر یک حفره زیرزمینی تا سه برابر قطر آن برآورد شده است. بدین ترتیب در صورتی که توده سنگ به صورت الاستیک رفتار کند، در فاصله سه برابر قطر تونل، تنش‌ها به وضعیت اولیه خود می‌رسند. این مطلب در راهنمای برنامه $FLAC^{2D}$ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از سه مدل با شرایط متفاوت به این صورت بوده است که در صورتی که ابعاد مدل حدود ۸ تا ۱۰ برابر ابعاد حفره باشد، تحت شرایط مرزی متفاوت درصد خطاها به حداقل ممکن (حدود ۰/۵ درصد) کاهش خواهد یافت. (Itasca 1999)

با توجه به این که هدف از این تحقیق تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونلی به شکل تقریباً نعل اسبی با عرض و ارتفاع حدود ۶ متر می‌باشد اندازه طول مدل ۸۰ متر انتخاب شده است (ارتفاع مدل بر اساس عمق روباره تعیین می‌شود). با توجه به این که ارتفاع روباره در این منطقه زیاد است، بخشی از این عمق به صورت نیرو به مدل اعمال شده است. شکل (۳-۱) ابعاد مدل ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱- ابعاد مدل ایجاد شده در نرم‌افزار

¹ Kerch

۳-۲-۲- انتخاب مدل رفتاری و تعیین پارامترهای آن

همان طوری که در پیوست ب-۳ اشاره شده است، چندین مدل رفتاری در برنامه $FLAC^{2D}$ ارائه شده است که بسته به شرایط مسئله می‌توان از یک یا چند نوع آن استفاده کرد. یکی از این مدل‌های رفتاری، مدل پلاستیک موهر-کولمب است. این مدل نمایان‌گر موادی است که تنها در اثر برش به حد تسلیم می‌رسند. این مدل رفتاری در مکانیک سنگ و خاک برای حالت پلاستیک، مدل مرسوم می‌است (Itasca 1999).

پارامترهای مورد نیاز در مدل پلاستیک موهر-کولمب عبارتند از:

۱- جرم حجمی^۱

۲- مدول حجمی^۲

۳- مدول برشی^۳

۴- چسبندگی^۴

۵- زاویه اصطکاک^۵

۶- زاویه اتساع^۶

۷- مقاومت کششی^۷

چنانچه هر یک از پارامترهای فوق تعریف نشوند، برنامه مقدار صفر را برای آن منظور می‌کند. مقادیر به‌کار رفته در مدل‌سازی با توجه به مقادیر درج شده در جدول (۳-۱) منظور شده است. از جمله پارامترهای مورد نیاز در شبیه‌سازی رفتار بعد از شکست در مدل پلاستیک موهر-کولمب زاویه اتساع است. مقدار آن عموماً از طریق آزمایش سه محوری یا آزمایش برش تعیین می‌شود. برای خاک‌ها، سنگ‌ها و بتن مقدار زاویه اتساع عموماً کمتر از زاویه اصطکاک می‌باشد. طبق تحقیقات ورمر و دی بورست^۸ در سال ۱۹۸۴ برای مصالح ذکر

1 - Density
 2 - Bulk Modulus
 3 - Shear Modulus
 4 - Cohesion
 5 - Friction Angle
 6 - dilation Angle
 7 - Tensile Strength
 8 - Vermeer and de Borest

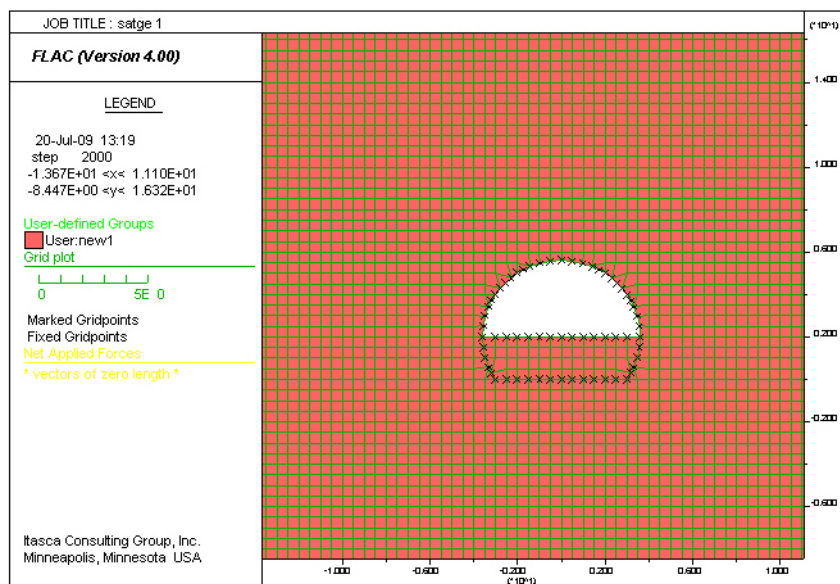
شده مقدار زاویه اتساع تقریباً بین 0° تا 20° برآورد شده است (Itasca 1999). که در این جا این مقدار 15° در نظر گرفته شده است. همچنین مقدار مقاومت کششی صفر در نظر گرفته شده است.

جدول ۳-۱- خصوصیات ژئومکانیکی ساختگاه تونل استفاده شده در نرم‌افزار Flac2D (هاشمی، ۱۳۸۶)

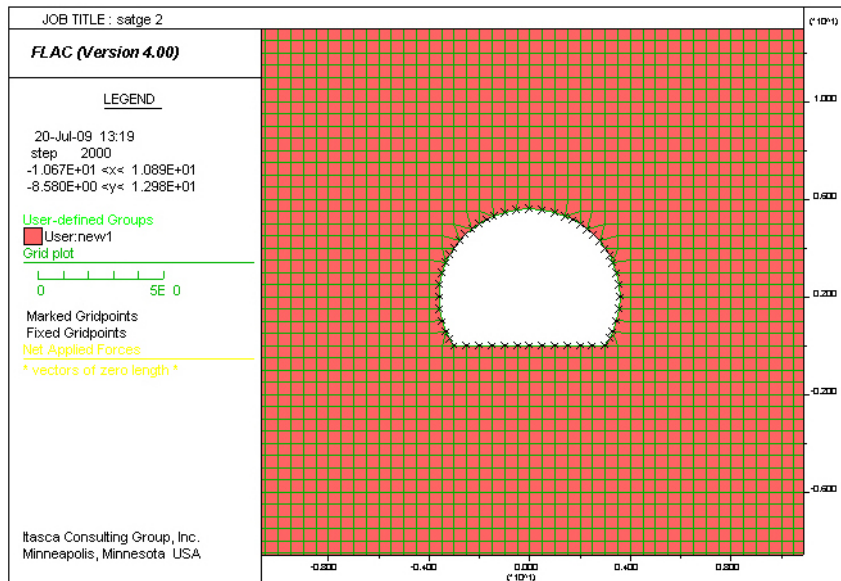
نسبت پواسون	چسبندگی	زاویه اصطکاک داخلی	مدول برشی	مدول الاستیسیته	دانسیته
-	C (Pa)	θ ($^\circ$)	G_m (Pa)	E_m (Pa)	ρ (kg/m ³)
۰/۳	$1/5 \times 10^6$	۳۰	$4/0.35 \times 10^8$	10000×10^6	۲۷۲۰

۳-۲-۳- ترسیم هندسه تونل

حفاری تونل بهشت آباد به دلیل سستی ساختگاه آن در چند مرحله و به صورت آتشیاری انجام می‌شود. هدف از این طرح کاهش گسترش منطقه پلاستیک و بالا بردن توان اجرائی عملیات است. شکل‌های (۲-۳) و (۳-۳) به ترتیب مراحل مختلف حفاری را نشان می‌دهند. در این طرح ابتدا تاج تونل که دارای عرض ۶ متر و ارتفاع ۳ متر است برداشته و سپس پس از نصب سیستم نگهداری اولیه حفاری قسمت زیرین تاج آغاز می‌شود.



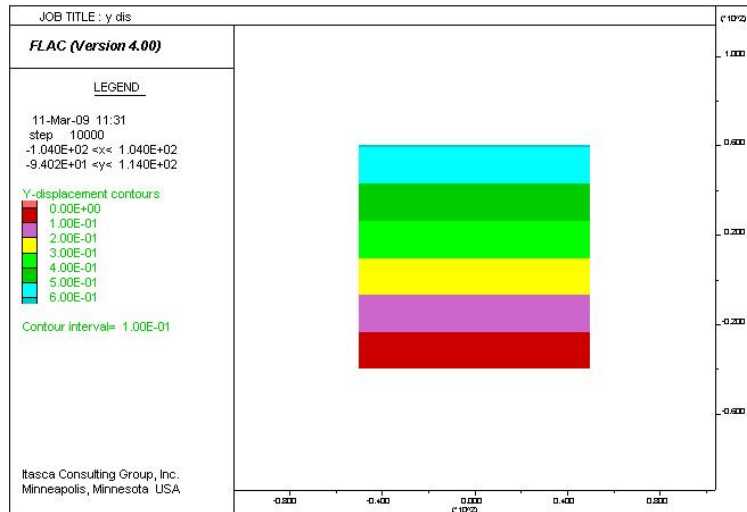
شکل ۳-۲- مرحله اول حفاری تونل



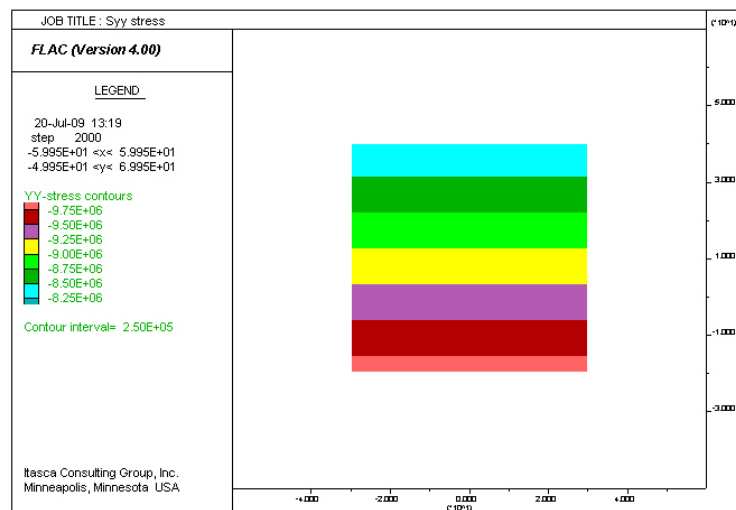
شکل ۳-۳- مرحله دوم حفاری تونل

۳-۲-۴- حل مدل و به تعادل رساندن آن قبل از حفاری

در این بخش با الگو گرفتن از آنچه در طبیعت رخ می‌دهد، سعی شده است تا شرایط مدل هرچه بیش‌تر به واقعیت نزدیک شود. از آنجایی که قبل از حفاری تونل، زمین در تعادل قرار دارد و حفر تونل باعث ایجاد اغتشاش در وضعیت تنش‌ها و جابه‌جائی‌ها می‌شود، لازم است تا قبل از حفاری، مدل را با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی، شرایط مرزی و تنش‌های برجای تعریف شده حل کرده و پس از به تعادل رساندن مدل، جابه‌جائی‌ها در گره‌ها صفر شود. شکل‌های (۳-۴) و (۳-۵) به ترتیب کنترهای تنش قائم و جابه‌جائی قائم را قبل از حفر تونل، در شرایط طبیعی متعادل نشان می‌دهد. لازم به ذکر است با توجه به بررسی‌ها و تحلیل‌های انجام شده، نسبت تنش افقی به قائم به کار برده شده در تحلیل‌ها برابر با $0/8$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۳-۴- کنتورهای جابه‌جایی قائم قبل از حفاری تونل



شکل ۳-۵- کنتورهای تنش قائم قبل از حفاری تونل

۳-۲-۵- حفاری تونل و نصب سیستم‌های نگهداری اولیه در نرم‌افزار $FLAC^{2D}$

تخمین نگهداری اولیه مورد نیاز برای پایدارسازی تونل یکی از مسایل مهم در طراحی است. رسم منحنی مشخصه‌ی زمین با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، تعیین میزان نرخ ناهمجواری از روی نمودار پانه^۱ و اعمال ترخیص تنش معادل با همگرایی ایجادشده تا قبل از استقرار پوشش اولیه در مدل عددی می‌تواند مسئله بعد سوم که همان تأثیر گام پیشروی و فاصله جبهه‌کار از پوشش اولیه است را در مسائل

1- Panet

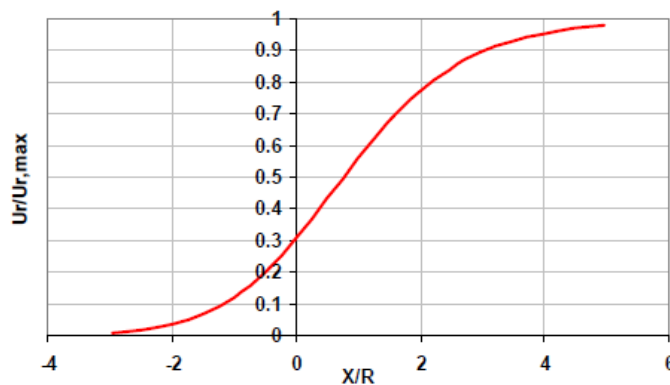
دو بعدی حل کند (Itasca 1999). برای تعیین پوشش اولیه مناسب به منظور حفظ پایداری فضای حفاری شده و کمک به ایجاد تعادل جدید در زمین از روش همگرایی-همجواری و رسم منحنی مشخصه‌ی زمین با کمک نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ استفاده شده است. مراحل طراحی پوشش اولیه برای بخش نخست حفاری به ترتیب شامل مراحل زیر می‌باشد:

۳-۲-۵-۱- انتخاب گام پیشروی و فاصله جبهه کار از پوشش

مرحله نخست از طراحی پوشش اولیه تونل انتقال آب بهشت آباد انتخاب گام پیشروی و فاصله جبهه کار از پوشش اولیه می‌باشد. برای تعیین میزان جابجایی‌ها در جبهه کار تونل می‌توان از پروفیل تغییر شکل طولی زمین (LDP)^۱ با توجه به رابطه کارانزا تورس^۲ شکل (۳-۶) یا منحنی پانه شکل (۳-۸) استفاده کرد (Torres, & Fairhurst, 2000).

$$\frac{U_r}{U_{r\max}} = \left[1 + \exp\left(-\frac{X/R}{1.10}\right) \right]^{-1.7} \quad (۱-۳)$$

که در این رابطه U_r مقدار جابه‌جایی مجاز، $U_{r\max}$ حداکثر جابه‌جایی، X گام پیشروی و R شعاع تونل است.



شکل ۳-۶- منحنی LDP در شرایط زمین خشک (Torres, & Fairhurst, 2000)

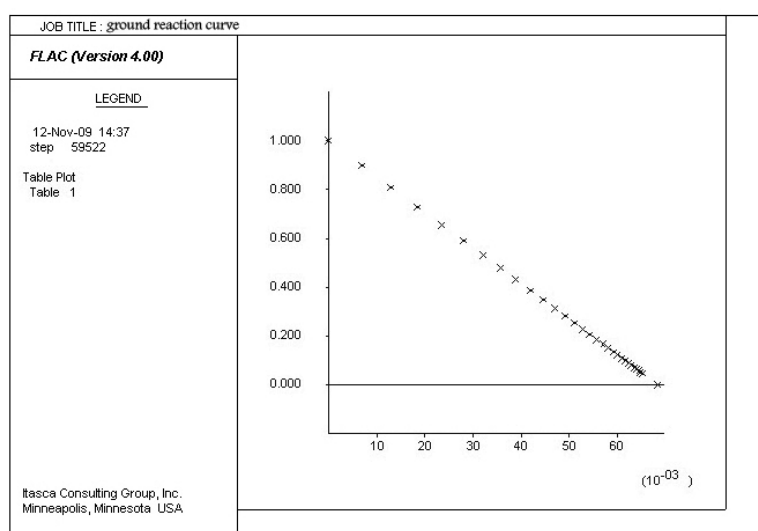
در این طرح با توجه به شرایط اجرائی، میزان گام پیشروی و فاصله جبهه کار از پوشش به ترتیب ۱/۵ و ۱ متر انتخاب شد.

^۱ Longitudinal deformation profile

^۲ Carranza Torres

۳-۲-۵-۲- رسم منحنی مشخصه زمین

دومین مرحله از طراحی پوشش اولیه تونل بهشت آباد، رسم منحنی مشخصه زمین است. منحنی مشخصه زمین را می‌توان از حل الاستوپلاستیک در معرض تنش‌های یکنواخت درجا و فشار داخلی یکنواخت به-دست آورد. در این بخش با استفاده از نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ منحنی مشخصه زمین برای بخش نخست حفاری رسم شده است. شکل (۳-۷) منحنی مشخصه زمین را نشان می‌دهد. ماکزیمم جابه‌جائی به دست آمده از منحنی مشخصه زمین با توجه به تریخیس کامل تنش، در سقف برابر با $7/8$ سانتی‌متر برآورد شده است.



شکل ۳-۷- منحنی مشخصه زمین (رسم شده توسط نرم افزار $FLAC^{2D}$)

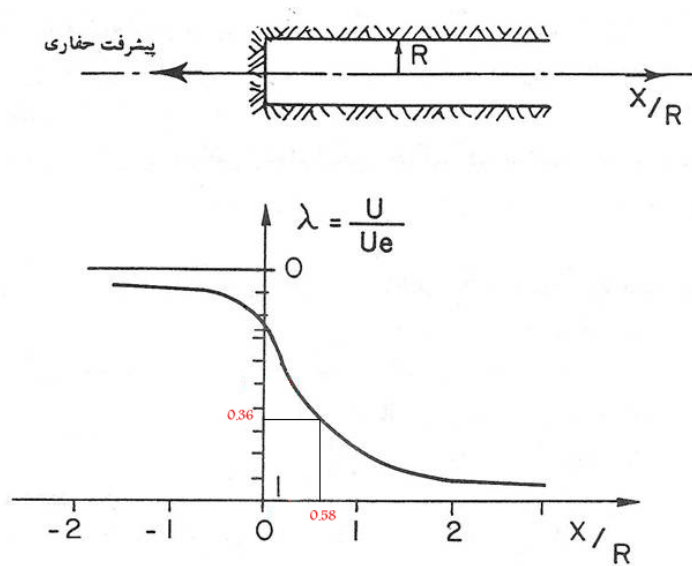
۳-۲-۵-۳- اعمال تریخیس تنش معادل با همگرایی به وجود آمده تا لحظه استقرار پوشش

سومین مرحله از طراحی پوشش اولیه تونل بهشت آباد اعمال تریخیس تنش معادل با همگرایی به وجود آمده تا لحظه استقرار پوشش می‌باشد. برای محاسبه تریخیس تنش معادل با همگرایی به وجود آمده تا لحظه استقرار پوشش گام‌های محاسباتی به ترتیب زیر انجام شده است:

گام ۱- تعیین همگرایی و نرخ ناهمجواری بر حسب فاصله تا جبهه کار

با تعیین همگرایی بر حسب فاصله تونل تا جبهه کار، می‌توان وضع نسبی بارها و جابه‌جائی به دست آمده از پیشروی جبهه کار را مشخص کرد. چشم‌پوشی از سهم همگرایی که تا لحظه استقرار پوشش به وجود می‌آید، نه تنها منجر به زیاد به حساب آوردن نیروی پوشش می‌شود، بلکه زمین و تعادل نهایی آن را هم آن طوری که

باید منظور نمی‌کند. رفتار همگرایی تونل برحسب فاصله جبهه کار را می‌توان در حالت دو بعدی و با کمک نمودار پانه شکل (۳-۸) به دست آورد. این منحنی نرخ ناهمجواری (نرخ ناهمجواری $\frac{U}{U_e}$ معادل است با نسبت جابه‌جائی به وجود آمده تا لحظه استقرار پوشش به جابه‌جائی ماکزیمم در اثر اعمال ترخیص تنش کامل) را برحسب فاصله تا جبهه حفاری نشان می‌دهد. مقدار نرخ ناهمجواری برای بخش نخست حفاری از روی نمودار پانه و با توجه به نسبت فاصله جبهه کار از پوشش، برابر با ۰/۶۴ محاسبه شده است.

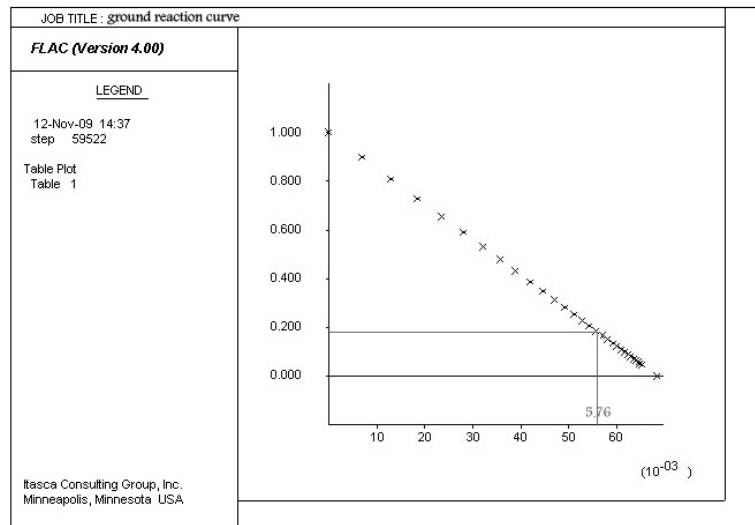


شکل ۳-۸- تغییرات نرخ ناهمجواری بر حسب فاصله از جبهه کار (پهنیا، ۱۳۷۳)

با توجه به مقادیر ماکزیمم جابه‌جائی به وجود آمده در طاق تونل در اثر ترخیص کامل تنش، مقدار جابه‌جائی به وجود آمده در اثر پیشروی جبهه کار (U) با توجه به نرخ ناهمجواری برای مقطع مورد نظر برابر با $5/2$ سانتی‌متر تعیین شده است.

گام ۲- تعیین مقدار ترخیص تنش

باتوجه به شکل (۳-۹) و بررسی‌های انجام شده، میزان ترخیص تنش اعمالی به مدل (معادل با $5/2$ سانتی‌متر جابه‌جائی)، ۸۲ درصد محاسبه شده است.



شکل ۳-۹- تعیین میزان ترخیص تنش از روی نمودار GRC

گام ۳- اعمال ترخیص تنش و بررسی پایداری فضای حفاری

در این مرحله با اعمال ترخیص تنش‌های محاسبه شده در مرحله قبل به مدل، به بررسی پایداری فضای حفاری شده پرداخته می‌شود. شکل‌های (۳-۱۰) و (۳-۱۱) کرنش‌های برشی و جابه‌جائی‌های به وجود آمده در اطراف تونل را برای مقطع مورد نظر در اثر اعمال ترخیص تنش نشان می‌دهند. برای ارزیابی پایداری فضای حفاری شده از روابط (۳-۲)، (۳-۳) و (۳-۴) که توسط ساکورایی^۱ در سال ۱۹۸۶ ارائه شده، استفاده شده است. این روابط کرنش برشی بحرانی در حالت فشاری محصور نشده در اطراف تونل

(ϵ_c) را بر حسب مدول الاستیسیته محیط (E) بر حسب $\frac{kgf}{cm^2}$ بیان می‌کند. با توجه به این‌که، تراز

هشدار خطر II به عنوان مبنای طراحی تونل‌های عمرانی پیشنهاد شده است، لذا برای تحلیل پایداری، از این تراز استفاده می‌شود. از آن‌جا که توده سنگ تحت تنش سه‌محوره قرار دارد، استفاده از ماکزیمم کرنش برشی برای ارزیابی پایداری تونل منطقی‌تر به نظر می‌رسد. همچنین ساکورایی و همکارانش در سال ۱۹۹۴ رابطه (۳-۵) را برای محاسبه کرنش برشی بحرانی مجاز (γ_c) در حالت سه محوری با استفاده از کرنش برشی بحرانی (ϵ_c) در حالت فشاری محصور نشده و نسبت پواسون (ν) پیشنهاد کردند (Sakurai, 1997):

1- Sakurai

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad \text{تراز هشدار خطر I (۲-۳)}$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad \text{تراز هشدار خطر II (۳-۳)}$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad \text{تراز هشدار خطر III (۴-۳)}$$

$$\gamma_C = (1 + \nu) \varepsilon_C \quad (۵-۳)$$

با جای‌گذاری مقادیر مدول الاستیسیته و نسبت پواسون در رابطه‌های ارائه شده می‌توان مقادیر کرنش برشی بحرانی در حالت سه محوری و کرنش بحرانی در حالت فشاری محصور نشده را محاسبه کرد:

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \Rightarrow \varepsilon_c = 6.28e - 3$$

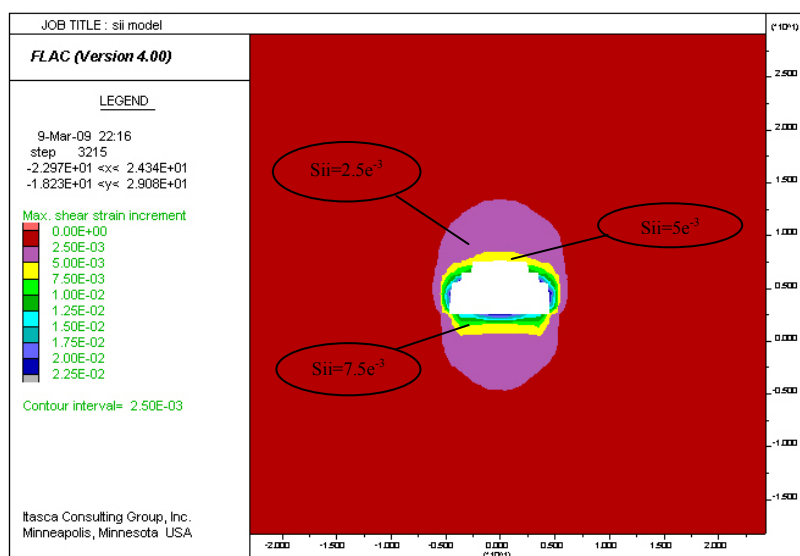
$$\gamma_C = (1 + \nu) \varepsilon_C \Rightarrow \gamma_C = 8.9e - 3$$

با توجه به شکل‌های (۱۰-۳) و (۱۱-۳) حداکثر کرنش‌های برشی به وجود آمده در اطراف فضای حفاری

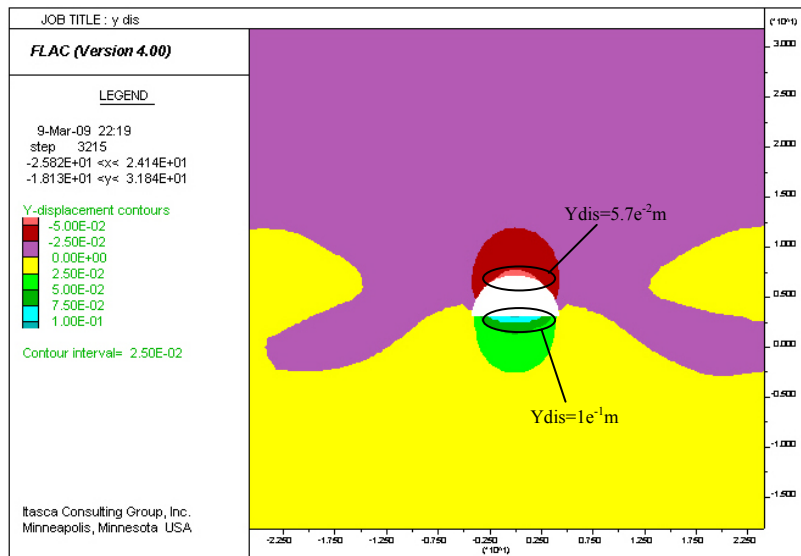
برای مقطع مورد نظر $۸/۹ \times ۱۰^{-۳}$ محاسبه شده است که به دلیل کم‌تر بودن مقادیر کرنش برشی به وجود

آمده در اطراف تونل نسبت به مقادیر محاسبه شده از رابطه (۳-۳) و (۵-۳)، می‌توان چنین استنباط کرد

که فضای حفاری تحت تأثیر ترخیص تنش اعمالی، پایدار می‌باشد.



شکل ۳-۱۰- کرنش برشی در اطراف تونل در مقطع مورد نظر



شکل ۳-۱۱- جابه‌جایی در اطراف تونل در مقطع مورد نظر

۳-۲-۵-۴- نصب پوشش اولیه و تعیین نیروها و گشتاور خمشی به‌وجود آمده در پوشش اولیه تونل

در این مرحله با توجه به ناپایداری منطقه، نصب سیستم نگهداری ضروری به نظر می‌رسد. شش نوع سیستم نگهداری برای این تونل در نظر گرفته شده است که عبارتند از:

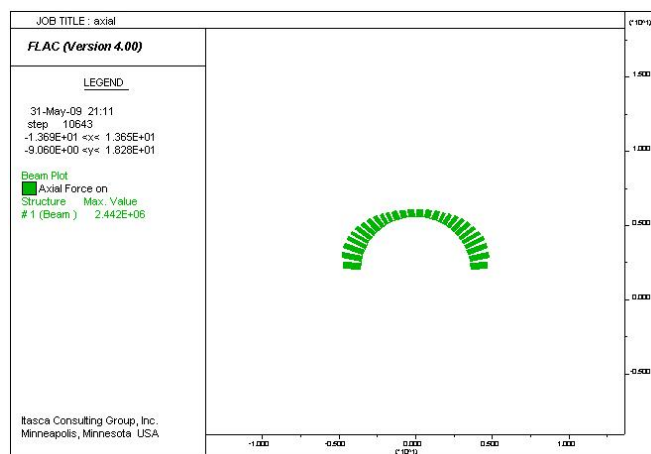
- سیستم شماره ۱: شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر + IP₁₈₀ به فواصل ۱ متر
- سیستم شماره ۲: شاتکریت با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر + IP₁₆₀ به فواصل ۱ متر است
- سیستم شماره ۳: مش فولادی به قطر ۵ میلی‌متر و ابعاد چشمه ۱۵ سانتی‌متر + شاتکریت با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر
- سیستم شماره ۴: شاتکریت با الیاف فولادی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر
- سیستم شماره ۵: پیچ سنگ‌های تزریقی به طول ۳ متر به فواصل ۱/۵ × ۱/۵ متر همراه با ۱۰ سانتی‌متر شاتکریت
- سیستم شماره ۶: پیچ سنگ‌های تزریقی به طول ۳ متر به فواصل ۲ × ۲ متر همراه با ۲۰ سانتی‌متر شاتکریت

در مرحله بعد انواع پوشش‌های اولیه کاندید شده به مدل اعمال شده و مقادیر ضریب اطمینان و جابه‌جایی متناظر با هر پوشش محاسبه شده است.

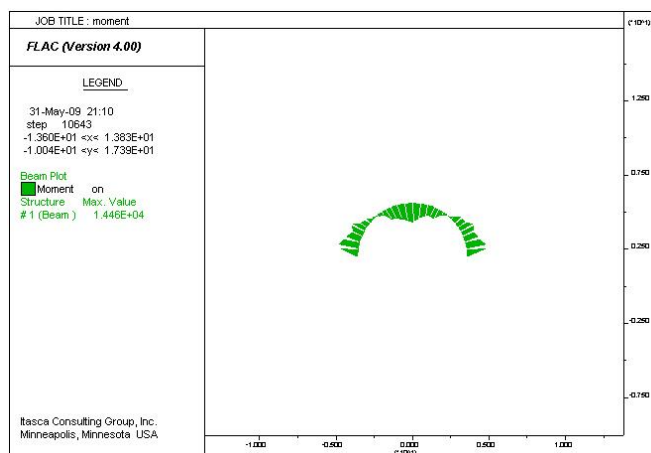
نیروها و گشتاور خمشی به وجود آمده، مقادیر ضریب اطمینان و جابه‌جایی سیستم نگهداری در مقطع پوشش اولیه برای سیستم شماره ۱ به همراه مشخصات سیستم نگهداری اولیه در جدول (۳-۲) و شکل‌های (۳-۱۲) تا (۳-۱۷) درج شده است.

جدول ۳-۲- مشخصات سیستم نگهداری شماره ۱

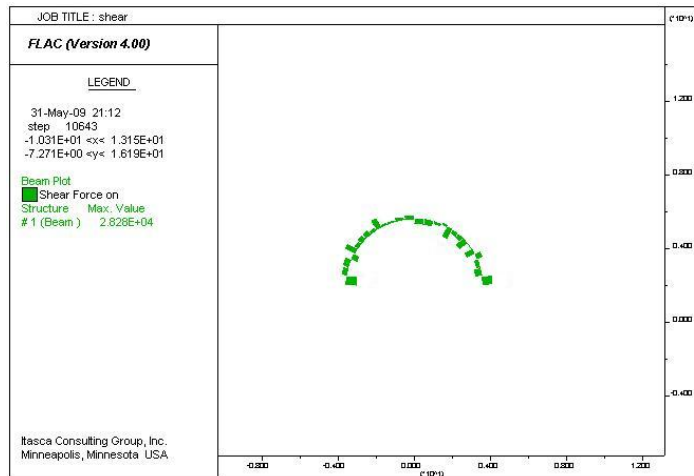
نوع سیستم نگهداری: IPE ₁₈₀ +25 ^{cm} Shotcrete			
کف	دیواره	سقف	
۲۷۹/۹×۱۰ ^۴	۳۹۷/۶×۱۰ ^۴	۳۰۰/۴×۱۰ ^۴	نیروی محوری (N)
۱۱/۶۴×۱۰ ^۳	۲۱/۷۱×۱۰ ^۴	۱۹/۴×۱۰ ^۲	گشتاور خمشی (N-m)
۵۴/۶×۱۰ ^۳	۶۶/۲×۱۰ ^۳	۴۷/۱×۱۰ ^۲	نیروی برشی (N)
۳/۰۹۹	۱/۵۷۲	۲/۹۷۲	ضریب اطمینان
	۱/۹۷۸×۱۰ ^{-۲}		جابه‌جایی سیستم نگهداری (m)



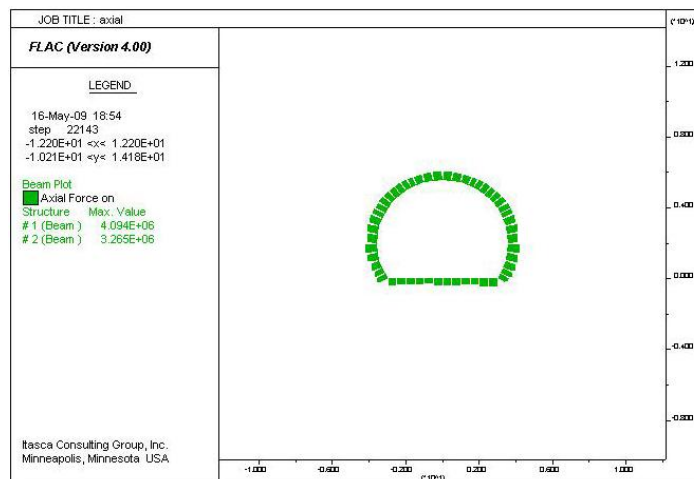
شکل ۳-۱۲- نیروی محوری وارده بر پوشش اولیه در بخش نخست حفاری



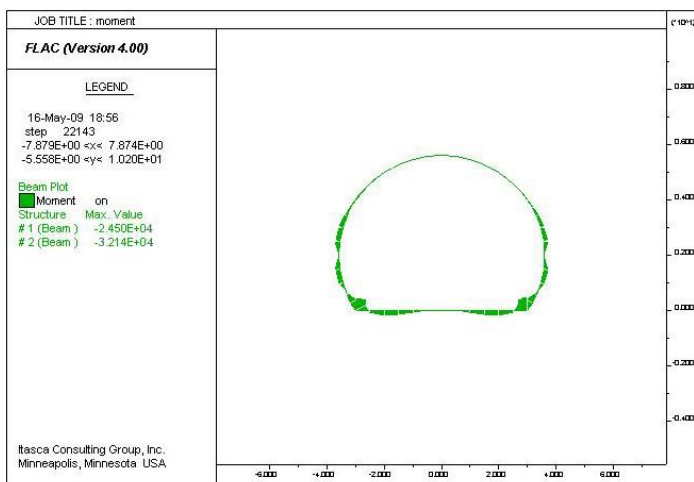
شکل ۳-۱۳- گشتاور خمشی وارده بر پوشش اولیه در بخش نخست حفاری



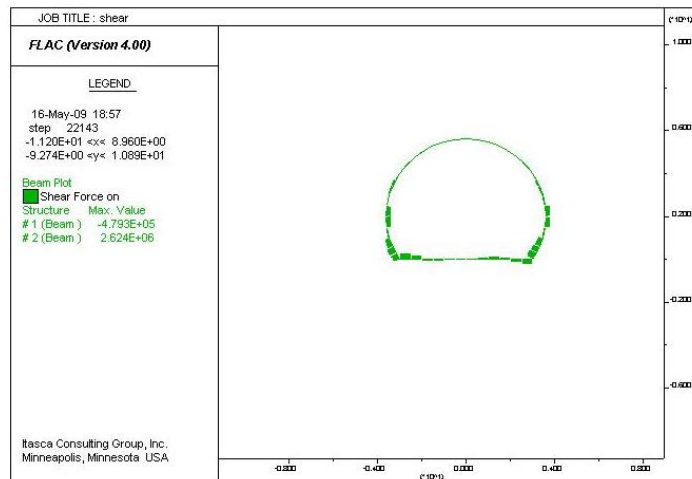
شکل ۳-۱۴- نیروی برشی وارده بر پوشش اولیه در بخش نخست حفاری



شکل ۳-۱۵- نیروی محوری وارده بر پوشش اولیه پس از اتمام حفاری



شکل ۳-۱۶- گشتاور خمشی وارده بر پوشش اولیه پس از اتمام حفاری



شکل ۳-۱۷- نیروی برشی وارده بر پوشش اولیه پس از اتمام حفاری

نیروها و گشتاور خمشی به وجود آمده، مقادیر ضریب اطمینان و جابه‌جایی سیستم‌های نگهداری شماره ۲ و ۳ به همراه مشخصات سیستم نگهداری در جداول (۳-۳) و (۴-۳) آورده شده است.

جدول ۳-۳- مشخصات سیستم نگهداری شماره ۲

نوع سیستم نگهداری: IPE ₁₆₀ +30 ^{cm} Shotcrete			
کف	دیواره	سقف	
۲۹۹/۲×۱۰ ^۴	۴۰۹/۳×۱۰ ^۴	۳۱۱/۹×۱۰ ^۴	نیروی محوری (N)
۸۰/۱۳×۱۰ ^۳	۳۲/۲×۱۰ ^۴	۳۵/۷×۱۰ ^۲	گشتاور خمشی (N-m)
۶۳/۷×۱۰ ^۲	۱۸/۷۲×۱۰ ^۳	۶۱/۵×۱۰ ^۲	نیروی برشی (N)
۲/۹۱	۱/۶۴	۳/۳۷۲	ضریب اطمینان
	۱/۸۷۷×۱۰ ^{-۲}		جابه‌جایی سیستم نگهداری (m)

جدول ۳-۴- مشخصات سیستم نگهداری شماره ۳

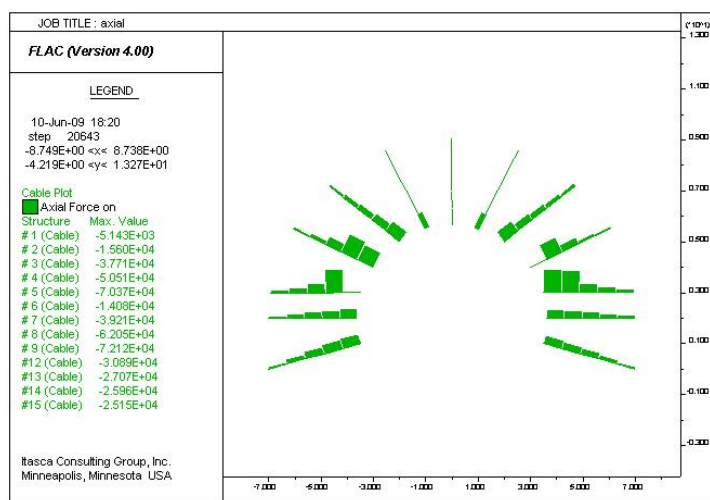
نوع سیستم نگهداری: shotcrete+Wire mesh			
کف	دیواره	سقف	
۲۴۸/۴×۱۰ ^۴	۳۷۱/۶×۱۰ ^۴	۲۷۱/۹×۱۰ ^۴	نیروی محوری (N)
۲۱۳/۴×۱۰ ^۲	۱۱۹/۳×۱۰ ^۳	۹/۴×۱۰ ^۲	گشتاور خمشی (N-m)
۲/۵۳	۱/۵۱	۲/۵۱۹	ضریب اطمینان
	۲/۰۸۳×۱۰ ^{-۲}		جابه‌جایی سیستم نگهداری (m)

مقادیر ضریب اطمینان و جابه‌جایی سیستم نگهداری شماره ۴ در مقطع پوشش اولیه به همراه مشخصات سیستم نگهداری اولیه در مراحل مختلف حفاری در جدول (۵-۳) نشان داده شده است.

جدول ۳-۵- مشخصات سیستم نگهداری شماره ۴

نوع سیستم نگهداری: شاتکریت الیافی	
۱۰/۱۷	ضریب اطمینان شاتکریت الیافی در مقابل نیروی برش
۱/۷۱	ضریب اطمینان شاتکریت الیافی در مقابل نیروی محوری
۰/۰۲۰۱۷۳	جابه‌جایی شاتکریت (m)

شکل (۳-۱۸) نیروی محوری وارد بر پیچ سنگ‌ها را پس از حفاری کامل تونل برای سیستم نگهداری شماره ۵ نشان می‌دهد. همچنین مقادیر ضریب اطمینان و جابه‌جایی سیستم‌های نگهداری شماره ۵ و ۶ در جداول (۳-۶) و (۳-۷) آورده شده است.



شکل ۳-۱۸- نیروی محوری وارد بر پیچ سنگ‌ها بعد از حفاری کامل

جدول ۳-۶- سیستم نگهداری شماره ۵

نوع سیستم نگهداری: پیچ سنگ تزریقی + شاتکریت	
۳/۹۵	ضریب اطمینان پیچ سنگ
۴/۲۷	ضریب اطمینان شاتکریت در مقابل نیروی برش
۲/۰۳۷	ضریب اطمینان شاتکریت در مقابل نیروی محوری
۰/۰۲۴۳۰	جابه‌جایی شاتکریت (m)
۰/۰۲۲۵۴	جابه‌جایی پیچ سنگ (m)

جدول ۳-۷- سیستم نگهداری شماره ۶

نوع سیستم نگهداری: پیچ سنگ تزریقی + شاتکریت	
۵/۱۴	ضریب اطمینان پیچ سنگ
۲/۶۳	ضریب اطمینان شاتکریت در مقابل نیروی برش
۱/۳	ضریب اطمینان شاتکریت در مقابل نیروی محوری
۰/۰۲۲۰۰	جابه‌جایی شاتکریت (m)
۰/۰۲۴۵۶	جابه‌جایی پیچ سنگ (m)

۳-۲-۶- تحلیل پایداری پوشش اولیه

به‌طور کلی هدف از طراحی یک سازه، تأمین ایمنی در مقابل فروریختگی و تضمین عمل‌کرد مناسب در زمان بهره‌برداری است. چنان‌چه مقاومت واقعی یک سازه به‌طور دقیق قابل پیش‌بینی بود و در صورتی‌که بارهای وارد بر سازه و اثرات داخلی آنها نیز با همان دقت قابل تعیین بودند، تأمین ایمنی تنها با ایجاد ظرفیت باربری به میزان جزئی بیش از مقدار بارهای وارده ممکن می‌شد. لیکن عوامل نامشخص و خطاهای احتمالی متعددی در تحلیل، طراحی و ساخت سازه‌ها وجود دارند که یک حاشیه ایمنی را در طراحی سازه‌ها طلب می‌کنند. روش تنش مجاز یکی از روش‌های طراحی سازه‌های بتن‌آرمه می‌باشد. این روش که به‌نام روش دیگر طراحی^۱ در آئین‌نامه شناخته می‌شود، اولین روشی است که به‌صورت مدون برای طراحی سازه‌های بتن‌آرمه به‌کار گرفته شد. در این روش، یک عضو سازه‌ای به‌نحوی طراحی می‌شود که تنش‌های ناشی از اثر بارهای بهره‌برداری که به کمک تئوری‌های خطی مکانیک جامدات محاسبه می‌شوند، از مقادیر مجاز تنش‌ها تجاوز نکنند. منظور از بارهای بهره‌برداری بارهایی نظیر بار مرده، بار زنده و بار زلزله و ... هستند که در زمانی که سازه عملاً تحت بهره‌برداری است، روی سازه اثر می‌کنند. منظور از تنش مجاز تنشی است که از تقسیم تنش حدی ماده، نظیر مقاومت فشاری برای بتن و مقاومت تسلیم برای فولاد بر ضریب بزرگ‌تر از واحد به‌نام ضریب اطمینان به دست می‌آید (آیین‌نامه بتن، ۱۳۷۹).

به منظور کنترل نیروها و گشتاور خمشی ایجاد شده در مقطع پوشش اولیه در سیستم‌های نگهداری از روش تنش مجاز استفاده شده است. با مدل‌سازی مقطع مورد نظر و اعمال نیروی محوری و گشتاور خمشی (محاسبه شده توسط نرم‌افزار $FLAC^{2D}$ در نرم‌افزار PCACol مقدار ضریب اطمینان را می‌توان برای مراحل مختلف حفاری محاسبه کرد. مقادیر ضریب اطمینان در این سیستم‌ها در جداول (۲-۳) تا (۷-۳) آورده شده است. شکل‌های (۱۹-۳) تا (۲۴-۳) کنترل پوشش اولیه را برای مقطع تونل بعد از اتمام حفاری در نرم‌افزار PCACol نشان می‌دهد. در ادامه برای کنترل نیروهای برشی وارده در پوشش از رابطه‌ی (۳-۶) استفاده شده است.

1- Alternate Design Method

$$V_n = V_s + V_c \quad (6-3)$$

در این رابطه V_n مقاومت برشی اسمی یک مقطع مسلح، V_c مقاومت برشی تأمین شده توسط بتن و V_s مقاومت برشی تأمین شده توسط تیر آهن IPE می‌باشد که برای محاسبه مقاومت برشی بتن و تیر آهن IPE می‌توان از رابطه‌های (3-7) و (3-8) استفاده کرد (کی‌نیا، 1384).

$$V_c = 0.45 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (7-3)$$

$$V_s = 0.34 f_y A \quad (8-3)$$

در رابطه (3-7) f'_c مقاومت فشاری بتن و b_w و d به ترتیب عرض و ارتفاع مقطع تحت برش می‌باشند. در رابطه (3-8) f_y و A به ترتیب مقاومت تسلیم فولاد و سطح مقطع تحت برش می‌باشند.

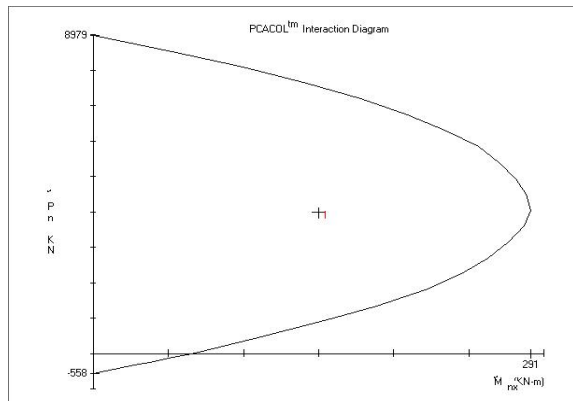
برای مثال برای کنترل نیروی برشی در مقطعی از جنس شاتکریت تر به ارتفاع 25 سانتی‌متر و عرض 1 متر به-همراه تیر آهن IPE180 با سطح مقطع 8/692 سانتی‌متر مربع داریم:

$$V_c = 0.45 \times \sqrt{200} \times 25 \times 100 = 15.91 \text{ ton}$$

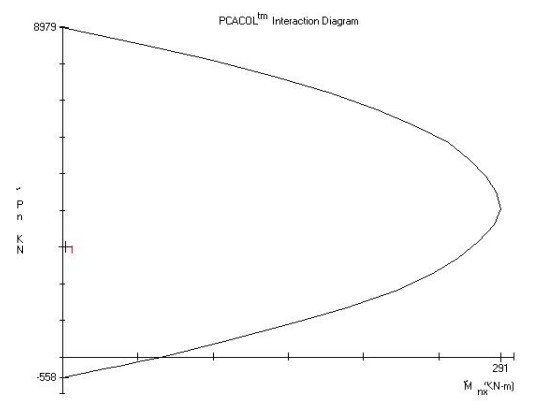
$$V_s = 0.34 \times 2400 \times 8.696 = 7.31 \text{ ton}$$

$$V_n = 15.91 + 7.31 = 23.22 \text{ ton}$$

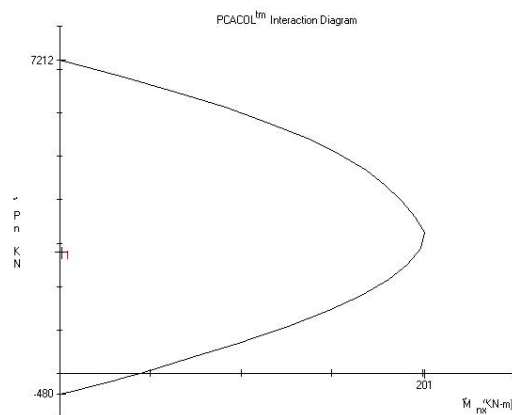
با توجه به این که نیروهای برشی وارد شده به پوشش اولیه در سیستم نگهداری شماره 1 کم‌تر از مقاومت برشی مقطع می‌باشد، می‌توان استنباط کرد که پوشش تحت نیروی برش وارده پایدار می‌باشد. نتایج بررسی‌ها برای سایر سیستم‌های نگهداری تحت نیروی برشی وارده نشان داد که پوشش اولیه در برابر این نیروها پایدار می‌باشد.



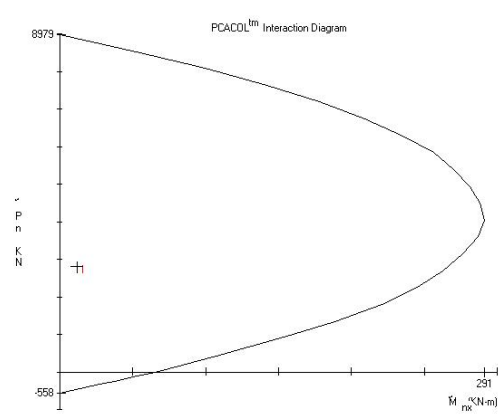
شکل ۳-۲۰- کنترل مقطع تونل برای بررسی پایداری پوشش اولیه در دیواره تونل برای سیستم نگهداری شماره ۱



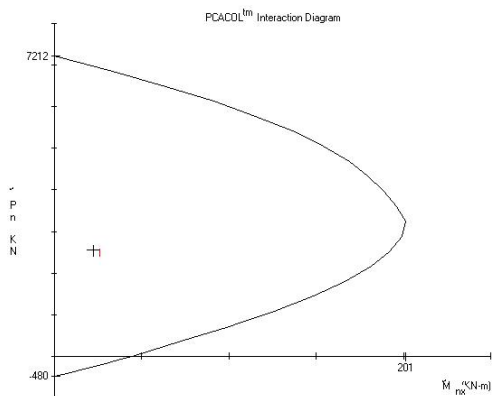
شکل ۳-۱۹- کنترل مقطع تونل برای بررسی پایداری پوشش اولیه در طاق تونل برای سیستم نگهداری شماره ۱



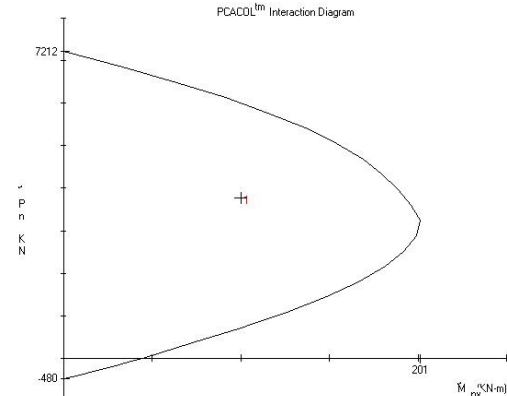
شکل ۳-۲۲- کنترل مقطع تونل برای بررسی پایداری پوشش اولیه در طاق تونل برای سیستم نگهداری شماره ۳



شکل ۳-۲۱- کنترل مقطع تونل برای بررسی پایداری پوشش اولیه در کف تونل برای سیستم نگهداری شماره ۱



شکل ۳-۲۴- کنترل مقطع تونل برای بررسی پایداری پوشش اولیه در کف تونل برای سیستم نگهداری شماره ۳



شکل ۳-۲۳- کنترل مقطع تونل برای بررسی پایداری پوشش اولیه در دیواره تونل برای سیستم نگهداری شماره ۳

در ادامه ضرایب ایمنی لایه شانکریت و پیچ سنگ مطابق آن چه که در زیر آمده با مشخص شدن نیروی محوری، لنگر خمشی و نیروی برشی بر لایه شانکریت و حداکثر نیروی محوری در پیچ سنگ قابل محاسبه است، که نتایج آن در جدول‌های (۳-۶) و (۳-۷) آورده شده است.

۳-۲-۶-۱- ضریب اطمینان کششی پیچ سنگ

$$SF_{bolt} = \frac{F_1}{F_2} \quad (9-3)$$

F_1 : مقاومت کششی پیچ سنگ بر حسب نیوتن

F_2 : حداکثر نیروی محوری وارده بر پیچ سنگ (حاصله از نتایج نرم افزار)

۳-۲-۶-۲- ضریب اطمینان شاتکریت در برابر نیروی برشی

ضریب اطمینان برشی شاتکریت از رابطه زیر به دست می‌آید (Basarir, 2006):

$$SF_r = \frac{\tau_b}{\tau_r} \quad (10-3)$$

τ_b : تنش برشی مجاز شاتکریت مصرفی بر حسب پاسکال

τ_r : حداکثر تنش برشی بر حسب پاسکال که مطابق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\tau_r = \frac{3}{2} \times \frac{Q_x}{t \times z} \quad (11-3)$$

Q_x : حداکثر نیروی برشی وارد بر لایه شاتکریت بر حسب نیوتن (حاصله از نتایج نرم‌افزار)

t : ضخامت لایه شاتکریت

z : عرض لایه شاتکریت در هر سیکل کاری بر حسب متر (که برابر با یک گام پیشروی است)

۳-۲-۶-۳- ضریب اطمینان شاتکریت در برابر نیروی محوری

ضریب اطمینان محوری شاتکریت از رابطه زیر به دست می‌آید (Basarir, 2006):

$$SF_c = \frac{\sigma_{c_2}}{\sigma_{c_1}} \quad (12-3)$$

σ_{c_2} : مقاومت فشاری شاتکریت مصرفی بر حسب پاسکال

σ_{c_1} : تنش محوری فشاری بر حسب پاسکال که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_{c_1} = \frac{N_x}{t \times z} + \frac{M \times c}{I} \quad (13-3)$$

N_x : حداکثر نیروی محوری بر حسب نیوتن

M : لنگر خمشی بر حسب نیوتن متر در المانی که حداکثر نیروی محوری بر آن وارد است

I: ممان اینرسی

c: فاصله دورترین تار کشکشی از محور خنثی (که آن را نصف ضخامت شاتکریت در نظر می‌گیرند)

Z: عرض لایه شاتکریت در هر سیکل کاری بر حسب متر

فصل چهارم

انتخاب سیستم نگهداری بهینه با استفاده از

روش FAHP

۴-۱- مقدمه

دنیای اطراف ما مملو از مسائل چند معیاره است و انسان‌ها همیشه مجبور به تصمیم‌گیری در این زمینه‌ها هستند. به طور مثال هنگام انتخاب شغل معیارهای مختلفی مانند درآمد، موقعیت اجتماعی، خلاقیت و ابتکار و ... مطرح می‌باشند که فرد تصمیم‌گیرنده گزینه‌های مختلف را باید بر طبق این معیارها بسنجد. برای انتخاب منزل نیز معیارهای مختلفی چون هزینه، نزدیکی به محل کار، فرهنگ مردم محله، دسترسی به مراکز خرید و دسترسی به مراکز آموزشی کودکان مطرح می‌باشد که تصمیم‌گیرنده باید بهترین گزینه را از نظر این معیارها انتخاب کند.

در تصمیم‌گیری‌های کلان مانند تنظیم بودجه سالانه کشور نیز متخصصین اهداف مختلفی مانند امنیت آموزش، توسعه صنعتی، بهداشت و ... را تعقیب نموده و مایل‌اند که این اهداف را بهینه کنند. همچنین از احداث یک سد، اهدافی مختلفی مانند توسعه کشاورزی، تولید نیروی الکتریسیته، توسعه اجتماعی و اقتصادی و تغییر شرایط آب و هوایی و ... دنبال می‌شود که تصمیم‌گیرندگان علاقمندند که همه این اهداف در حد امکان بهینه شوند (قدسی پور، ۱۳۸۱).

در زندگی روزمره مثال‌های فراوانی از تصمیم‌گیری‌های چند معیاره وجود دارد. در بعضی موارد نتیجه تصمیم‌گیری به حدی مهم است که بروز خطا ممکن است ضررهای جبران‌ناپذیری را برای ما تحمیل کند. از این رو لازم است که روش یا روش‌های مناسبی برای انتخاب بهینه و تصمیم‌گیری صحیح طراحی شود که در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت (قدسی پور، ۱۳۸۱).

۴-۲- انواع حالت‌های تصمیم‌گیری

اگرچه دسته‌بندی تصمیم‌سازی‌ها کار ساده‌ای نیست ولی در ابتدا لازم است مختصری در این مورد بحث شود. به طور کلی می‌توان انواع تصمیم‌سازی را با توجه به فضای آن، دسته‌بندی کرد. در هر تصمیم‌گیری، فضای تصمیم‌سازی به صورت پیوسته یا گسسته است. همچنین ممکن است تصمیم‌گیری تک معیاره یا چند معیاره باشد علاوه بر این معیارها می‌توانند به صورت‌های کمی، کیفی و یا تلفیقی از هر دو (در حالت چند معیاره) باشند که در هر یک از این حالت‌ها نحوه تصمیم‌گیری متفاوت است (قدسی‌پور، ۱۳۸۱).

در فضای گسسته و حالت تک معیاره تصمیم‌گیری راحت است. فرض کنید از بین دو مسیر می‌خواهیم مسیر کوتاهتر را انتخاب کنیم (معیار کمی)، بدین منظور کافی است که یک واحد برای اندازه‌گیری طول تعریف کرده و هر دو مسیر را بر اساس آن بسنجیم. به طور مثال چنانچه برای اندازه‌گیری طول از واحد متر استفاده کنیم وقتی یک مسیر ۵۰ متر و مسیر دیگر ۵۳ متر باشد، انتخاب مسیر کوتاه‌تر ساده خواهد بود ولی در حالتی که معیار به صورت کیفی باشد، تصمیم‌گیری مقداری مشکل بوده و لازم است که ابتدا استاندارد تعریف شود. به طور مثال چنانچه بخواهیم از بین چند اتومبیل، زیباترین را انتخاب کنیم، ابتدا باید زیبایی را برای اتومبیل تعریف کرده و سپس اقدام به رتبه‌بندی نماییم (قدسی‌پور، ۱۳۸۱).

در حالتی که معیارهای چند گانه (اعم از کیفی و کمی) مطرح نباشند، علاوه بر مشکل فوق، مساله تبدیل معیارها به یکدیگر نیز مطرح است. بنابراین گفته می‌شود که فرآیند تصمیم‌گیری چند معیاره با دو مشکل اصلی زیر روبرو است:

۱- فقدان استاندارد برای اندازه‌گیری معیارهای کیفی

۲- فقدان واحد برای تبدیل معیارها (اعم از کمی و کیفی) به یکدیگر

برای روشن شدن مطلب تصور کنید که تصمیم‌گیرنده‌ای می‌خواهد بهترین خانه را انتخاب کند که در آن دو معیار زیر مطرح است:

۱- قیمت

۲- فرهنگ مردم محله

در این مثال مقایسه خانه‌ها از نظر قیمت ساده است ولی مقایسه آن‌ها از نظر فرهنگ مردم محله کار ساده‌ای نیست زیرا نیاز به تعریف استاندارد برای فرهنگ مردم محله داریم. مشکل دیگری که وجود دارد تبدیل معیارها به یکدیگر و یا یک واحد سوم می‌باشد. مثلاً لازم است که فرهنگ مردم محله به قیمت تبدیل شده و یا قیمت به فرهنگ تبدیل شده و یا هر دو را به یک واحد سوم تبدیل نمائیم تا بتوان بهترین خانه را انتخاب کرد.

با توجه به مشکلات مربوط به فرآیند تصمیم‌گیری چند معیاره، می‌توان گفت که در این حالت تصمیم‌گیری ساده نبوده و به علت عدم وجود استاندارد از سرعت و دقت تصمیم‌گیری به مقدار زیادی کاسته شده و باعث می‌شود که فرآیند تصمیم‌گیری به مقدار زیادی به فرد تصمیم‌گیرنده وابسته باشد. برای رفع این مشکل و یا حداقل کردن آثار جانبی آن، روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره طراحی شده‌اند که هر کدام از قوانین و اصول خاصی پیروی کرده و دارای مزایا و معایبی هستند.

یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری چند معیاره باید دارای خصوصیات زیر باشد (قدسی‌پور، ۱۳۸۱):

۱- امکان فرموله کردن مساله و تجدید نظر در آن را داشته باشد.

۲- گزینه‌های مختلف را در نظر بگیرد.

۳- معیارهای مختلف را (که عموماً در تضاد نیز هستند) در نظر بگیرد.

۴- معیارهای کمی و کیفی را در تصمیم‌گیری دخالت دهد.

۵- نظرات افراد را در مورد گزینه‌ها و معیارها لحاظ کند.

۶- امکان تلفیق قضاوت‌ها برای محاسبه نرخ نهایی را بدهد.

۷- بر مبنای یک تئوری استوار باشد.

از جمله روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌توان به روش‌های وزن‌دهی ساده، روش شباهت به گزینه ایده‌آل، روش تحلیل سلسله مراتبی و روش تسلط تقریبی اشاره نمود.

۳-۴- فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)^۱

این روش بر اساس تحلیل مغز انسان برای مسائل پیچیده ارائه شده است. این روش توسط محققى به نام توماس- ل- ساعتى در سال ۱۹۷۰ ارائه شد به طوری که کاربردهای متعددی از آن زمان تاکنون برای این روش مورد بحث قرار گرفته است (اصغرپور، ۱۳۸۷).

AHP و کاربرد آن بر سه اصل زیرین استوار است:

- برپایی یک ساختار و قالب رده‌ای برای مسئله
- برقراری ترجیحات از طریق مقایسه زوجی
- برقراری سازگاری منطقی از اندازه گیری‌ها

۴-۴- مراحل محاسبه وزن در روش تحلیل سلسله مراتبی

برای به دست آوردن گزینه مناسب در روش تحلیل سلسله مراتبی باید مراحل زیر را به ترتیب انجام داد:

- ساختن سلسله مراتب
- محاسبه وزن
- سازگاری سیستم

۴-۴-۱- ساختن سلسله مراتب

اولین قدم در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، ایجاد یک نمایش گرافیکی از مسائل می‌باشد که در آن هدف، معیارها و گزینه‌ها نشان داده می‌شوند. سطح یک در سلسله مراتب هدف را نشان می‌دهد در سطح دوم معیارها مطرح می‌شوند و در سطح آخر گزینه‌ها نشان داده می‌شوند.

^۱ Analytic hierarchy process

۴-۴-۲- محاسبه وزن

در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی عناصر هر سطح نسبت به عنصر مربوطه خود در سطح بالاتر به صورت زوجی مقایسه شده و وزن آن‌ها محاسبه می‌گردد، که این وزن‌ها را وزن نسبی می‌نامیم. سپس با تلفیق وزن‌های نسبی، وزن نهایی هر گزینه مشخص می‌گردد که آن را وزن مطلق می‌نامیم. در این مقایسه‌ها تصمیم‌گیرندگان از قضاوت‌های شفاهی استفاده نخواهند کرد، به گونه‌ای که اگر عنصر i با عنصر j مقایسه شود تصمیم‌گیرنده خواهد گفت که اهمیت i بر j یکی از حالات زیر است:

- کاملاً برتر
- خیلی برتر
- برتر
- کمی برتر
- بدون برتری (اهمیت یکسان)

این قضاوت‌ها توسط ساعتی به مقادیر کمی بین ۱ تا ۹ تبدیل شده‌اند که در جدول (۴-۱) آورده شده است (قدسی‌پور، ۱۳۸۱).

جدول ۴-۱- مقادیر ترجیحات برای مقایسه‌های زوجی بین پارامترها (قدسی‌پور، ۱۳۸۱)

مقدار عددی	ترجیحات (قضاوت شفاهی)
۹	کاملاً برتر
۷	خیلی برتر
۵	برتر
۳	کمی برتر
۱	بدون برتری (اهمیت یکسان)
۲ و ۴ و ۶ و ۸	ترجیحات بین فواصل فوق

پس از این که ماتریس مقایسه زوجی تشکیل شد، می‌توان وزن هر گزینه را محاسبه کرد. به عبارت دیگر با استفاده از مقایسه‌های زوجی که در ماتریس مقایسه زوجی بیان شده است وزن نهایی هر گزینه را به دست می‌آوریم. برای محاسبه وزن هر گزینه از ماتریس مقایسه زوجی (وزن نسبی) چندین روش پیشنهاد شده است که اهم آن‌ها عبارتند از:

۱- روش حداقل مربعات معمولی

۲- روش حداقل مربعات لگاریتمی

۳- روش بردار ویژه

۴- روش‌های تقریبی

۴-۴-۳- سازگاری سیستم

یکی از مزایای فرآیند تحلیل سلسله مراتبی کنترل سازگاری تصمیم است به عبارت دیگر همواره در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی می‌توان میزان سازگاری تصمیم را محاسبه نموده و نسبت به خوب و بد بودن و یا قابل قبول و مردود بودن آن قضاوت کرد (قدسی‌پور، ۱۳۸۱).

۴-۵- مزایای فرآیند تحلیل سلسله مراتبی

فرآیند طوری طراحی شده که با ذهن و طبیعت بشری مطابق و همراه می‌شود و با آن پیش می‌رود. فرآیند مجموعه‌ای از قضاوت‌ها (تصمیم‌گیری‌ها) و ارزش‌گذاری‌های شخصی به یک شیوه منطقی می‌باشد. به طوری که می‌توان گفت تکنیک از یک طرف وابسته به تصورات شخصی و تجربه برای شکل دادن و طرح‌ریزی سلسله مراتبی یک مسئله بوده و از طرف دیگر به منطق، درک و تجربه برای تصمیم‌گیری و قضاوت نهایی مربوط می‌شود.

کلیه افراد اعم از دانشمندان اجتماعی و فیزیکی، مهندسان و سیاستمداران و حتی افراد عامی می‌توانند این روش را بدون استفاده از متخصصین به کار برند.

امتیاز دیگر فرآیند تحلیل سلسله مراتبی این است که ساختار و چارچوبی را برای همکاری و مشارکت گروهی در تصمیم‌گیری یا حل مشکلات مهیا می‌کند (قدسی‌پور، ۱۳۸۱).

ویژگی‌های فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به شرح زیر است (قدسی‌پور، ۱۳۸۱):

- ۱- یگانگی و یکتایی مدل^۱: فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یک مدل یگانه، ساده و انعطاف‌پذیر برای حل محدوده وسیعی از مسایل بدون ساختار است که به راحتی قابل درک برای همگان می‌باشد.
- ۲- پیچیدگی^۲: برای حل مسائل پیچیده، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی هم نگرش سیستمی و هم تحلیل جزء به جزء را به صورت توأم به کار می‌برد. عموماً افراد در تحلیل مسایل یا کل‌نگری کرده و یا به جزئیات پرداخته و کلیات را رها می‌کنند. در حالی که فرآیند تحلیل سلسله مراتبی هر دو بعد را با هم به کار می‌بندد.
- ۳- همبستگی و وابستگی متقابل^۳: فرآیند تحلیل سلسله مراتبی وابستگی را به صورت خطی در نظر می‌گیرد. ولی برای حل مسائلی که اجزاء به صورت غیر خطی وابسته‌اند نیز به کار گرفته می‌شود.
- ۴- ساختار سلسله مراتبی^۴: فرآیند تحلیل سلسله مراتبی اجزای یک سیستم را به صورت سلسله مراتبی سازماندهی می‌کند. که این نوع سازماندهی با تفکر انسان تطابق داشته و اجزاء در سطوح مختلف طبقه‌بندی می‌شوند.
- ۵- اندازه‌گیری^۵: فرآیند تحلیل سلسله مراتبی مقیاسی برای اندازه‌گیری معیارهای کیفی تهیه کرده و روشی برای تخمین و برآورد اولویت‌ها فراهم می‌کند.
- ۶- سازگاری^۶: فرآیند تحلیل سلسله مراتبی سازگاری منطقی قضاوت‌های استفاده شده در تعیین اولویت‌ها را محاسبه کرده و ارائه کند.
- ۷- تلفیق^۷: فرآیند تحلیل سلسله مراتبی منجر به برآورد رتبه نهایی هر گزینه می‌شود.

1. Unity
2. Complexity
3. Interdependence
4. Hierarchy Structuring
5. Measurement
6. Consistency
7. Synthesis

۸- تعادل^۱: فرآیند تحلیل سلسله مراتبی اولویت‌های وابسته به فاکتورها در یک سیستم را در نظر گرفته و بین آن‌ها تعادل برقرار می‌کند و فرد را قادر می‌سازد که بهترین گزینه را بر اساس اهدافش انتخاب کند.

۹- قضاوت و توافق گروهی^۲: فرآیند تحلیل سلسله مراتبی بر روی توافق گروهی اصرار و پافشاری ندارد ولی تلفیقی از قضاوت‌های گوناگون را می‌تواند ارائه کند.

۱۰- تکرار فرآیند^۳: فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فرد را قادر می‌سازد که تعریف خود را از یک مساله تصحیح کند و قضاوت و تصمیم خود را بهبود دهد.

۴-۶- استفاده از AHP به صورت فازی

اگرچه روش AHP دانش کارشناسان را تسخیر کرده است ولی AHP سنتی هنوز قادر نیست به خوبی تفکر بشر را بازتاب کند (Kahreman et al, 2004). روش AHP سنتی در استفاده دقیق مقدار، برای بیان کردن نظر تصمیم‌گیرنده‌ها در گزینه‌های مقایسه‌ای دارای نقص است (Wang and Chen, 2007). همچنین روش AHP سنتی به علت مقیاس نامتوازن^۴ در قضاوت‌ها و عدم قطعیت و نادقیق بودن مقایسه‌های زوجی مورد نکوهش قرار می‌گیرد. تصمیم‌گیرندگان اغلب در قضاوت‌هایشان ارائه یک بازه را نسبت به یک عدد ثابت ترجیح می‌دهند زیرا آن‌ها به علت طبیعت فازی مقایسه‌های زوجی قادر نیستند به صراحت نظرشان را در مورد برتری‌ها اعلام کنند (Deng, 1999).

برای غلبه بر همه این نقایص AHP فازی (FAHP) گسترش پیدا کرد. تصمیم‌گیرنده‌ها پی بردند که دادن یک فاصله قضاوتی از یک قضاوت ثابت معمولاً قابل اطمینان‌تر است (Kahreman et al, 2003). ساعتی دو نوع فازی بودن را تعریف می‌کند: یکی فازی بودن در درک پدیده‌ها و دقت و دیگری فازی بودن در معنی که وابسته به عملکرد پدیده‌ها می‌باشد. لکن ساعتی مستقیماً از اعداد فازی استفاده

¹. Trade off

². Judgment and Consensus

³. Process Repetition

⁴ Unbalanced scale

نمی‌کند، بلکه فازی بودن را به طور غیر مستقیم از نسبت‌های a_{ij} توام با یک ساختار رده‌ای استفاده می‌کند (اصغر پور، ۱۳۸۷).

دو محقق^۱ برای محاسبه AHP فازی و توام با چندین تصمیم گیرنده از روش کمترین مجذورات لگاریتمی برای محاسبه اوزان استفاده می‌نمایند که ضمناً نسبت‌های a_{ij} در این روش به صورت اعداد فازی مثلثی بیان می‌شوند به صورت زیر:

$$\min: \sum_{i < j}^{l_{ij}} \sum_{k=1}^{l_{ij}} \left(\ln a_{ijk} - \ln \left(\frac{w_i}{w_j} \right) \right)^2 \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, l_{ij} \quad (1-4)$$

که k بیانگر تعداد تصمیم گیرنده‌ها است که در جمع دارای l_{ij} تصمیم گیرنده در تقاطع ij خواهد بود. برای مینیمم کردن تابع فوق باید از قرار دادن مشتقات نسبی آن برابر صفر استفاده کرد سپس بردار فازی W از نرمالیزه شدن به دست خواهد آمد (اصغر پور، ۱۳۸۷).

در این تحقیق از روش AHP فازی ارائه شده توسط چنگ^۲ استفاده شده است. در این روش اگر مجموعه اشیاء $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ و مجموعه هدف باشد بر اساس $G = \{g_1, g_2, g_3, \dots, g_n\}$ روش تحلیل گسترش چنگ، هر شی گسترش پیدا می‌کند برای هر هدف انجام شده، بنابراین m تحلیل گسترش یافته برای هر شی می‌تواند طبق رابطه زیر به دست بیاید (Chang, 1996):

$$M_{gi}^1, M_{gi}^2, \dots, M_{gi}^m \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2-4)$$

گام‌های روش تحلیل گسترش چنگ به صورت زیر است:

گام یک: رسم نمودار سلسله مراتبی

گام دوم: تعریف اعداد فازی به منظور انجام مقایسه‌های زوجی

گام سوم: تشکیل ماتریس مقایسه زوجی (\tilde{A}) با به کارگیری اعداد فازی. ماتریس مقایسه زوجی به ترتیب زیر خواهد بود:

¹ Laarhoven & Peddrycz

² Chang

$$(\tilde{A}) = \begin{bmatrix} 1 & \tilde{a}_{12} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \tilde{a}_{12} & 1 & \cdots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \tilde{a}_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

که این ماتریس حاوی اعداد فازی زیر است:

$$\tilde{a}_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ \tilde{1}, \tilde{3}, \tilde{5}, \tilde{7}, \tilde{9} \text{ or } \tilde{1}^{-1}, \tilde{3}^{-1}, \tilde{5}^{-1}, \tilde{7}^{-1}, \tilde{9}^{-1} & i \neq j \end{cases}$$

اگر کمیته تصمیم گیرنده دارای چندین تصمیم گیرنده باشد، درایه‌های ماتریس مقایسه زوجی جامع که در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به کار می‌رود، یک عدد فازی مثلثی است که مولفه‌ی اول آن حداقل نظر سنجی‌ها، مولفه‌ی دوم آن میانگین نظر سنجی‌ها و مولفه‌ی سوم آن حداکثر نظر سنجی‌ها می‌باشد.

گام چهارم: محاسبه S_i برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسه زوجی S_i که خود یک عدد فازی مثلثی است از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$S_i = \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \otimes \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} \quad (3-4)$$

که در این رابطه i بیان‌گر شماره سطر و j بیان‌گر شماره ستون می‌باشد. در این رابطه اعداد فازی مثلثی ماتریس‌های مقایسه زوجی هستند.

برای به دست آوردن $\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ ، عمل جمع فازی $M_{gi}^j (j=1,2,\dots,m)$ به صورت زیر انجام شده است.

$$\sum_{j=1}^m M_{gi}^j = \left(\sum_{j=1}^m l_j, \sum_{j=1}^m m_j, \sum_{j=1}^m u_j \right) \quad (4-4)$$

و سپس مقدار معکوس رابطه بالا به صورت زیر به دست می‌آید:

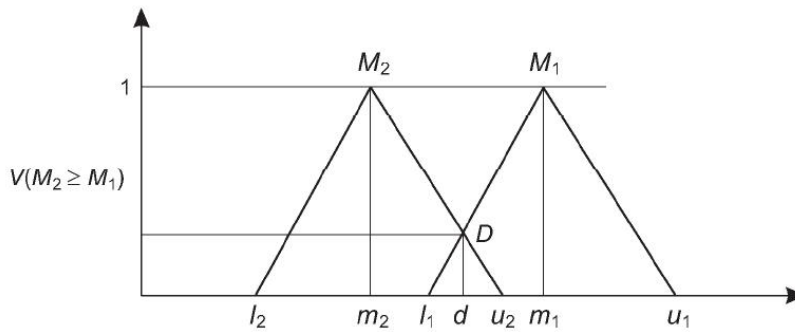
$$\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^n l_i} \right) \quad (5-4)$$

در روابط بالا l_1 ، m_1 و u_1 به ترتیب مولفه‌های اول تا سوم اعداد فازی هستند.

گام ۵:

به طور کلی اگر $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ و $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ دو عدد فازی مثلثی باشند، طبق شکل (۴-۶) (۱) درجه بزرگی M_1 نسبت به M_2 به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$V(M_2 \geq M_1) = \begin{cases} 1 & \text{if } m_2 \geq m_1 \\ 0 & \text{if } l_1 \geq u_2 \\ \frac{l_1 - u_2}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (۴-۶)$$



شکل ۴-۱- تقاطع بین M_2 و M_1 (Chang, 1996)

از طرف دیگر میزان بزرگی یک عدد فازی مثلثی از عدد فازی مثلثی دیگر از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} V(M \geq M_1, M_2, \dots, M_k) &= V[(M \geq M_1) \text{ and } (M \geq M_2) \text{ and } \dots \text{ and } (M \geq M_k)] \\ &= \min V(M \geq M_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, k \end{aligned} \quad (۴-۷)$$

گام ۶: محاسبه وزن معیارها و گزینه‌ها در ماتریس مقایسه زوجی. بدین منظور از رابطه‌ی زیر استفاده شده است.

$$d'(A_i) = \min V(S_i \geq S_k) \quad k = 1, 2, \dots, n, \quad k \neq i \quad (۴-۸)$$

بنابراین بردار وزن نرمالایزه نشده به صورت زیر خواهد بود:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \dots, d'(A_n))^T \quad (۴-۹)$$

گام ۷: محاسبه بردار وزن نهایی. برای محاسبه بردار وزن نهایی باید بردار وزن محاسبه شده در مرحله قبل را نرمالیزه کرد بنابراین داریم:

$$W = (d(A_1), d(A_2), \dots, d(A_n))^T \quad (10-4)$$

۷-۴- انتخاب سیستم نگهداری بهینه

در روند تصمیم‌گیری برای انتخاب سیستم نگهداری بهینه، روش FAHP مورد استفاده قرار گرفته است. که این انتخاب بر اساس نتایج به دست آمده از مطالعات عددی و همچنین تخمین بخشی از معیارها بر اساس مصاحبه‌های انجام شده با کارشناسانی که در امر تونل‌سازی تجربه کافی داشته‌اند انجام شده است. در این تحقیق شش معیار که در انتخاب یک سیستم نگهداری تونل موثر هستند در نظر گرفته شده است که عبارتند از:

- هزینه^۱
- ضریب اطمینان (FOS)^۲
- کارایی سیستم نگهداری^۳
- مدت زمان نصب سیستم نگهداری^۴
- جابه‌جایی^۵
- قابلیت مکانیزاسیون^۶

در جدول (۲-۴) معیارهای مورد نظر برای انتخاب سیستم نگهداری نشان داده شده است. در میان این معیارها، سه معیار هزینه، ضریب اطمینان و جابه‌جایی معیارهای کمی هستند و توسط محاسبات

¹ Cost

² Safety Factor

³ Applicability

⁴ Time

⁵ Displacement

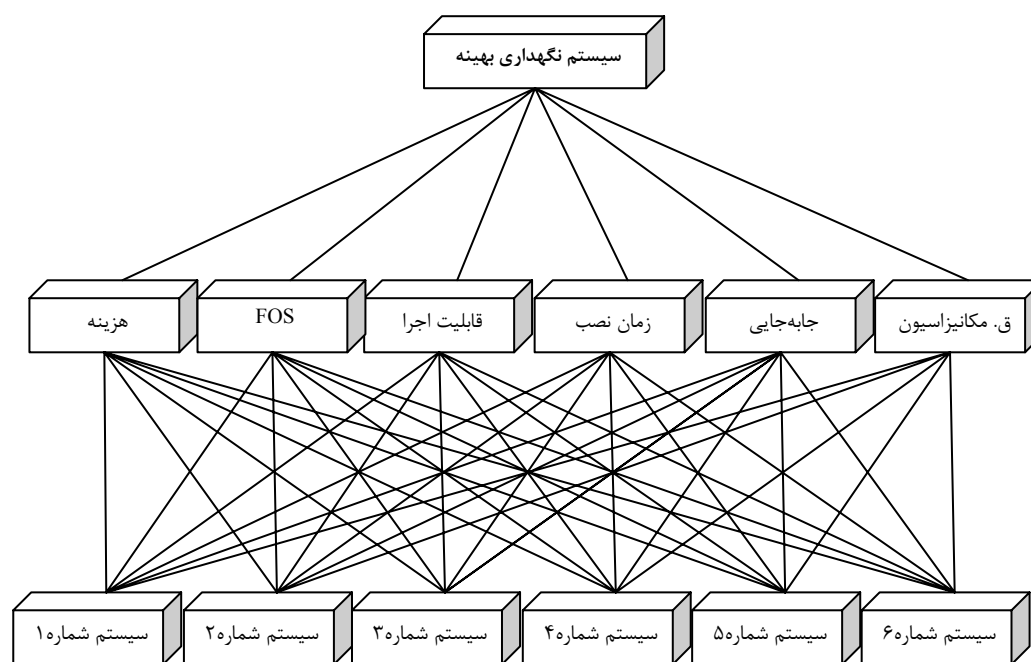
⁶ Mechanization

و مطالعات عددی به دست آمده‌اند و سه معیار دیگر معیارهای کیفی هستند که بر اساس تجربه کارشناسان وزن دهی شده‌اند.

جدول ۴-۲- معیارهای مورد نظر برای انتخاب سیستم نگهداری بهینه

معیار	توضیحات
C_1	هزینه
C_2	ضریب اطمینان
C_3	کارایی سیستم نگهداری
C_4	زمان نصب سیستم نگهداری
C_4	جابه‌جایی
C_6	قابلیت مکانیزه شدن

انتخاب سیستم نگهداری مناسب به صورت یک روند سلسله مراتبی ساخته شده که دارای سه طبقه مختلف است. هدف، معیارها و گزینه‌ها که در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.



شکل ۴-۲- نمودار تحلیل سلسله مراتبی انتخاب سیستم نگهداری بهینه

شش مدل عددی (سیستم‌های نگهداری کاندید شده) برای به دست آوردن ضریب اطمینان و جابه‌جایی مورد مطالعه قرار گرفته است. مطالعات و محاسبات مربوط به این شش مدل در فصل سوم انجام شده و نتایج به دست آمده به صورت خلاصه در جدول (۴-۳) آورده شده است.

جدول ۴-۳- مقادیر ضریب اطمینان و جابه‌جایی به دست آمده از تحلیل عددی مدل‌های ارائه شده

مدل	مقدار جابه‌جایی (m)	مقدار ضریب اطمینان
سیستم نگهداری شماره ۱ (A)	$1/978 \times 10^{-2}$	۱/۵۷۲
سیستم نگهداری شماره ۲ (B)	$1/877 \times 10^{-2}$	۱/۶۴
سیستم نگهداری شماره ۳ (C)	$2/083 \times 10^{-2}$	۱/۵۱
سیستم نگهداری شماره ۴ (D)	$2/0173 \times 10^{-2}$	۱/۷۱
سیستم نگهداری شماره ۵ (E)	$2/243 \times 10^{-2}$	۲/۰۳۷
سیستم نگهداری شماره ۶ (F)	$2/2 \times 10^{-2}$	۱/۳

همچنین هزینه هر کدام از این شش سیستم نگهداری پیشنهادی بر اساس قیمت‌های ارائه شده در فهرست‌بهای واحد پایه رشته راه، باند فرودگاه و زیرسازی راه آهن سال ۱۳۸۷ محاسبه شده که در جداول (۴-۴) تا (۴-۱۱) نشان داده شده است.

جدول ۴-۴- هزینه سیستم نگهداری (فهرست‌بهای واحد پایه رشته راه، باند فرودگاه و زیرسازی راه آهن سال ۱۳۸۷)

نوع سیستم	واحد	بهای واحد (ریال)
حفاری، تهیه و نصب مصالح میل مهار سنگی تا قطر ۲۶ ^{mm} به طول ۳ متر و کمتر	متر طول	۹۶۶۰۰
تهیه بتن و بتن پاشی جداره تونل (شاتکریت) در هر متر مکعب به ضخامت ۱۰ ^{cm}	متر مربع	۷۲۹۰۰
تهیه بتن و بتن پاشی جداره تونل (شاتکریت) در هر متر مکعب به ضخامت ۱۵ ^{cm}	متر مربع	۱۰۴۰۰۰
تهیه بتن و بتن پاشی جداره تونل (شاتکریت) در هر متر مکعب به ضخامت ۲۰ ^{cm}	متر مربع	۱۴۳۵۰۰
تهیه بتن و بتن پاشی جداره تونل (شاتکریت) در هر متر مکعب به ضخامت ۲۵ ^{cm}	متر مربع	۱۷۴۰۰۰
تهیه بتن و بتن پاشی جداره تونل (شاتکریت) در هر متر مکعب به ضخامت ۳۰ ^{cm}	متر مربع	۲۰۵۰۰۰
تهیه شبکه میلگرد پیش جوش ساخت شده از میل گرد ساده به انضمام کار گذاشتن	کیلوگرم	۹۵۹۰
تهیه کلیه مصالح، حمل و ساخت و اجرای سیستم نگهداری فلزی	کیلو گرم	۱۳۰۰۰
هزینه خرید و اجرای الیاف فولادی	کیلوگرم	۱۳۵۰۰

جدول ۴-۵- مشخصات تیر آهن‌های ۱۶۰ و ۱۸۰

مشخصات	ضخامت	قیمت (ریال)
شاخه ۱۲ متری	۱۶۰	۱۸۶۰۰۰۰
شاخه ۱۲ متری	۱۸۰	۲۴۸۰۰۰۰

جدول ۴-۶- هزینه مربوط به سیستم نگهداری شماره ۱ برای یک متر از طول تونل

نوع سیستم نگهداری	هزینه (ریال)
۲۵ سانتی‌متر شاتکریت	۵۱۸۵۲۰۰
IPE ₁₈₀	۹۹۱۵۷۰۰
جمع	۱۵۱۰۰۹۰۰

جدول ۴-۷- هزینه مربوط به سیستم نگهداری شماره ۲ برای یک متر از طول تونل

نوع سیستم نگهداری	هزینه (ریال)
۳۰ سانتی متر شاتکریت	۶۱۰۹۰۰۰
IPE ₁₆₀	۷۸۱۷۰۰۰
جمع	۱۳۹۲۶۰۰۰

جدول ۴-۸- هزینه مربوط به سیستم نگهداری شماره ۳ برای یک متر از طول تونل

نوع سیستم	واحد	مقدار مورد نیاز برای ۱ متر مربع	قیمت واحد (ریال)	جمع (ریال)
مش فولادی جوش داده	کیلوگرم	۳	۹۵۹۰	۷۳۲۲۳۱۰
۲۰ سانتی متر شاتکریت	متر مربع	۱	۱۴۳۵۰۰	۴۲۷۶۳۰۰
جمع کل				۱۱۵۹۸۶۱۰

جدول ۴-۹- هزینه مربوط به سیستم نگهداری شماره ۴ برای یک متر از طول تونل

نوع سیستم نگهداری	میزان محتوای الیاف در هر مترمکعب	هزینه (ریال)
۲۰ سانتی متر شاتکریت	۴۰ کیلوگرم	۱۰۷۶۰۰۰۰
جمع		۱۰۷۶۰۰۰۰

جدول ۴-۱۰- هزینه مربوط به سیستم نگهداری شماره ۵ برای یک متر از طول تونل

نوع سیستم نگهداری	هزینه (ریال)
۱۰ سانتی متر شاتکریت	۲۱۷۲۴۲۰
بولت‌های تزریقی به طول ۳ متر و به فواصل ۱/۵×۱/۵	۳۷۶۷۴۰۰
جمع	۵۹۳۹۸۲۰

جدول ۴-۱۱- هزینه مربوط به سیستم نگهداری شماره ۶ برای یک متر از طول تونل

نوع سیستم نگهداری	هزینه (ریال)
۲۰ سانتی متر شاتکریت	۴۲۷۶۳۰۰
بولت‌های تزریقی به طول ۳ متر و به فواصل ۲×۲	۲۰۲۸۶۰۰
جمع	۶۳۰۴۹۰۰

برای امتیاز دهی سه معیار کیفی باقی مانده از تجربه کارشناسان استفاده شده است، بدین ترتیب که

برتری هر معیار نسبت به معیار دیگر به صورت یک عدد فازی مثلثی بیان شده است.

بعد از این که برای هر معیار با توجه به میزان برتری آن یک عدد فازی مثلثی در نظر گرفته شد،

میزان برتری هر معیار نسبت به معیار دیگر از تقسیم دو عدد فازی مثلثی نسبت به هم به دست می-

آید. هر یک از معیارها به وسیله یک ماتریس مقایسه زوجی نسبت به هم سنجیده می‌شوند و در

نهایت وزن نهایی هر معیار مشخص می‌شود، که ماتریس مقایسه زوجی معیارها تشکیل داده شده به صورت خواهد بود:

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
C_1	(1,1,1)	(1,1.28,1.67)	(1.3,1.8,2.5)	(1.6,2.3,3.4)	(2,3,5)	(2.7,4.5,10)
C_2	(0.6,0.77,1)	(1,1,1)	(1,1.4,2)	(1.2,1.75,2.67)	(1.5,2.3,5)	(2,3.5,8)
C_3	(0.4,0.56,0.75)	(0.5,0.72,1)	(1,1,1)	(0.8,1.25,2)	(1,1.67,3)	(1.33,2.5,6)
C_4	(0.3,0.44,0.63)	(0.38,0.57,0.83)	(0.5,0.8,1.25)	(1,1,1)	(0.75,1.3,2.5)	(1,2,5)
C_5	(0.2,0.33,0.5)	(0.25,0.43,0.67)	(0.33,0.6,1)	(0.4,0.75,1.33)	(1,1,1)	(0.67,1.5,4)
C_6	(0.1,0.22,0.37)	(0.13,0.28,0.5)	(0.17,0.4,0.75)	(0.2,0.5,1)	(0.25,0.67,1.5)	(1,1,1)

بعد از تشکیل ماتریس مقایسه زوجی، در ادامه برای محاسبه مقدار S_i ها ابتدا باید مقادیر $\sum_{j=1}^m M_{gi}^j$ که

عبارت است از مجموع اعداد هر سطر محاسبه شود، که به عنوان مثال برای سطر اول این مقدار برابر

با $(9/6, 13/84, 23/5)$ خواهد بود. سپس مقادیر $\left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m M_{gi}^j \right]$ که عبارت است از مجموعه اعداد کل

داخل ماتریس محاسبه می‌شود که مقدار آن برای ماتریس مقایسه زوجی معیارها برابر $(75/63)$.

$(27/71, 43/04)$ است. سپس مقدار معکوس مجموعه اعداد کل داخل ماتریس را در مجموع اعداد هر

سطر ضرب فازی می‌کنیم.

در نهایت مقادیر S_i برای هر یک از سطرهای ماتریس مقایسه زوجی طبق فرمول (4-2) برابر است با:

$$S_{C_1} = (9.6, 13.84, 23.5) \otimes (1/75.63, 1/43.04, 1/28.71) = (0.127, 0.321, 0.819)$$

$$S_{C_2} = (7.3, 10.76, 18.67) \otimes (1/75.63, 1/43.04, 1/28.71) = (0.097, 0.25, 0.65)$$

$$S_{C_3} = (5.03, 7.69, 13.75) \otimes (1/75.63, 1/43.04, 1/28.71) = (0.067, 0.179, 0.479)$$

$$S_{C_4} = (3.93, 6.15, 11.21) \otimes (1/75.63, 1/43.04, 1/28.71) = (0.052, 0.143, 0.390)$$

$$S_{C_5} = (2.85, 4.61, 8.5) \otimes (1/75.63, 1/43.04, 1/28.71) = (0.038, 0.107, 0.296)$$

$$S_{C_6} = (1.84, 3.07, 5.13) \otimes (1/75.63, 1/43.04, 1/28.71) = (0.024, 0.071, 0.179)$$

برای محاسبه درجه بزرگی عدد فازی $M_1 = (l_1, m_1, u_1)$ نسبت به عدد فازی $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ از رابطه (۴-۶) استفاده شده است برای مثال برای محاسبه $V(S_{c_2} \geq S_{c_1})$ دو مقدار $S_{c_2} = (0.097, 0.25, 0.65)$ و $S_{c_1} = (0.127, 0.321, 0.819)$ را در نظر می‌گیریم. همان طور که مشاهده می‌کنیم دو شرط اولیه رابطه (۴-۶) برقرار نیستند و در نتیجه مقدار $V(S_{c_2} \geq S_{c_1})$ از شرط سوم محاسبه می‌شود. به همین ترتیب سایر درجه بزرگی مقادیر S_i به طور مشابه محاسبه می‌شوند

که به شرح زیر خواهد بود:

$V(S_{c_1} \geq S_{c_2}) = 1$	$V(S_{c_2} \geq S_{c_1}) = 0.88$	$V(S_{c_3} \geq S_{c_1}) = 0.71$
$V(S_{c_1} \geq S_{c_3}) = 1$	$V(S_{c_2} \geq S_{c_3}) = 1$	$V(S_{c_3} \geq S_{c_2}) = 0.84$
$V(S_{c_1} \geq S_{c_4}) = 1$	$V(S_{c_2} \geq S_{c_4}) = 1$	$V(S_{c_3} \geq S_{c_4}) = 1$
$V(S_{c_1} \geq S_{c_5}) = 1$	$V(S_{c_2} \geq S_{c_5}) = 1$	$V(S_{c_3} \geq S_{c_5}) = 1$
$V(S_{c_1} \geq S_{c_6}) = 1$	$V(S_{c_2} \geq S_{c_6}) = 1$	$V(S_{c_3} \geq S_{c_6}) = 1$
$V(S_{c_4} \geq S_{c_1}) = 0.6$	$V(S_{c_5} \geq S_{c_1}) = 0.44$	$V(S_{c_6} \geq S_{c_1}) = 0.17$
$V(S_{c_4} \geq S_{c_2}) = 0.73$	$V(S_{c_5} \geq S_{c_2}) = 0.58$	$V(S_{c_6} \geq S_{c_2}) = 0.31$
$V(S_{c_4} \geq S_{c_3}) = 0.9$	$V(S_{c_5} \geq S_{c_3}) = 0.76$	$V(S_{c_6} \geq S_{c_3}) = 0.51$
$V(S_{c_4} \geq S_{c_5}) = 1$	$V(S_{c_5} \geq S_{c_4}) = 0.87$	$V(S_{c_6} \geq S_{c_4}) = 0.64$
$V(S_{c_4} \geq S_{c_6}) = 1$	$V(S_{c_5} \geq S_{c_6}) = 1$	$V(S_{c_6} \geq S_{c_5}) = 0.8$

سپس با توجه به فرمول (۴-۷) وزن‌های دارای تقدم به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$d'(C_1) = \min(1, 1, 1, 1, 1) = 1$$

$$d'(C_2) = \min(0.88, 1, 1, 1, 1) = 0.88$$

$$d'(C_3) = \min(0.71, 0.84, 1, 1, 1) = 0.71$$

$$d'(C_4) = \min(0.6, 0.73, 0.9, 1, 1) = 0.6$$

$$d'(C_5) = \min(0.44, 0.58, 0.76, 0.87, 1) = 0.44$$

$$d'(C_6) = \min(0.17, 0.31, 0.51, 0.64, 0.8) = 0.17$$

و در نهایت وزن نرمال شده معیارها در ماتریس‌های مقایسه زوجی محاسبه شده که نتایج آن در

جدول (۴-۱۲) درج شده است.

جدول ۴-۱۲- وزن نهایی معیارها

معیارها	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
هزینه	۱	۰/۲۶۳
ضریب اطمینان	۰/۸۸	۰/۲۳۲
کارایی	۰/۷۱	۰/۱۸۷
زمان	۰/۶	۰/۱۵۷
جابه‌جایی	۰/۴۴	۰/۱۱۶
قابلیت مکانیزاسیون	۰/۱۷	۰/۰۴۵

به همین ترتیب برای گزینه‌های موجود ماتریس‌های مقایسه زوجی تشکیل داده می‌شود و ۶ گزینه کاندید با توجه به معیارهای موجود نسبت به هم مقایسه می‌شوند.

ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها و معیار زمان

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
S_1	(1,1,1)	(0.67,1.5,4)	(0.25,0.43,0.67)	(0.2,0.33,0.5)	(0.33,0.6,1)	(0.3,0.6,1)
S_2	(0.25,0.67,1.5)	(1,1,1)	(1.3,0.27,0.5)	(1,0.22,0.38)	(0.17,0.4,0.75)	(0.17,0.4,0.75)
S_3	(1.5,2.3,4)	(2,3,5,8)	(1,1,1)	(0.6,0.78,1)	(1,1,4,2)	(1,1,4,2)
S_4	(2,3,5)	(2.7,4.5,10)	(1,1,3,1.7)	(1,1,1)	(1.3,1.8,2.5)	(1.3,1.8,2.5)
S_5	(1,1,7,3)	(1.3,2.5,6)	(0.5,0.72,1)	(0.4,0.56,0.75)	(1,1,1)	(1.3,1.8,2.5)
S_6	(1,1,7,3)	(1.3,2.5,6)	(0.5,0.72,1)	(0.4,0.57,0.75)	(0.67,1,1.5)	(1,1,1)

ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها و معیار کارایی

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
S_1	(1,1,1)	(0.67,1.5,4)	(0.33,0.6,1)	(0.33,0.6,1)	(0.2,0.33,0.5)	(0.25,0.43,0.67)
S_2	(0.25,0.67,1.5)	(1,1,1)	(0.17,0.4,0.75)	(0.17,0.4,0.75)	(0.1,0.22,0.38)	(0.13,0.29,0.5)
S_3	(1,1,7,3)	(1.3,2.5,6)	(1,1,1)	(0.6,1,1.5)	(0.4,0.56,0.75)	(0.5,0.7,1)
S_4	(1,1,7,3)	(1.3,2.5,6)	(0.6,1,1.5)	(1,1,1)	(0.4,0.56,0.75)	(0.5,0.7,1)
S_5	(2,3,5)	(2.7,4.5,10)	(1.3,1.8,2.5)	(1.3,1.8,2.5)	(1,1,1)	(1,1,3,1.7)
S_6	(1.5,2.3,4)	(2,3,5,8)	(1,1,4,2)	(1,1,4,2)	(0.6,0.78,1)	(1,1,1)

ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها و معیار هزینه						
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
S_1	(1,1,1)	(0.25,0.67,1.5)	(0.17,0.4,0.75)	(0.16,0.4,0.75)	(0.1,0.22,0.38)	(0.13,0.29,0.5)
S_2	(0.67,1.5,4)	(1,1,1)	(0.33,0.6,1)	(0.33,0.6,1)	(0.2,0.33,0.5)	(0.25,0.43,0.67)
S_3	(1.3,2.5,6)	(1,1.7,3)	(1,1,1)	(0.67,1,1.5)	(0.4,0.56,0.75)	(0.4,0.56,0.75)
S_4	(1.3,2.5,6)	(1,1.7,3)	(0.6,1,1.5)	(1,1,1)	(0.4,0.56,0.75)	(0.5,0.7,1)
S_5	(2.7,4.5,10)	(2,3,5)	(1.3,1.8,2.5)	(1.3,1.8,2.5)	(1,1,1)	(1,1.3,1.7)
S_6	(2,3.5,8)	(1.5,2.3,4)	(1,1.4,2)	(1,1.4,2)	(0.6,0.78,1)	(1,1,1)

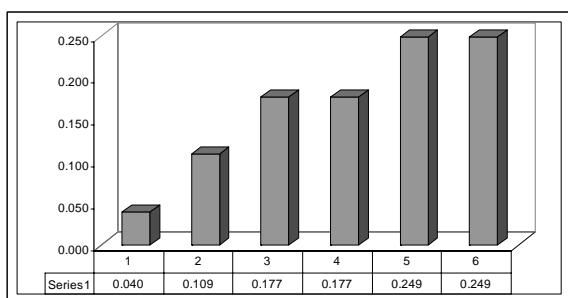
ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها و معیار جابه‌جایی						
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
S_1	(1,1,1)	(0.6,0.78,1)	(1,1.4,2)	(0.75,1,1.3)	(1.5,2.3,4)	(2,3.5,8)
S_2	(1,1.3,1.7)	(1,1,1)	(1.3,1.8,2.5)	(1,1.3,1.7)	(2,3,5)	(2.6,4.5,10)
S_3	(0.5,0.7,1)	(0.4,0.56,0.75)	(1,1,1)	(0.5,0.7,1)	(1,1.7,3)	(1.3,2.5,6)
S_4	(0.75,1,1.3)	(0.6,0.78,1)	(1,1.4,2)	(1,1,1)	(1.5,2.3,4)	(2,3.5,8)
S_5	(0.25,0.43,0.67)	(0.2,0.3,0.5)	(0.3,0.6,1)	(0.25,0.43,0.67)	(1,1,1)	(0.68,1.5,4)
S_6	(0.13,0.29,0.5)	(0.1,0.2,0.38)	(0.17,0.4,0.75)	(0.13,0.29,0.5)	(0.25,0.67,1.5)	(1,1,1)

ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها و معیار ضریب اطمینان						
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
S_1	(1,1,1)	(0.5,0.7,1)	(0.67,1,1.5)	(0.5,0.7,1)	(0.4,0.55,0.75)	(4,5,6)
S_2	(1,1.4,2)	(1,1,1)	(1,1.4,2)	(0.75,1,1.33)	(0.6,0.78,1)	(6,7,8)
S_3	(0.67,1,1.5)	(0.5,0.7,1)	(1,1,1)	(0.5,0.7,1)	(0.4,0.56,0.75)	(4,5,6)
S_4	(1,1.4,2)	(0.75,1,1.3)	(1,1.4,2)	(1,1,1)	(0.6,0.78,1)	(6,7,8)
S_5	(1.3,1.8,2.5)	(1,1.3,1.7)	(1.3,1.8,2.5)	(1,1.3,1.67)	(1,1,1)	(8,9,10)
S_6	(0.16,0.2,0.25)	(0.12,0.14,0.16)	(0.17,0.2,0.25)	(0.13,0.14,0.17)	(0.1,0.11,0.13)	(1,1,1)

ماتریس مقایسه زوجی بین گزینه‌ها و معیار قابلیت مکانیزاسیون

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
S_1	(1,1,1)	(0.33,1,3)	(0.25,0.68,1.5)	(0.1,0.22,0.38)	(0.13,0.29,0.5)	(0.17,0.4,0.75)
S_2	(0.33,1,3)	(1,1,1)	(0.25,0.67,1.5)	(0.1,0.22,0.38)	(0.13,0.29,0.5)	(0.17,0.4,0.75)
S_3	(0.67,1.5,4)	(0.67,1.5,4)	(1,1,1)	(0.2,0.33,0.5)	(0.25,0.43,0.68)	(0.33,0.6,1)
S_4	(2.7,4.5,10)	(2.6,4.5,10)	(2,3,5)	(1,1,1)	(1,1.3,1.7)	(1.3,1.8,2.5)
S_5	(2,3.5,8)	(2,3.5,8)	(1.5,2.3,4)	(0.6,0.79,1)	(1,1,1)	(1,1.4,2)
S_6	(1.3,2.5,6)	(1.3,2.5,6)	(1,1.7,3)	(0.4,0.56,0.75)	(0.5,0.71,1)	(1,1,1)

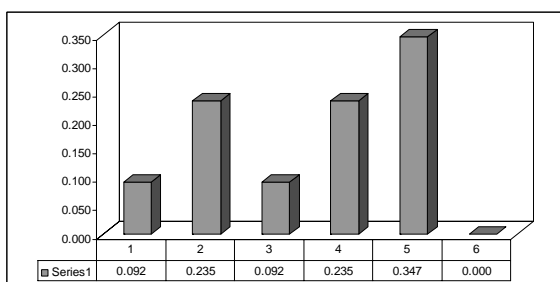
در ادامه وزن نهایی هر معیار نسبت به گزینه را محاسبه کرده که نتیجه نهایی در جداول (۴-۱۳) تا (۴-۱۸) نشان داده شده است. همچنین شکل‌های (۴-۳) تا (۴-۸) نمودار میله‌ای وزن گزینه‌ها را نسبت به هر معیار نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳- نمودار میله‌ای وزن گزینه‌ها نسبت به معیار هزینه

جدول ۴-۱۳- وزن نهایی گزینه‌ها نسبت به معیار هزینه

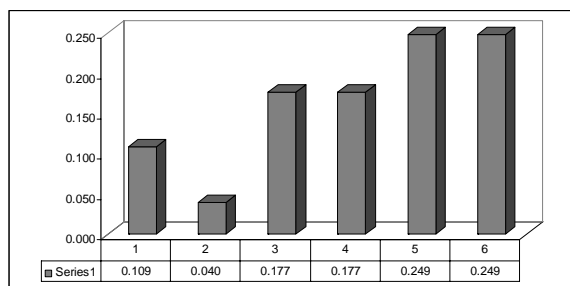
گزینه‌ها	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
A	۰/۱۶۰	۰/۰۴۰
B	۰/۴۳۷	۰/۱۰۹
C	۰/۷۱۰	۰/۱۷۷
D	۰/۷۱۰	۰/۱۷۷
E	۱	۰/۲۴۹
F	۱	۰/۲۴۹



شکل ۴-۴- نمودار میله‌ای وزن گزینه‌ها نسبت به معیار ضریب اطمینان

جدول ۴-۱۴- وزن نهایی گزینه‌ها نسبت به معیار ضریب اطمینان

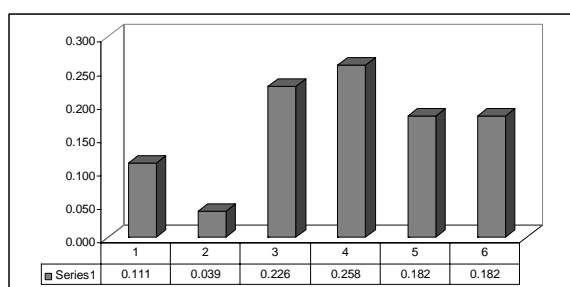
گزینه‌ها	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
A	۰/۲۴۹	۰/۰۹۲
B	۰/۶۷۸	۰/۲۳۵
C	۰/۲۶۴	۰/۰۹۲
D	۰/۶۷۸	۰/۲۳۵
E	۱	۰/۳۴۷
F	۰	۰



شکل ۴-۵- نمودار میله‌ای وزن گزینه‌ها نسبت به معیار کارایی

جدول ۴-۱۵- وزن نهایی گزینه‌ها نسبت به معیار کارایی

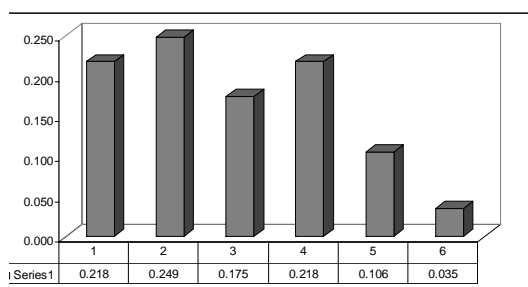
گزینه‌ها	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
A	۰/۴۳۷	۰/۱۰۹
B	۰/۱۶۰	۰/۰۴
C	۰/۷۱۰	۰/۱۷۷
D	۰/۷۱۰	۰/۱۷۷
E	۱	۰/۲۴۹
F	۱	۰/۲۴۹



شکل ۴-۶- نمودار میله‌ای وزن گزینه‌ها نسبت به معیار زمان

جدول ۴-۱۶- وزن نهایی گزینه‌ها نسبت به معیار زمان

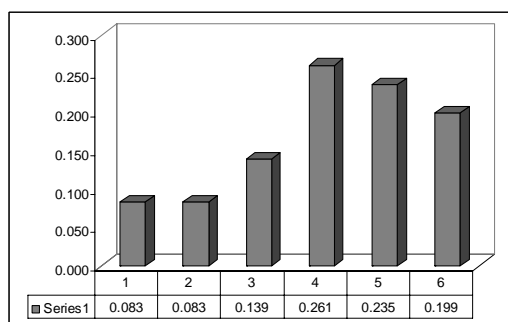
گزینه‌ها	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
A	۰/۴۳۲	۰/۱۱۱
B	۰/۱۵۳	۰/۰۳۹
C	۰/۸۷۸	۰/۲۲۶
D	۱	۰/۲۵۸
E	۰/۷۰۷	۰/۱۸۲
F	۰/۷۰۷	۰/۱۸۲



شکل ۴-۷- نمودار میله‌ای وزن گزینه‌ها نسبت به معیار جابه‌جایی

جدول ۴-۱۷- وزن نهایی گزینه‌ها نسبت به معیار جابه‌جایی

گزینه‌ها	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
A	۰/۸۷۷	۰/۲۱۸
B	۱	۰/۲۴۹
C	۰/۷۰۴	۰/۱۷۵
D	۰/۸۷۷	۰/۲۱۸
E	۰/۴۵۲	۰/۱۰۶
F	۰/۱۴۰	۰/۰۳۵



شکل ۴-۸- نمودار میله‌ای وزن گزینه‌ها نسبت به معیار مکانیزاسیون

جدول ۴-۱۸- وزن نهایی گزینه‌ها نسبت به معیار مکانیزاسیون

گزینه‌ها	وزن نرمال نشده	وزن نرمال شده
A	۰/۳۱۸	۰/۰۸۳
B	۰/۳۱۸	۰/۰۸۳
C	۰/۵۳۳	۰/۱۳۹
D	۱	۰/۲۶۱
E	۰/۹۰۱	۰/۲۳۵
F	۰/۷۶۱	۰/۱۹۹

امتیاز نهایی هر گزینه از جمع حاصل ضرب وزن نهایی معیارها در وزن نهایی هر معیار نسبت به گزینه‌ها به دست می‌آید. برای مثال وزن نهایی گزینه A به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W_E = (0.249 \times 0.263) + (0.249 \times 0.187) + (0.182 \times 0.157) + (0.106 \times 0.116) + (0.045 \times 0.235) = 0.244$$

وزن نهایی سایر گزینه‌ها محاسبه شده و در جدول (۴-۱۹) درج شده است.

جدول ۴-۱۹- امتیاز نهایی گزینه‌ها

گزینه‌ها	امتیاز نهایی
A	۰/۰۹۹
B	۰/۱۲۹
C	۰/۱۶۳
D	۰/۲۱۲
E	۰/۲۴۴
F	۰/۱۵۴

با توجه به جدول (۴-۱۹) سیستم نگهداری شماره پنج (E) دارای بیشترین امتیاز و در نتیجه به

عنوان سیستم نگهداری بهینه انتخاب می‌شود.

فصل پنجم

تحلیل احتمالاتی پایداری تونل

۵-۱- مقدمه

خاک و سنگ از جمله محیط‌های غیر همگن و ناهمسانگرد هستند که معمولاً توسط یک‌سری پارامترهای هندسی، مکانیکی و مقاومتی (وزن مخصوص، مدول یانگ، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و ...) تعریف می‌شوند. این احتمال وجود دارد که این پارامترها در دو نقطه مختلف مقادیر متفاوتی را نشان دهند. لذا تعریف آن‌ها (به دلیل خطاهای موجود) به طور دقیق امکان‌پذیر نیست. معمولاً پارامترها مقادیری را کسب می‌کنند که شناخت دقیق آن‌ها برای ما ممکن نیست. به یک نقطه در فضا ممکن است مقداری اختصاص یابد (مقداری از منحنی تغییرات پارامترها)، لذا لازم است پارامترها توسط یک فرآیند آماری تعریف شوند (Chodhury, 1987).

به دلیل این که نمی‌توان از این ابهامات به طور کامل چشم‌پوشی کرد، روش‌های مخصوصی برای محاسبه و یا مدیریت آن‌ها در ساخت انواع مدل‌ها به وجود آمده است. به خاطر غیر قابل تفکیک بودن ابهامات نسبت به محیط، می‌بایست در هنگام ورود به فرآیندهای آماری، به تحلیل رفتاری آن‌ها توجه شود و هیچ محاسبه دقیقی بر روی رفتار خاک و سنگ نباید بدون محاسبه تاثیر ابهامات ورودی در نتایج انجام پذیرد (Glaser and Doolin, 2000). از جمله روش‌های محاسبه تاثیر ابهامات ورودی می‌توان روش تحلیل حساسیت، حدود اطمینان (بررسی قابلیت اطمینان به روش محاسباتی)، محاسبه مستقیم خطاها در اطلاعات، تفسیر قضاوت‌های توصیفی و نظرات تخصصی را نام برد (Baecher et al, 2000).

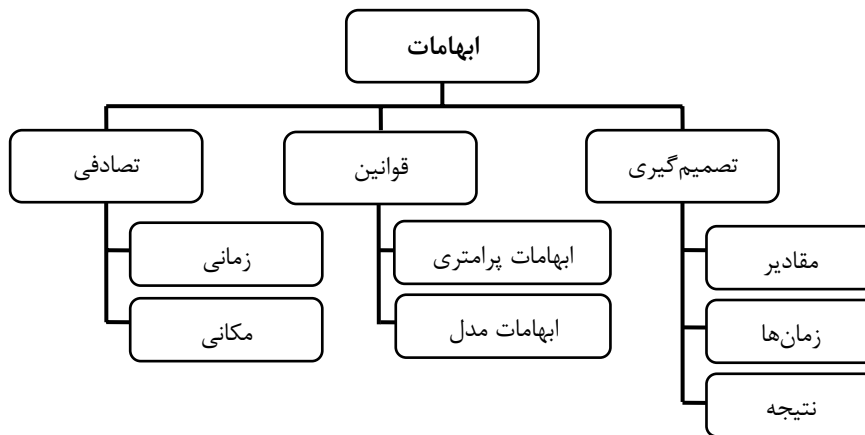
در دهه‌های اخیر علم احتمالات روش‌هایی را برای تحلیل ارائه کرده است. در این جا این سؤال مطرح می‌شود که چرا مهندسان ژئوتکنیک با توجه به شناخت اهمیت ابهامات تمایل چندانی به پذیرش روش‌های احتمالاتی در این موارد ندارند. برای این سؤال دو جواب قابل طرح است:

۱- وجود شک و تردید در مورد تحلیل‌های ریاضی، که آیا این تحلیل‌ها می‌توانند تکنیک‌های عملی مفیدی را ارائه دهند.

۲- سردرگم شدن در مورد نتایج احتمالاتی و چگونگی تفسیر کردن آن‌ها بصورت واضح و روشن.

۵-۲- انواع ابهامات

به طور تجربی بخشی از ابهامات به علت ماهیت تصادفی (طبیعی) متغیرها و بخش دیگر ناشی از شناخت محدود ما می‌باشد لذا ابهامات را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم نمود شکل (۵-۱).



شکل ۵-۱- انواع ابهامات (Baecher et al,2000)

۵-۲-۱- ابهامات تصادفی (طبیعی)

این ابهامات مربوط به بعضی از پارامترهای محیط یا سیستم مورد مطالعه و یا بعضی از پدیده‌هایی است که قرار است تولید شوند مانند میزان آب زیرزمینی، میزان بارندگی، مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در نقاط مختلف. به طور کلی ابهامات تصادفی شامل ابهامات زمانی و مکانی هستند.

۵-۲-۲- ابهامات قوانین

این ابهامات مربوط به عدم دقت روش‌های تخمین پارامترهای طبیعی (تصادفی) و یا بطور کلی عدم شناخت درست از آنچه باید مدل شود و پارامترهای مهم و موثر آن‌ها که به ابهامات شناختی (رفتار شناسی) معروف هستند. ابهامات قوانین به ابهامات مربوط به محاسبات برمی‌گردد و شامل ابهامات مدل و ابهامات پارامتری است (Ayyub and Chao, 1988).

الف) ابهامات مدل

این نوع از ابهامات عدم ظرفیت یک مدل را در معرفی رفتار فیزیکی دقیق سیستم مورد مطالعه و یا عدم ظرفیت تحلیل برای تعریف بهترین مدل مورد استفاده را معرفی می‌کند (Baecher et al, 2000).

ب) ابهامات پارامتری

این نوع از ابهامات در نتیجه عدم قابلیت محاسبه صحیح مقادیر کمی اطلاعات آزمایشگاهی و یا کالیبره کردن اطلاعات می‌باشد. تا قبل از این، اغلب ابهامات تصادفی در تحلیل‌های مهندسی مورد توجه و بررسی قرار گرفته است اما امروزه هر دو ابهام به طور دقیق مورد توجه قرار می‌گیرند.

۵-۲-۳- ابهامات تصمیم‌گیری

علاوه بر دو نوع کلی ابهامات ذکر شده به نوع سومی از ابهامات در بعضی از مراجع اشاره شده است که آن‌را ابهامات تصمیم‌گیری می‌نامند. در اغلب کاربردها اثر این نوع از ابهام تصمیم‌گیری مورد توجه قرار نگرفته است (Baecher et al, 2000). در شکل (۵-۱) به طور شماتیک انواع مختلف ابهامات معرفی شده است.

۵-۳- منابع ابهام (عدم قطعیت) در کارهای ژئوتکنیکی

به طور کلی مهم‌ترین منابع ابهام در کارهای ژئوتکنیکی عبارتند از (Malkawi et al, 2000):

الف) فرآیندهای تصادفی و طبیعی ذاتی.

ب) بازتاب ناتوانی مدل مورد استفاده برای شبیه‌سازی مانند عدم قابلیت شبیه‌سازی، روش طراحی و یا رابطه تجربی برای نشان دادن رفتار صحیح فیزیکی و مکانیکی.

ج) عدم قطعیت‌ها در معرفی پارامترهای مدل در نتیجه ناتوانی در کمی کردن و یا به حساب آوردن پارامترهای ورودی مدل.

د) عدم قطعیت‌های داده‌های ورودی شامل خطاهای اندازه‌گیری، ناهمگن بودن و ثابت نبودن داده‌ها و نیز دست‌کاری داده‌ها.

۵-۳-۱- روش‌های تحلیل ابهامات ژئوتکنیکی

روش‌های موجود برای تفسیر فرمولی ابهامات در تصمیم‌های مهندسی و استفاده از تجربه و عمل هنوز محدود می‌باشند. به هر حال روش‌های شناخته شده و استفاده شده در مدل‌سازی ژئوتکنیکی عبارتند از (Ayyub and Chao, 1998):

۱- تحلیل‌های احتمالاتی با وجود ابهامات تصادفی.

۲- تحلیل‌های منطق فازی در صورت وجود ابهامات ناشی از عدم دقت.

۳- تحلیل‌های ترکیبی منطق فازی و احتمالاتی وقتی هر دو ابهام در مدل موجود هستند.

۵-۴- ضرورت طراحی احتمالاتی

روش‌های مبتنی بر تحلیل‌های احتمالاتی برای تحلیل سیستم‌های دارای عدم قطعیت (ابهام) استفاده می‌گردد. اساس روش‌های طراحی احتمالاتی برای تعیین پایداری و عدم شکست این سیستم‌ها، شناخت و تشخیص آن دسته از فاکتورهایی است که در پایداری سیستم نقش دارند (Chowdhury et al, 1987).

پیشرفت و کاربرد روش‌های احتمالاتی در کارهای ژئوتکنیکی، به اندازه کارهای سازه‌ای عمرانی نیست یکی از دلایل آن را می‌توان مشکلات مربوط به بیان کمی و عددی یک توده سنگ و همچنین تعیین

یک مدل معرف برای تحلیل میزان نیروی مقاوم و بار اعمالی روی هر المان بنای (سازه) توده سنگ دانست (Park and West, 2001).

در تحلیل‌های احتمالاتی از روش‌هایی مشابه که در طراحی قطعی (تحلیل قطعی) استفاده می‌شود کمک گرفته شده است. همچنین مکانیزم‌های شکست و مدلی که چگونگی این شکست را توضیح دهد، باید شناخته شده باشند. در پاره‌ای از روش‌های تحلیل احتمالاتی احتمال شکست به صورت غیر مستقیم از طریق اندیسی به نام اندیس قابلیت اطمینان (β) به دست می‌آید که این اندیس با استفاده از ممان‌های آماری مقدار ضریب ایمنی تحلیل، محاسبه شود.

آنالیز پایداری تونل یک نوع مشکل مهندسی ژئوتکنیکی است که به وسیله منابع نامعین توصیف می‌شود. تعدادی از این منابع در ارتباط با خصوصیات نامعین هستند. به عبارت دیگر برای یک پروژه تونل واقعی بسیاری از این پارامترها به ویژه پارامترهای که خصوصیات توده سنگ را توصیف می‌کنند دارای صحت بالایی نیستند و از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کنند. بنابراین بسیار مفید خواهد بود که قادر باشیم یک توزیع آماری برای پارامترهای ورودی در نظر بگیریم.

نامعلومات و تغییرات در مطالعات مهندسی در رفتار طبیعی مواد اجتناب ناپذیر است. این غالب آمدن به این دلیل است که سنگ و خاک به طور ذاتی ناهمگن (ناجور) هستند. همچنین اطلاعات کافی از حالت اولیه و نوع مکانیزم شکست آن‌ها در دست نیست. بنابراین تلاش‌های بسیاری برای محدود کردن یا تعیین کمیت نامعلومات داده‌های ورودی و نتایج آنالیزها انجام شده است. در بسیاری از مسائل تحلیل پایداری دو راه برای تحلیل وجود دارد (Einstein and Baecher, 1983) و (Park and West, 2001):

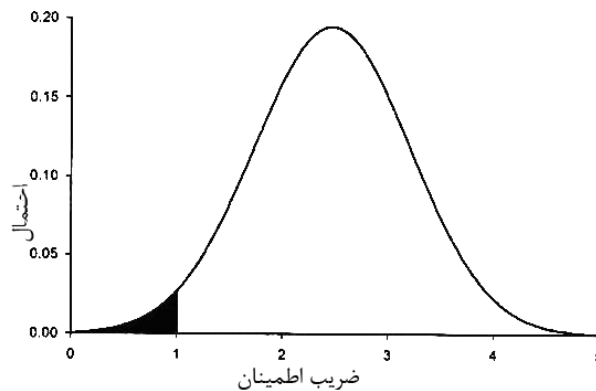
- روش‌های قطعی

- روش‌های احتمالی

در روش‌های قطعی فرض بر این است که همه متغیرهای ورودی دقیقاً شناخته شده هستند در نتیجه یک ضریب اطمینان منحصر به فرد (یگانه) برای سیستم محاسبه می‌شود.

در روش‌های احتمالی متغیرهای ورودی هر کدام دارای یک تابع توزیع هستند که در نتیجه ضریب اطمینان سیستم به صورت یگانه نخواهد بود و دارای یک تابع توزیع خواهد بود. از تابع توزیع، ضریب اطمینان احتمال شکست قابل محاسبه است. احتمال شکست در یک تحلیل پایداری از تقسیم تعداد تحلیل‌هایی که ضریب اطمینان در آن‌ها کمتر از یک است به کل تعداد تحلیل‌ها به دست می‌آید. برای مثال اگر ۱۰۰ تحلیل از ۱۰۰۰ تحلیل دارای ضریب اطمینان کمتر از یک باشند در این صورت احتمال شکست برابر با ۱۰٪ خواهد بود.

از نقطه نظر ریاضی طبق شکل (۵-۲) احتمال شکست برابر است با مساحت زیر نمودار توزیع احتمالی ضریب اطمینان در سمت چپ نقطه‌ای که ضریب اطمینان آن برابر یک است.



شکل ۵-۲- تعریف احتمال شکست از نقطه نظر ریاضی

اگر چه یک قانون تعریفی واضحی برای طراحی سیستم نگهداری تونل وجود ندارد، ولی در حال حاضر سه روش کلی در سال‌های اخیر پدیدار شدند (Park and West, 2001):

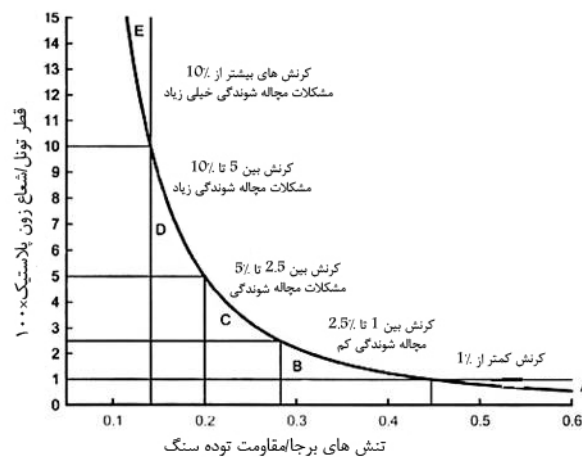
- روش حل بسته
- تحلیل‌های عددی^۱
- روش‌های تجربی^۲

^۱ numerical analysis

^۲ Empirical methods

این روش‌ها بر اساس مشاهدات تغییر شکل‌های تونل و کنترل این تغییر شکل‌ها با نصب سیستم نگهداری استوار است. هر کدام از این روش‌ها داری معایب و مزایایی هستند. برای به دست آوردن یک راه حل بهینه برای طراحی سیستم نگهداری گاهی از ترکیب این روش‌ها باید استفاده کرد. روشی که در این جا مورد استفاده قرار گرفته است وابسته به دسته‌ی اول روش‌های ذکر شده است.

همان طور که قبلاً گفته شد پایداری تونل در سنگ‌های ضعیف تابعی از نسبت مقاومت فشاری تک محوره‌ی توده سنگ به حداکثر تنش‌های درجا. این نسبت یک راهنمایی برای تخمین اولیه‌ی سیستم نگهداری مورد نیاز ارائه می‌دهد (Hoek, 1998). نتایج در شکل (۳-۵) خلاصه شده است.



شکل ۳-۵- رابطه‌ی تقریبی بین کرنش و گسترش تونل در سنگ‌های مچاله شونده (Hoek and marinos, 2000)

در این تحقیق از روش حل بسته‌ی دوکان-فاما^۱ (۱۹۹۳) استفاده شده است. این روش بر اساس معیار شکست موهر-کلمب استوار است و پارامترهایی که در این روش مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارت است از: (Hoek and Marinos 2000):

۱- تنش درجا

۲- زاویه اصطکاک

۳- مقاومت فشاری تک محوره سنگ

^۱ Ducan-Fama

۴- مدول یانگ توده سنگ

۵-نسبت پواسان

مقادیر این پارامترها برای تونل انتقال آب بهشت آباد در جدول (۵-۱) نشان داده شده است.

جدول ۵-۱- پارامترهای تونل انتقال آب بهشت آباد (هاشمی، ۱۳۸۷)

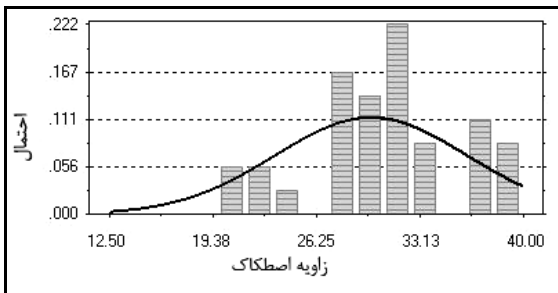
پارامترهای توده سنگ					تنش‌های برجا
نسبت پواسان	مدول الایسته (MPa)	UCS (MPa)	زاویه اصطکاک (Deg)	چسبندگی (MPa)	(MPa)
-	(MPa)	(MPa)	(Deg)	(MPa)	(MPa)
۰/۲۹	۳۳۲۰	۱۱	۲۷/۵	۳/۳۵	۴/۶۲
۰/۲۴	۵۴۳۵	۱۲	۳۰/۵	۳/۴	۶/۹
۰/۲۱	۲۰۸۰۰	۱۸	۳۴/۵	۴/۷	۵/۶۲
۰/۲۱	۲۰۸۰۰	۱۸	۳۴/۵	۴/۷	۸/۱۵
۰/۲۴	۵۴۳۵	۱۲	۳۰/۵	۳۱/۴	۱۶/۶۵
۰/۲۴	۱۸۳۰۰	۲۰/۵	۳۷/۵	۵/۱	۲۵/۸
۰/۲۸	۵۳۵۰	۹	۲۹/۵	۲/۶	۳۱/۱۶
۰/۲۳	۱۲۵۵۰	۲۳	۳۷	۵/۷	۱۹
۰/۳	۶۶۰۰	۶/۵	۳۱	۱/۸	۸/۵۱
۰/۲۳	۱۲۵۵۰	۲۳	۳۷	۵/۸۵	۷/۴۴
۰/۳	۸۱۵۰	۶/۵	۳۱	۲	۷/۴۳
۰/۲۶	۵۳۰۰	۲۴	۳۹	۰/۳۲۵	۸/۹۹
۰/۲۸	۵۰۰	۷	۳۱	۰/۵	۱۸/۷۱
۰/۴	۵۰۰	۱	۱۲/۵	۰/۹۵	۱۳/۵۳
۰/۳۸	۱۵۰۰	۱	۱۲	۰/۹۵	۱۶/۷۴
۰/۲۵	۱۵۰۰	۳/۵	۲۳	۱/۸	۱۵/۸
۰/۲۵	۱۵۵۰	۳/۵	۲۳	۱/۸	۱۵/۸
۰/۲۵	۱۵۵۰	۷	۳۲/۵	۱/۵	۱۰/۲۶
۰/۲۵	۱۰۶۵	۷	۳۲/۵	۲/۶۵	۱۰/۳۴
۰/۳	۵۵۵۰	۵	۲۹	۱/۶۵	۱۴/۵۵
۰/۲۷	۱۸۷۵	۸/۵	۳۱	۰/۷۲۵	۱۷/۲۹
۰/۲۸	۶۰۰	۵/۵	۲۴/۵	۰/۷۲۵	۱۹/۱
۰/۳۳	۶۰۰	۲	۲۰/۵	۳/۸۵	۱۹/۱
۰/۳۳	۹۵۵۰	۲	۲۰/۵	۲/۵	۱۲/۶۹
۰/۲۱	۳۶۰۰	۱۴/۵	۳۳/۵	۱/۹۵	۱۲/۶۳
۰/۲۵	۳۴۰۰	۸/۵	۲۹/۵	۵/۸	۱۷/۸۶
۰/۲۸	۱۱۱۰۰	۶/۵	۲۹	۱/۵۵	۱۴/۳
۰/۲۳	۳۰۰۰	۲۲/۵	۳۶/۵	۲/۵	۱۲/۵۴
۰/۲۹	۲۹۰۰	۵/۵	۳۰	۲/۵	۱۵/۵
۰/۲۹	۲۹۰۰	۹	۲۸/۵	۳/۷	۱۵/۵
۰/۲۹	۵۶۵۰	۹	۲۸/۵	۱/۳۱۵	۲۱/۱۵
۰/۲۷	۹۰۰	۱۳	۳۱	۳/۴۸۵	۲۱/۶
۰/۳۴	۸۵۰۰	۴/۵	۳۸/۵	۳/۴۸۵	۹/۱۸
۰/۲۵	۸۵۰۰	۱۳/۵	۳۲/۵	۰/۲۲	۱/۱

همان طور که مشاهده می‌شود پارمترهای توده سنگ تونل دارای تغییرات زیادی هستند و اختصاص یک مقدار واحد برای هر متغیر ورودی تقریباً غیر ممکن است. در واقع در روش‌های قطعی از یک میانگین متوسط برای متغیرهای ورودی استفاده می‌شود و در نتیجه یک ضریب اطمینان واحد برای همه تونل به دست می‌آید.

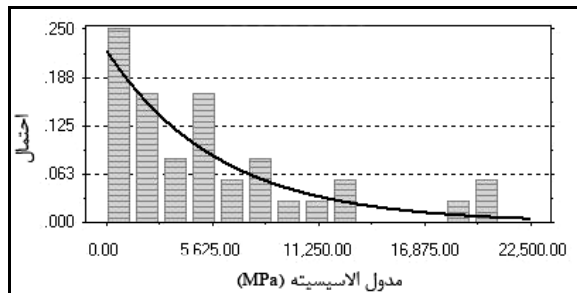
۵-۵- تحلیل احتمالاتی تونل انتقال آب بهشت آباد

از آنجایی که سیستم بهینه انتخاب شده توسط روش‌های تصمیم‌گیری بر اساس اطلاعات ژئوتکنیکی که دارای عدم قطعیت بوده، انجام شده است، برای به دست آوردن قابلیت اعتماد این سیستم برای کل مسیر تونل از روش تحلیل احتمالاتی استفاده شده است.

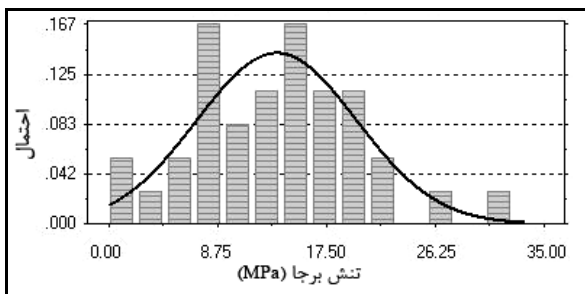
برای تحلیل احتمالاتی پایداری تونل ابتدا باید بهترین توزیع را که بر روی پارامترهای ورودی قرار می‌گیرد را پیدا کرده، برای رسیدن به این هدف از نرم‌افزار آماری Crystal Ball استفاده شده است. نتایج خروجی نرم‌افزار در شکل‌های (۴-۵) تا (۸-۵) نشان داده شده است. همچنین خلاصه آماری این توابع توزیع در جدول (۲-۵) آورده شده است.



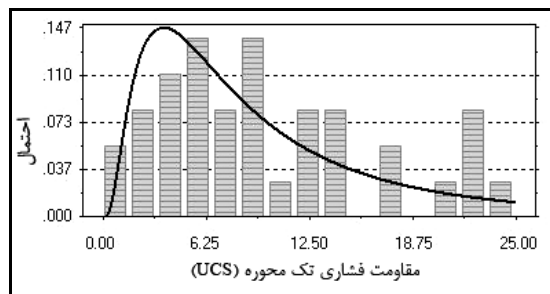
شکل ۵-۵- توزیع نرمال زاویه اصطکاک



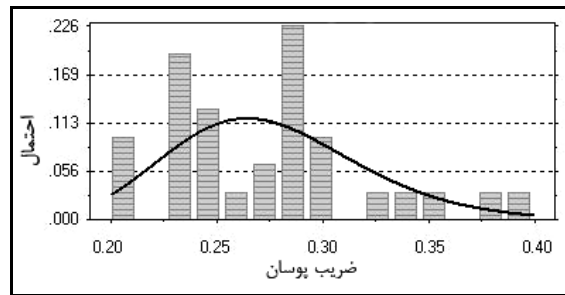
شکل ۴-۵- توزیع نمایی مدول الاستیسیته



شکل ۷-۵- توزیع نرمال تنش برجا



شکل ۶-۵- توزیع لوگ نرمال مقاومت فشاری تک محوره



شکل ۵-۸- توزیع لوگ نرمال نسبت پوسان

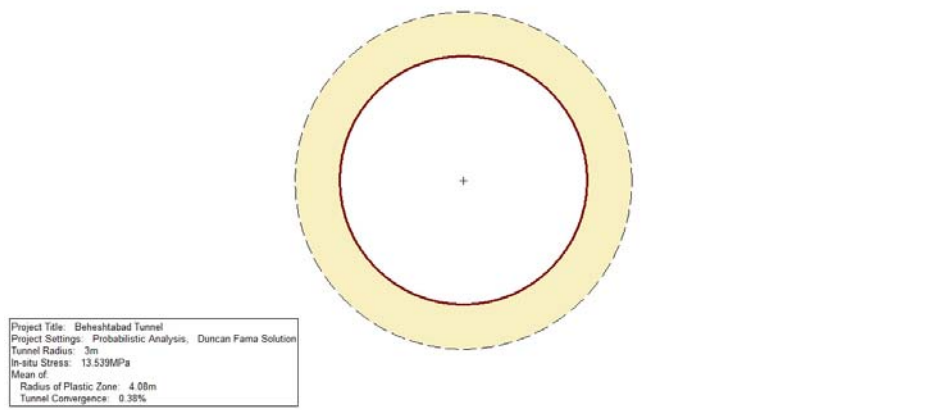
جدول ۵-۲- خلاصه آماری از توزیع پارامترهای تونل

پارامترها	مقدار میانگین	مقدار انحراف معیار
تنش برجا	۱۳/۵۳۹	۶/۴۵۹
زاویه اصطکاک توده سنگ	۲۹/۸۸۹	۶/۴۴۳
مقاومت فشاری تک محوره	۹/۹۵۸	۶/۷۵۴
مدول یانگ توده سنگ	۵۷۹۵/۳	۵۵۴۱/۶
ضریب پوسان توده سنگ	۰/۲۷۵	۰/۰۴۸

در این تحقیق برای تحلیل احتمالاتی پایداری تونل از نرم افزار Rocsupport استفاده شده است. فرضیاتی که در این نرم افزار استفاده شده است به قرار زیر است:

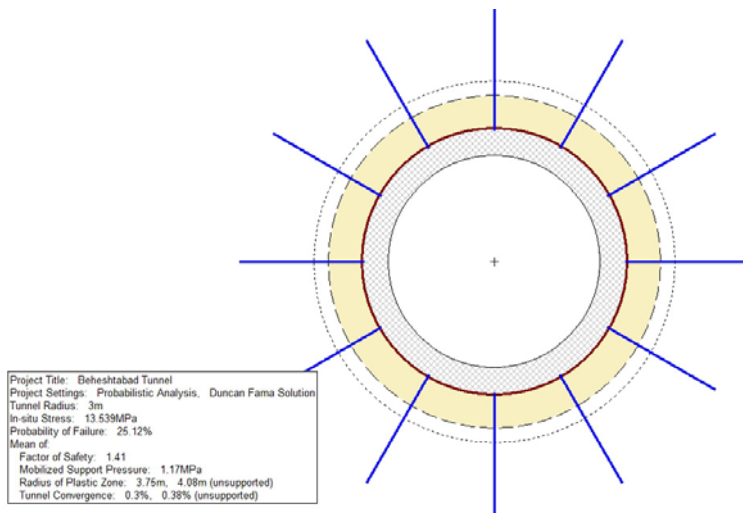
- هندسه تونل: در این تحلیل فرض می‌شود تونل با مقطع دایرایی به شعاع اولیه r_i است. طول تونل به گونه‌ای است که مسئله را می‌توان به صورت دو بعدی در نظر گرفت.
- حوضه تنش درجا: تنش‌های افقی و قائم برجا فرض می‌شود که با یکدیگر برابر بوده و مقدار آن مساوی P_r است.
- فشار حائل: حائل نصب شده فرض می‌شود فشار p_o را به صورت شعاعی و یکنواخت به دیوارها و جداره‌ی تونل اعمال کند.
- خصوصیات ماده سنگی در توده سنگ اصلی: توده سنگ اصلی فرض می‌شود الاستیک خطی بوده و توسط مدول یانگ E و ضریب پوسان ν مشخص می‌شود.
- خصوصیات توده سنگ شکسته: توده سنگ شکسته که تونل را در بر می‌گیرد فرض می‌شود پلاستیک کامل بوده.

- کرنش‌های حجمی: در منطقه الاستیک کرنش‌های حجمی توسط ثابت الاستیک E مشخص می‌شود. در لحظه خرابی و شکست کامل، سنگ اتساع خواهد یافت و کرنش‌های حجمی با استفاده از قانون جریان مرتبط در تئوری پلاسیسیته محاسبه می‌شود.
 - رفتار تابع زمان: فرض می‌شود که توده‌های سنگ اصلی و شکسته هیچ کدام رفتار زمان از خود نشان نمی‌دهند.
 - توسعه منطقه‌ی پلاستیک: فرض می‌شود که منطقه پلاستیک تا شعاع r_e توسعه یابد. که بستگی به فشارهای در جای p_o و فشار حائل p_i و خصوصیات مصالح سنگی الاستیک و پلاستیک هر دو را دارد.
 - تقارن شعاعی: در تمام بحث‌ها مسئله به صورت متقارن حول محور تونل تحلیل می‌شود. اگر وزن سنگ در منطقه شکسته در تحلیل منظور شود این تقارن ساده کننده از بین خواهد رفت. از آنجایی که وزن سنگ شکسته در تحلیل فوق العاده مهم است اثر وزن به طور تقریب بعد اتمام تحلیل اصلی اضافه خواهد شد (فهیمی‌فر، ۱۳۷۶).
- در شکل (۵-۹) مدل اولیه تونل انتقال آب بهشت آباد نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود مقدار متوسط تنش‌های برجا برابر $13/539$ مگا پاسکال به دست آمده است. همچنین مقدار همگرایی و شعاع منطقه پلاستیک به ترتیب برابر $0/38$ درصد و $4/08$ متر به دست آمده است.

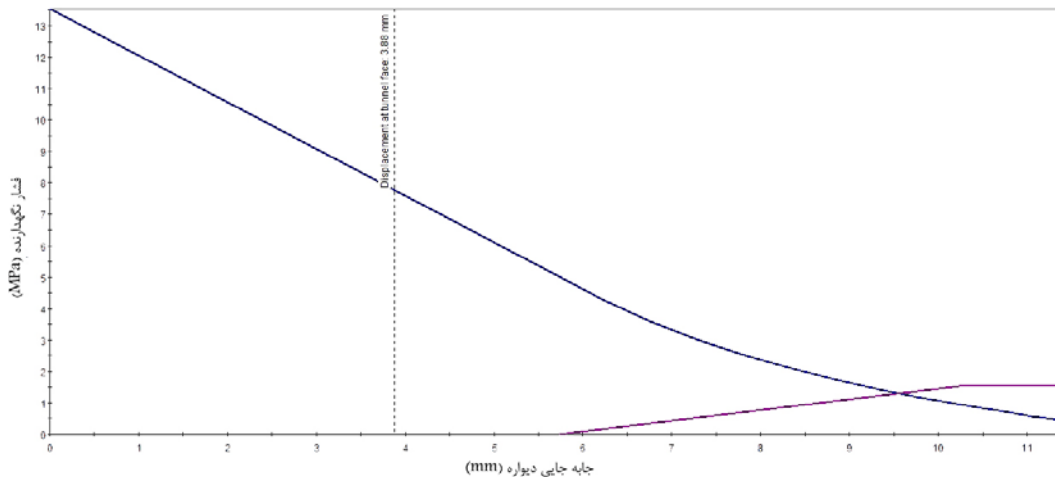


شکل ۵-۹- مدل اولیه تونل در نرم افزار Rocsupport قبل از نصب سیستم نگهداری

پس از ساخته شدن مدل اولیه سیستم نگهداری شماره ۵ (سیستم نگهداری بهینه) که عبارت بود از پیچ سنگ‌های تزریقی به طول ۳ متر و به فواصل $1/5 \times 1/5$ متر همراه با ۱۰ سانتی‌متر شاتکریت بر روی مدل اعمال می‌شود. شکل‌های (۵-۱۰) و (۵-۱۱) تغییر مدل اولیه تونل و منحنی مشخصه زمین پس از نصب سیستم نگهداری را نشان می‌دهد (در این نرم افزار از روش شبیه سازی مونت کارلو برای نمونه‌گیری استفاده شده است).

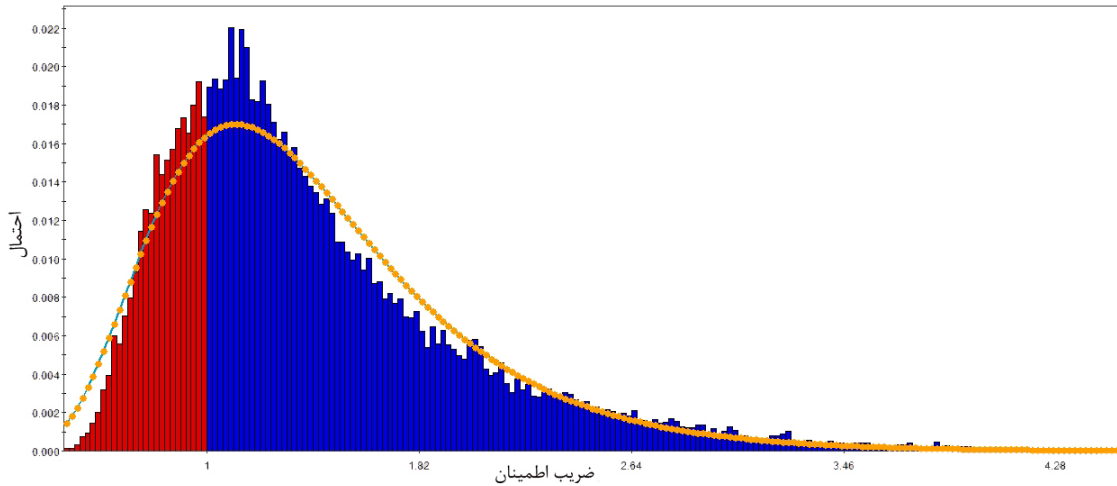


شکل ۵-۱۰ - تغییر زون پلاستیک بعد نصب سیستم نگهداری



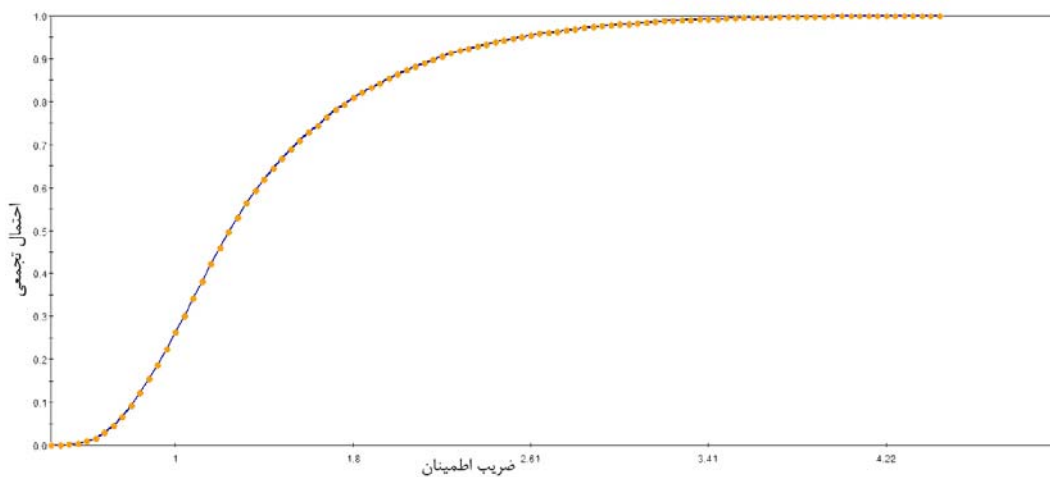
شکل ۵-۱۱ - منحنی مشخصه زمین بعد از نصب سیستم نگهداری

همان طور که در شکل (۵-۱۰) نشان داده شده بعد از نصب سیستم نگهداری مقدار همگرایی از ۰/۳۸ درصد به ۰/۳ درصد کاهش پیدا کرده است. همچنین مقدار زون پلاستیک از ۴/۰۸ به ۳/۴۵ متر کاهش یافته است.



شکل ۵-۱۲- نمودار تابع توزیع احتمال ضریب اطمینان

با توجه به شکل (۵-۱۲) احتمال شکست سیستم نگهداری بهینه برای کل مسیر طول تونل ۲۵/۱۲ درصد محاسبه شده است. همچنین مقدار متوسط ضریب ایمنی برای این سیستم نگهداری ۱/۴۱ با انحراف معیار ۰/۵۹ به دست آمده است. شکل (۵-۱۳) نمودار احتمال تجمعی ضریب اطمینان سیستم نگهداری پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۳- نمودار احتمال تجمعی ضریب اطمینان

۵-۶- تحلیل قابلیت اعتماد^۱

تحلیل قابلیت اعتماد شامل یک مجموعه روش‌هایی است که ابهامات را با استفاده از احتمال ریزش یا توزیع احتمالاتی تابع پایه^۲، مدیریت می‌کنند. روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد عدم قطعیت‌های پارامترهای ورودی را به مقدار خروجی تابع انتقال می‌دهند. این روش دارای دو مزیت است:

الف) طراح اجازه می‌یابد ابهامات را به روش منطقی در طراحی و محاسبات مدیریت کند و به صورت دقیق به تحلیل حساسیت متغیرهای متفاوت طرح بپردازد.

ب) تصمیم‌گیری‌ها به ندرت مطلوب هستند و این روش‌ها پایه منطقی‌تری را برای تصمیم‌گیری در یک تحلیلی که کاملاً قطعی است ایجاد می‌کنند.

در مفهوم اساسی تحلیل قابلیت اعتماد عوامل مقاوم و ناپایدارکننده ژئوتکنیکی، کمیت‌هایی آماری هستند که دارای یک مقدار مرکزی (متوسط) و یک پراکندگی (واریانس)، اطراف این متوسط هستند. در بعضی از روش‌های احتمالاتی پارامترهای آماری دیگری نیز برای تشریح بیشتر توابع توزیع متغیرهای ورودی لازم است مثل: چولگی، کشیدگی و ... که در واقع نشان دهنده ممان‌های آماری درجه سوم، چهارم و ... هستند.

بعضی مواقع یک اصطلاح برای تشریح محدوده هدف تعریف می‌شود (مثل ریزش، تخریب). مثلاً در مورد ضریب اطمینان اگر مقدار آن برابر با ۱ باشد احتمال ریزش برابر با احتمال ($SF < 1$) خواهد بود و قابلیت اعتماد^۳ نیز به صورت زیر است (Baecher et al, 2000).

$$Re = 1 - P_f \quad (۱-۵)$$

با توجه به رابطه بالا مقدار قابلیت اعتماد سیستم نگهداری بهینه برای کل طول تونل برابر است با:

$$Re = 1 - 0.2512 = 0.7488$$

^۱ Reliability analysis

^۲ Basic probabilistic distribution function

^۳ Reliability

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتایج

۱- هدف از ایجاد پوشش اولیه مناسب در تونل، پایدارسازی زمین و کنترل نیروهای ناشی از حرکات زمین می‌باشد که مؤثرترین روش پایدارسازی، دادن ترخیص تنش به محیط اطراف برای وقوع تغییر شکل‌های کنترل شده می‌باشد. در این تحقیق با رسم منحنی مشخصه زمین در مدل تفاضل محدود، میزان ترخیص تنش معادل با همگرایی به وجود آمده در مدل محاسبه و در ادامه پایداری مقطع با استفاده از روش ارزیابی ساکورایی مورد بررسی قرار گرفت و در پایان پوشش‌های اولیه مناسب با توجه به میزان گام پیشروی و فاصله پوشش تا سینه‌کار انتخاب شدند. در نهایت شش نوع سیستم نگهداری اولیه برای این تونل در نظر گرفته شد که عبارتند از:

۱. شاتکریت با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر و IP₁₈₀ است.
 ۲. شاتکریت با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر و IP₁₆₀ است.
 ۳. مش فولادی به قطر ۵ میلیمتر و شاتکریت با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر است.
 ۴. شاتکریت و الیاف فولادی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر است
 ۵. پیچ سنگ‌های تزریقی به طول ۳ متر و به فواصل $1/5 \times 1/5$ متر همراه با ۱۰ سانتی‌متر شاتکریت
 ۶. پیچ سنگ‌های تزریقی به طول ۳ متر و به فواصل 2×2 متر همراه با ۲۰ سانتی‌متر شاتکریت
- سپس پایداری سیستم‌های نگهداری اول تا چهارم توسط نرم‌افزار PCACol و سیستم‌های نگهداری پنجم و ششم توسط روش‌های تحلیلی مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- در ادامه با استفاده از روش FAHP و با توجه به شش معیار هزینه، ضریب اطمینان، زمان، قابلیت اجرا، جابه‌جایی و مکانیزاسیون از بین شش سیستم نگهداری پیشنهادی، سیستم نگهداری بهینه که عبارت است از پیچ سنگ‌های تزریقی به طول ۳ متر و به فواصل $1/5 \times 1/5$ متر همراه با ۱۰ سانتی-متر شاتکریت انتخاب شد.

۳- با توجه به این که انتخاب سیستم‌های نگهداری بر اساس پارامترهایی که دارای عدم قطعیت هستند، صورت گرفته است، برای بررسی قابلیت اعتماد سیستم نگهداری بهینه انتخاب شده در طول کل مسیر تونل، از روش احتمالاتی استفاده شده است. برای این هدف ابتدا با استفاده از نرم افزار Crystal Ball منحنی توزیع آماری مشخصات زمین رسم و با استفاده از نرم افزار Rocsupport احتمال شکست و قابلیت اعتماد سیستم نگهداری بهینه برای کل طول تونل محاسبه شده است که به ترتیب برابر $25/12$ درصد و $74/8$ درصد هستند.

۲-۶- پیشنهادات

۱- سه روش کلی برای طراحی سیستم‌های نگهداری وجود دارد که عبارتند از روش حل بسته، تحلیل-های عددی و روش‌های تجربی.

از آنجایی که روش‌های تجربی دارای دقت بالایی نیستند و مانند روش‌های حل بسته دارای فرضیات ساده‌کننده زیادی هستند پیشنهاد می‌شود در کنار این روش‌ها از روش‌های عددی برای طراحی‌ها استفاده شود تا بتوان یک طراحی ایمن و بهتری را ارائه کرد.

۲- با توجه به این که معیارهای زیادی در انتخاب سیستم نگهداری موثر هستند و یک آنالیز عددی نمی‌تواند همه این معیارها را در برداشته باشد، می‌توان در یک روند تصمیم‌گیری با استفاده از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره ارزیابی‌ها را به صورت علمی‌تری انجام داد. در این تحقیق از

روش FAHP استفاده شده است. پیشنهاد می‌شود از روش‌های دیگر تصمیم‌گیری چند معیاره مانند روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی^۱، تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی^۲ استفاده کرد.

۳- پارامترهای ژئوتکنیکی که به عنوان ورودی نرم‌افزارهای عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند، دارای دقت و صحت بالایی نیستند لذا انجام آزمایش‌ها و برداشت‌های مختلف زمین‌شناسی به منظور افزایش دقت پارامترهای ورودی پیشنهاد می‌شود. از طرفی به کارگیری سایر روش‌های احتمالاتی برای بیان میزان قابلیت اطمینان طراحی انجام شده توصیه می‌شود.

^۱ Fuzzy Topsis

^۲ Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process

فهرست مراجع

- اصغرپور م.ج، (۱۳۸۷)، "تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره"، انتشارات دانشگاه تهران
- آیین‌نامه بتن ایران (آبا)، (۱۳۷۹)
- بهنیا، بهنیا ک، (۱۳۷۳)، "بناهای زیرزمینی طراحی-اجرا-نگهداری"، انتشارات دانشگاه تهران
- فهرست بهای واحد پایه رشته راه، باند فرودگاه و زیرسازی راه آهن، ۱۳۸۷
- فهیمی فر، ا، (۱۳۷۶)، "سازه‌های زیرزمینی در سنگ"، انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان
- قدسی پور ح، (۱۳۸۱)، "فرآیند تحلیل سلسله مراتبی"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر
- کی‌نیا، ا. (۱۳۸۴). "نالیز و طراحی سازه‌های بتن آرمه"، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد اصفهان
- هاشمی م، (۱۳۸۶)، "گزارش مکانیک سنگ سیمای طرح پروژه آب رسانی به فلات مرکزی ایران"، مهندسان مشاوره زاینده آب

Ayyub B.M. and Chao R.J. (1998), "*Uncertainty modeling in civil engineering with structural and reliability application*", CRC Press LLC.

Baecher G.B., ASCE M., Christian J.T., Asce H.M., (2000), "*The concept of uncertainty in geotechnical reliability*"

Basarir H., (2006), "*Engineering geological studies and tunnel support design at Sulakyurt dam site*", Turkey, Engineering Geology 225–237

Carranza C.T and C. Fairhurst , (2000). "*Application of the Convergence-Confinement Method of Tunnel Design to Rock Masses That Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion*". Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, No. 2, pp. 187-213.

Chang D.Y., (1996). "*Application of the extent analysis method on fuzzy AHP*", European Journal of Operational Research, 95, 649-655.

- Chowdhury R.N., (1987), "*Practical aspects of probabilistic studies for slopes*", Soil slope instability and stabilization, Walker B.F., Fell R.A.A.Ballkema
- Chowdhury R. N., Tang W. H. et Sidi I. (1987), "Probability model of progressive slope failure." *Geotechnique*; 37(4) :467-481.
- Deng H., (1999). '*Multicriteria analysis whit fuzzy pair-wise comparison*', International Journal of Approximate Reasoning, 21, 215-231.
- Einstein, H.H. and Baecher, G.B., (1983). "*Probabilistic and statistical methods in engineering geology*"; specific methods and examples—Part 1: exploration. Rock Mech. Rock Eng. 16, 39– 72.
- Glaser S.D. and Doolin D.M., (2000), "*New directions in rock mechanics - report on a forum sponsored by the American Rock Mechanics Association*", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 37(4): pp.683-698.
- Hoek, E. (1998), "*Tunnel support in weak rock*". Proc. regional Symp. On Sedimentary Rock Engineering, Taipei, Taiwan, Nov 20-22, pp 1-12.
- Hoek, E. and Marinos, P. (2000), "*predicting tunnel squeezing*". Tunnels and Tunneling International. Part 1 – November 2000, Part 2 –December 2000.
- Itasca Consulting Group. (1992). Flac version 3. 0 User's manual, Minneapolis.
- Itasca Consulting Group. (1999). Flac version 4.10 User's manual, Minneapolis.
- Kahraman C., Cebeci U and Runa D., (2004). "*Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP*": the case of Turkey, International Journal of Production Economics, 87, 171-184.
- Kahraman C., Cebeci U. and Ulukan Z., (2003), "*Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP*", logistics information Management, 16(6), 382-349.

- Malkawi A.I., Husein and Hassan W.F., Abdulla F.A., (2000), "*Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability*", *Structural Safety*; 22 : 161-187.
- Park H. and West T.R., (2001), "*Development of a probabilistic approach for rock wedge failure*", *Engineering Geology*; 59: 233-251.
- Sakurai S., (1997), "*Lessons Learned from Field Measurements in Tunnelling*", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 453-460.
- Wang T.C. and Chen Y.H., 2007."*Applying consistent fuzzy preference relations to partnership selection*", *Omega, the International Journal of Management Science*, 35, 384-388.
- Yavuz M., Iphar M. and Once G. (2007), *The optimum support design selection by using AHP method for the main haulage road in WLC Tuncbilek colliery*, *Tunnelling and Underground Space Technology*.

پیوست الف: روش عددی تفاضل محدود (نرم افزار $FLAC^{2D}$)

ب-۱ مقدمه

روش‌های عددی برای تحلیل تنش در مسائل به دو دسته کلی تقسیم بندی می‌شوند:

۱- روش‌های مرزی^۱

در این روش تنها مرز حفره به المان‌هایی تقسیم می‌شوند و توده سنگ به عنوان یک محیط پیوسته نامحدود در نظر گرفته می‌شود.

۲- روش‌های ناحیه‌ای^۲

در این روش توده سنگ به المان‌هایی با خواص مخصوص به خود تقسیم می‌شود و از طریق رفتار کلی و اثر متقابل این المان‌ها، رفتار پیچیده توده سنگ مدل می‌شود.

روش‌های اجزاء محدود^۳ و تفاضل محدود^۴ جزء روش‌های ناحیه‌ای هستند که در آن‌ها توده سنگ

به عنوان یک محیط پیوسته در نظر گرفته می‌شود. روش المان مجزاء^۵ نیز یک روش ناحیه‌ای است که هر

بلوک مجزاء از سنگ را با المان مخصوص به خود مدل می‌کند. به منظور افزایش مزایا و کاهش معایب در

^۱- Boundary Methods

^۲-Domain Methods

^۳-Finite Element

^۴- Finite Difference

^۵- Distinct Element

هر روش می‌توان این دو دسته کلی را به صورت مدل‌های ترکیبی^۶ به کار برد. در روش‌های ناحیه‌ای جهت المان‌بندی توده‌سنگ، ایجاد شبکه مش‌بندی شده از الزامات این روش می‌باشد. در مدل‌های پیچیده مانند مدل کردن فضاها یا چندتایی این عمل بسیار مشکل می‌باشد. در مقابل در روش‌های مرزی تنها مرز حفره المان‌بندی می‌شود و توده سنگ اطراف به عنوان یک محیط پیوسته نامحدود در نظر گرفته می‌شود. بنابراین در روش مرزی، المان‌های کمتری مورد نیاز می‌باشد و احتیاج به حافظه بالای کامپیوتر، مهارت و تجربه کاربر کاهش می‌یابد. در روش‌های ناحیه‌ای باید مرز خارجی مدل به اندازه کافی از حفره فاصله داشته باشد تا خطا ناشی از اندرکنش مرز خارجی و حفره به حداقل قابل قبول کاهش یابد. از طرف دیگر از آنجایی که در روش‌های مرزی توده سنگ به عنوان یک محیط پیوسته نامحدود در نظر گرفته می‌شود، تنها لازم است تنش‌هایی که در داخل توده سنگ عمل می‌کنند مشخص شود و مرز خارجی نیاز نمی‌باشد.

ب-۲- روش تفاضل محدود

روش تفاضل محدود یکی از قدیمی‌ترین تکنیک‌های حل دسته معادلات دیفرانسیل با مقادیر مرزی می‌باشد. در روش تفاضل محدود هر مشتق در معادلات حاکم مستقیماً توسط یک عبارت جبری که تابع متغیرهای میدان (تنش و تغییر مکان در نقاط دلخواه در فضا) می‌باشد جایگزین می‌شود. روش معمول دیگر در حل معادلات دیفرانسیل روش اجزاء محدود است. در این روش مقادیر پارامترهای میدان در هر المان با بهره‌گیری از توابع ویژه^۷ که با پارامترهایی کنترل می‌شوند تغییر می‌کنند. فرمول‌بندی روش اجزاء محدود براساس مینیمم کردن انرژی محلی یا سراسری است. هر دو روش اجزاء محدود و تفاضل محدود مجموعه‌ای از

^۶- Hybrid Models

^۷- Shape Functions

معادلات جبری تولید می‌کنند. می‌توان نشان داد که در حقیقت هر دو روش از یک فرم ضعیف^۸ شده با توابع وزنی^۹ مختلف به دست می‌آیند.

ب-۳- نرم افزار FLAC

واژه *FLAC* از عبارت *Fast Lagrangian Analysis of Continua* که به معنی تحلیل سری لاگرانژی محیط می‌باشد گرفته شده است. این برنامه را دکتر پتر کاندل^{۱۰} در سال ۱۹۸۶ جهت انجام تحلیل‌های مهندسی با میکرو کامپیوترها، توسعه داد. *FLAC* یک نرم‌افزار تفاضل محدود صریح^{۱۱} می‌باشد که توانایی مدل کردن رفتار خاک، سنگ یا دیگر مصالحی که ممکن است وقتی به حد تسلیم برسند جریان پلاستیک پیدا کنند را دار می‌باشد. مصالح به وسیله المان‌ها یا زون‌هایی که یک شبکه را تشکیل می‌دهند نمایش داده می‌شوند که نهایتاً کاربر با استفاده از این شبکه، شکل سازه مورد نظر را که می‌بایست مدل شود ایجاد می‌نماید. هر المان مطابق قانون تنش- کرنش خطی یا غیرخطی از قبل تعریف شده، در عکس‌العمل با بارها یا مرزهای گیردار، رفتار می‌کند. اگر تنش‌ها یا گرادیان تنش به قدر کافی زیاد باشد به طوری که باعث تسلیم و جاری شدن مصالح شود، شبکه می‌تواند تغییر شکل پیدا کند (در حالت کرنش بزرگ^{۱۲}) و با مصالح تشکیل شده حرکت نماید. *FLAC* بر پایه روند محاسباتی لاگرانژی بنا نهاده شده است که جهت مدل کردن تغییر شکل‌های بزرگ، به خوبی مناسب می‌باشد. همچنین نرم‌افزار *FLAC* دارای چندین مدل رفتاری داخلی^{۱۳} است که امکان شبیه‌سازی مصالح خطی را نیز میسر می‌سازد.

مدل‌های رفتاری در برنامه *FLAC* عبارتند از:

^۸- Weak Form

^۹- Weighted Residual Methods

^{۱۰}- Peter Cundall

^{۱۱}- Explicit Finite Difference

^{۱۲}- Large- Strain Mode

^{۱۳}- Built-In Constitutive Models

۱- مدل الاستیک، ایزوتروپ^{۱۴}

۲- مدل الاستیک، ایزوتروپ- صفحه ای^{۱۵}

۳- مدل پلاستیک موهر- کلمب^{۱۶}

۴- مدل درزه‌دار^{۱۷}

۵- مدل سخت شونده‌گی و نرم شونده‌گی^{۱۸}

۶- مدل تسلیم مجدد^{۱۹}

مراحل محاسباتی برنامه FLAC^{2D} بدین صورت است که ابتدا با استفاده از معادلات حرکت، سرعت‌ها و جابه‌جایی‌های ناشی از نیروها و تنش‌ها به دست می‌آیند. سپس نرخ‌های کرنش از سرعت‌ها و تنش‌های جدید از نرخ‌های کرنش محاسبه می‌شوند و این یک پله زمانی^{۲۰} برای هر سیکل می‌باشد و در هر مرحله تمام مقادیر قبلی با مقادیر جدید جایگزین می‌شوند. تصور بعضی بر آن است که روش تفاضل محدود به شبکه‌های المانی مستطیلی محدود می‌شود که در واقع چنین نیست. ویلکینز^{۲۱} در سال ۱۹۶۴ روشی را برای به دست آوردن معادلات تفاضل محدود برای المان‌هایی با شکل دل‌خواه ارائه کرده است. (این روش در برنامه FLAC استفاده شده است) که با استفاده از آن می‌توان المان‌هایی با شکل دل‌خواه داشت و هر المان می‌تواند مصالحی با خصوصیات مخصوص خودش داشته باشد (همانند روش اجزاء محدود). از آنجائی‌که در روش حل صریح نیاز به تشکیل ماتریس سختی کل نمی‌باشد. یک موضوع جزئی در مد

¹⁴- Elastic Isotropic

¹⁵- Elastic Transversely Isotropic

¹⁶- Mohr-Coulomb Plasticity

¹⁷- Ubiquitous Joint

¹⁸- Strain Hardening\Softening

¹⁹- Double-Yield (Experimental)

²⁰- Time Step

²¹- Wilkins

کرنش بزرگ، به‌هنگام‌کردن^{۲۲} مختصات در هر پله زمانی است. جابه‌جایی‌های تدریجی به مختصات‌ها افزوده می‌شوند به‌طوری‌که شبکه به‌همراه مصالح حرکت کند و تغییر شکل دهد این اصطلاحاً یک فرمولاسیون لاگرانژی است. در مقابل در یک فرمولاسیون اویلری^{۲۳} مصالح نسبت به یک شبکه ثابت حرکت می‌کنند و تغییر شکل می‌دهند (Itasca 1992).

²² - Update
²³ -Eulerian

پیوست ب: روش همگرایی - همجواری

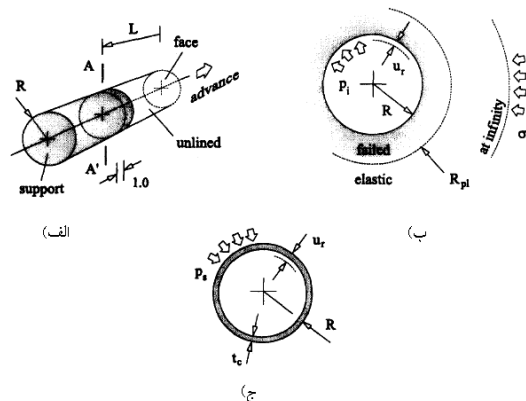
الف-۱ مقدمه

تخمین نگهداری مورد نیاز برای پایدارسازی تونل، در اصل یک مساله چهاربعدی می‌باشد که به کاهش مقاومت وابسته به زمان سنگ‌ها، توزیع مجدد سه‌بعدی نیروهای اطراف فضای حفاری و طبیعت غیر قابل اطمینان سنگ تا زمانی که تحت تأثیر سینه‌کار است بستگی دارد در چنین شرایطی روش همگرایی- همجواری چنین امکانی را برای ما فراهم می‌آورد. این روش اغلب جهت تخمین بار روی نگهداری پشت سینه‌کار استفاده می‌شود. وقتی سیستم نگهداری بلافاصله در نزدیکی سینه‌کار تونل نصب می‌شود، همه بار روی این سیستم منتقل نمی‌شود، بلکه قسمتی از بار که در اطراف حفاری توزیع مجدد یافته، توسط خود سینه‌کار تحمل می‌شود. با پیشروی تونل تأثیر سینه‌کار^{۲۴} کاهش می‌یابد و سیستم نگهداری باید مقدار بیش‌تری از بار را که قبلاً توسط سینه‌کار تحمل می‌شد تحمل کند. وقتی سینه‌کار به اندازه کافی از نگهداری دور می‌شود، تمام بار توسط نگهداری تحمل می‌شود که به آن بار کامل طراحی^{۲۵} گفته می‌شود. مسأله فوق در شکل (الف-۱-الف) تشریح شده است. همان‌طوری که در این شکل نشان داده شده است تونلی به شعاع R در داخل توده سنگی با میدان تنش اولیه یکنواخت حفر شده است و نگهداری دایره‌ای شکلی در مقطع A-A' که در فاصله L از سینه‌کار قرار دارد، نصب شده است (فرض شده که نگهداری در

²⁴ - Face effect

²⁵ -full design load

جهت محور تونل طول واحد دارد). متغیرهایی که در تحلیل وجود دارد در شکل (الف-۱-ب) نشان داده شده است این شکل در واقع مقطعی از حفاری را در موقعیت A-A' نشان می‌دهد، که در آن σ_0 مبین تنش میدان دور هیدرواستاتیک اعمالی بر توده سنگ و R_{pl} شعاع گسترش منطقه شکست (یا زون پلاستیک) در اطراف تونل می‌باشد. برای ساده‌سازی مسأله فرض شده است که تمام تغییر شکل‌ها در صفحه عمود بر محور تونل رخ می‌دهند (مسأله کرنش صفحه‌ای است). در عین حال u_r جابه‌جایی شعاعی و p_i فشار یکنواخت اندرکنش نگهداری روی دیواره‌های تونل را نشان می‌دهد. شکل (الف-۱-ج) مقطعی از نگهداری حلقوی دایره‌ای شکل به ضخامت t_c و شعاع خارجی R را نشان می‌دهد، که در مقطع A-A' نصب شده است. فشار یکنواخت p_s مبین بار منتقل شده توسط توده سنگ به نگهداری است، u_r نشان دهنده جابه‌جایی است که توسط p_s ایجاد می‌شود. برای سازگاری جابه‌جایی‌ها در سطح مشترک سنگ-نگهداری، جابه‌جایی شعاعی نگهداری باید مساوی با جابه‌جایی شعاعی دیواره سنگی تونل u_r باشد.



شکل الف-۱-الف) تونل استوانه‌ای شکل به شعاع R حفر شده در داخل توده سنگ. ب) سطح مقطع توده سنگ در مقطع A-A'.
ج) سطح مقطع نگهداری دایره‌ای شکل نصب شده در مقطع A-A'.

اساس روش همگرایی-همجواری در شکل‌های (الف-۲-ا) تا (الف-۲-ج) تشریح شده است. در موقعیت زمان شروع t وقتی که پوشش در مقطع A-A' به فاصله L از سینه‌کار نصب شده است، همگرایی شعاعی زمین به مقدار u_r^0 است. اگر جبهه‌کار حفاری پیشروی نکرده باشد فرض می‌شود که توده سنگ باری را

برروی پوشش منتقل نمی‌کند، یعنی در این مرحله $p_s^0 = 0$ است (شکل الف-۲-ا). (کاهش مقاومت

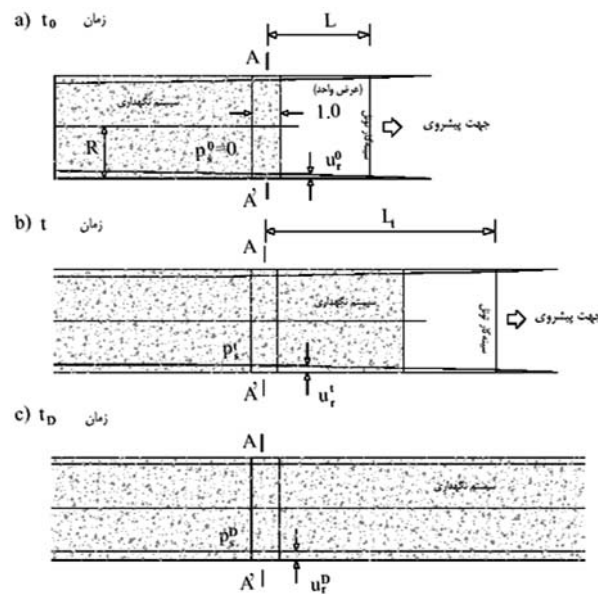
سنگ‌ها با زمان و تغییر شکل‌های وابسته به زمان در این تحلیل بررسی نشده‌اند)

با پیشروی تونل به سمت راست، زمین و نگهداری با هم تغییر شکل می‌یابند و نگهداری قسمتی از باری

که سینه‌کار قبلاً تحمل می‌کرد را دریافت می‌کند. شکل (الف-۲-ب) این وضعیت را نشان می‌دهد. در زمان

t وقتی مقطع در فاصله L_t از سینه‌کار قرار دارد مقدار همگرایی زمین $u_r^t > u_r^0$ و مقدار فشار منتقل شده

از توده سنگ بر روی نگهداری p_s^t است.



شکل الف-۲-اعمال بار بر روی نگهداری نصب شده مقطع A-A' در نتیجه پیشروی سینه‌کار تونل

وقتی جبهه‌کار تونل به اندازه کافی به سمت جلو پیشروی کرد شکل (الف-۲-ج)، سیستم زمین و نگهداری

در مقطع A-A' به تعادل می‌رسند و نگهداری بار نهایی (یا بار طراحی) p_s^D را تحمل می‌کند. در زمان t_D

تأثیر سینه‌کار از بین رفته، زمین و نگهداری با هم به مقدار نهایی u_r^D همگرا شده‌اند. از شکل (الف-۲)

می‌توان دریافت که تعیین بار منتقل شده روی نگهداری نیاز به تحلیل اندرکنش بار- تغییر شکل المان‌های در برگیرنده سیستم دارد. سه مؤلفه اساسی روش همگرایی- همجواری موارد زیر هستند:

۱- پروفیل تغییر شکل طولی^{۲۶} LDP

۲- منحنی اندرکنش زمین^{۲۷} GRC

۳- منحنی مشخصه نگهداری^{۲۸} SCC

منحنی LDP نمایش گرافیکی جابه‌جایی شعاعی است که در طول محور حفاری استوانه‌ای شکل بدون نگهداری به‌وقوع می‌پیوندد، برای مقطع جلو و پشت سینه‌کار رسم می‌شود. مانند آن‌چه که در دیاگرام بالایی شکل الف-۳ رسم شده است.

محور افقی فاصله (X) مقطع آنالیز شده را از سینه‌کار تونل نشان می‌دهد، محور عمودی جابه‌جایی شعاعی u_r متناظر با آن است. دیاگرام نشان می‌دهد که در فاصله‌ای از پشت سینه‌کار تونل تأثیر سینه‌کار خیلی جزئی بوده بنابراین در فاصله بیشتر از این مقدار مقطع تونل بدون نگهداری به مقدار نهایی خود u_r^M همگرا خواهد شد. به‌طور مشابه در فاصله‌ای از جلوی سینه‌کار پیشروی تونل تأثیری بر روی توده سنگ نخواهد داشت و جابه‌جایی شعاعی صفر است.

منحنی GRC بیان‌گر رابطه بین کاهش فشار داخلی p_i و افزایش جابه‌جایی شعاعی دیواره‌ها u_r است، این روابط به خواص مکانیکی توده سنگ بستگی دارد، که از حل الاستوپلاستیک تغییر شکل‌های اطراف تونل به‌دست می‌آید. GRC به‌صورت منحنی OEM است در دیاگرام پایین شکل (الف-۳) نشان داده شده است، از نقطه O جایی که فشار داخلی p_i برابر با تنش اولیه σ_o تا نقطه M مطابق با محلی که فشار

²⁶- Longitudinal Deformation Profile

²⁷- Ground Reaction Curve

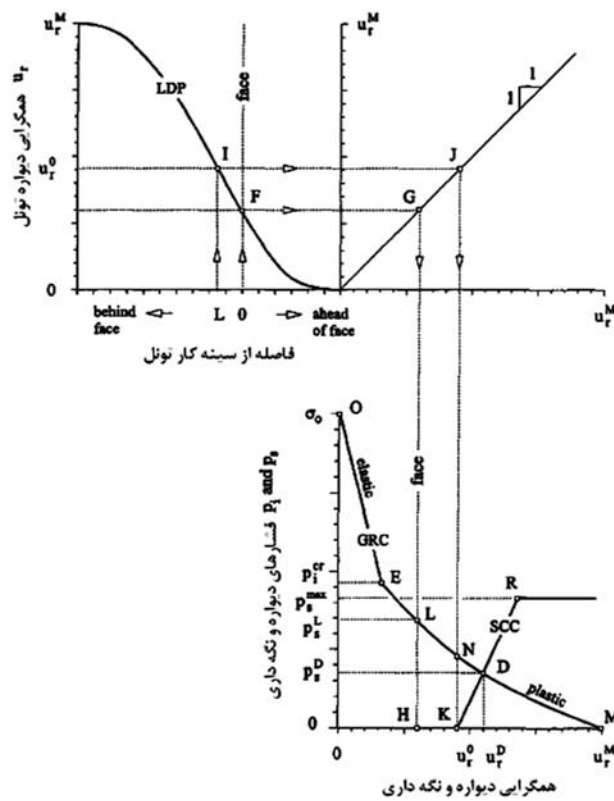
²⁸- Support Characteristic Curve

داخلی برابر با صفر و جابه‌جایی شعاعی ماکزیمم مقدار u_r^M خود را داراست گسترش یافته است. نقطه E فشار داخلی p_i^{cr} نشان می‌دهد، که در آن همگرایی متناظر به حد الاستیک سنگ در دیواره تونل رسیده است. اگر فشار داخلی کم‌تر از این مقدار باشد منطقه شکسته شده تا مقدار R_{pl} در اطراف تونل گسترش می‌یابد (شکل الف-۱-ب).

منحنی مشخصه نگهداری SCC به‌طور مشابه، به‌صورت روابط بین افزایش فشار p_s بر روی نگهداری و افزایش جابه‌جایی شعاعی نگهداری تعریف می‌شود. این روابط به مشخصات هندسی و مکانیکی نگهداری وابسته است. SCC به‌صورت منحنی KR در دیاگرام پایین شکل (الف-۳) نشان داده شده است. نقطه K متناظر با فشار نگهداری صفر یعنی بالافاصله بعد از نصب سیستم نگهداری و نقطه R متناظر با فشار p_s^{Max} است، که گسیختگی در نگهداری را باعث می‌شود است.

بررسی روابط موجود بین LDP، GRC و SCC به ما این امکان را می‌دهد تا فشار p_s را که زمین به نگهداری با پیشرفت سینه‌کار منتقل می‌کند را به‌دست آوریم. نصب نگهداری در مقطع A-A' در زمان t_0 در شکل الف-۲ متناظر با نقطه I در روی پروفیل تغییر شکل طولی LDP (شکل الف-۳) با مختصات $X=L$ و $u_r = u_r^0$ است. نقطه J در سمت راست دیاگرام بر روی محور افقی برابر با مقدار $u_r = u_r^0$ است و متناظر با نقطه K در روی منحنی مشخصه نگهداری SCC است. در صورتی که سینه‌کار پیشروی نکند پایداری توسط سینه‌کار برقرار می‌شود و کل بار توزیع مجدد یافته در اثر حفاری را سینه‌کار تحمل می‌کند، بنابراین جزء قائم KN در دیاگرام پایین شکل الف-۳ مطابق با فشاری است که توسط سینه‌کار در زمان t_0 تحمل می‌شود. با پیشروی سینه‌کار نگهداری و تونل هر دو به یک اندازه تغییر شکل می‌یابند، فشار p_s روی نگهداری افزایش می‌یابد و تأثیر محدود کننده p_i کاهش پیدا می‌کند. در زمان t_D در شکل

(الف-۲-ج) وقتی تأثیر نگهدارنده سینه کار به طور کامل محو شده است، سیستم در نقطه D یعنی در محل تقاطع GRC و SCC به تعادل می‌رسد (شکل الف-۳). فشار p_s^D که برای نقطه D تعریف می‌شود، نشان دهنده فشار نهایی (یا فشار طراحی)^{۲۹} است، که توسط توده سنگ به نگهداری منتقل می‌شود (C. Carranza-Torres and C. Fairhurst, 2000).



شکل الف-۳- طرح شماتیکی از منحنی‌های LDP، GRC و SCC.

²⁹- Design load

Abstract

In this study, selection of optimum primary support system was investigated for Beheshtabad water transporting tunnel. Beheshtabad water transporting tunnel approximately with 65 kilometers length and 6 meters width is one of the biggest water supplying project for transporting water to central plateau of Iran. The most important properties that effect on the tunneling operation are the weak constructions of tunnel and issues under the water table. Selection a suitable support system in order to stability of rock mass and reduction of plasticity zone around the tunnel area is the most important issue of this project designing. In this study 6 types of support system has been considered as a possibility option for this tunnel and by using FLAC2D software amount of displacement and safety factor for each of the option is calculated. Then by using fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP) and by considering six criteria include cost, safety factor, time, applicability factor, displacement and mechanization, the optimum support system has been selected. In this study we showed that injection rock bolt with 3 meter in length and $1/5 \times 1/5$ spacing with 10 centimeter shotcrete is the best support system for this tunnel. Then the statistical distribution curve of ground profile is drawn by using Crystal Ball software also by using Rocsupport software probability of failure and reliability of system has been calculated. They were 25.12 and 74.8 percent respectively.

Key word: Beheshtabad water transporting, optimum support system, FAHP, probability of failure, reliability



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

**Selection of suitable support system for Beheshtabad water
transporting tunnel by using MADM method**

Ramin Rafiee

Supervisors:

**Dr. Mohammad Ataei
Dr. Seyed Mohammad Esmaeil Jalali**

Date: December 2009