

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک  
رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ  
پایان نامه کارشناسی ارشد

امکان سنجی استفاده از بتن پاشیده به عنوان پوشش نهایی  
(مطالعه موردی: تونل سرزه)

نگارنده: امین دهقانی

استاد راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

مشاور:

مهندس مجتبی محمد نژاد

شهریور ۱۳۹۵

شماره: ۳۶۹۵/۱۱۳۱  
 تاریخ: ۴۵/۸/۲۵  
 ویرایش:

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورت جلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای امین دهقانی به شماره دانشجویی ۹۲۰۶۴۱۴ رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ تحت عنوان امکان سنجی استفاده از بتن پاشیده به عنوان پوشش نهایی (مطالعه موردی: تونل سرزه) که در تاریخ ۹۵/۶/۱۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: خوب امتیاز ۱۷-۱۸)  دفاع مجدد  مردود

نوع تحقیق: نظری  عملی

۱- عالی (۲۰-۱۹)

۲- بسیار خوب (۹۹-۱۸)

۳- خوب (۹۹-۱۷)

۴- قابل قبول (۹۹-۱۵)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استادارهنمای اول	دکتر سید محمد اسماعیل جلالی	دانشیار	
۲- استادارهنمای دوم			
۳- استاد مشاور	مهندس مجتبی محمدنژاد		
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر کیومرث سیف پناهی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر رامین رفیعی	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر شکرالله زارع	دانشیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۴۵/۸/۲۵

این مجموعه پیشگویی است به پدر و مادر عزیز و برادر بزرگوارم نوید

به رسم ادب و قدرشناسی، بر خود لازم می‌دانم از جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی که صبورانه پشتیبان و راهنمای من بودند و در طول انجام این پروژه بارها به منی و مساعدت ایشان مسیر راه را هموار نمودند و از هیچ کوشش علمی و عملی دریغ نکردند کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

از استاد ارجمند و مشاور پیمان نامه ام جناب آقای مهندس محبتی محمد نژاد که همواره با صبر و حوصله به راهنمایی ام پرداخته اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

در پایان نیز از بهکاری و کمک های جناب آقایان دکتر علیرضا شیخ، دکتر نعمتی، جواد حسین زاده، علی آرین فر، مرتضی کرمی،

مجید میرزایی، محبتی تقی زاده، صادق سلیمانی، سامان مشیری، وریا صلواتی و ایوب طاهری کمال تقدیر و تشکر را دارم

## تعهد نامه

اینجناب امین دهقانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کارشناسی ارشد با عنوان امکان‌سنجی استفاده از بتن پاشیده به عنوان پوشش نهایی (مطالعه موردی: تونل سرزه) تحت راهنمایی آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجناب 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 تا کنون 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 می‌باشد 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 تاثیرگذار بوده‌اند، در مقالات مستخرج از این پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آنها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) مربوط به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

به‌طور کلی در ساخت‌وساز فضاهای زیرسطحی به‌ویژه تونل‌ها، چگونگی نگهداری آن‌ها بسیار حایز اهمیت است. بتن با توجه به ویژگی‌هایی نظیر انعطاف‌پذیری، شکل‌پذیری، کم‌هزینه بودن و سهولت حمل و نقل از مواد پرکاربرد در امر نگهداری فضاهای زیرزمینی است. با وجود این، تسلیح بتن با توجه به پایین بودن مقاومت کششی آن امری ضروری است. یکی از راهکارهای تسلیح بتن استفاده از الیاف فولادی در آن است. در این پایان‌نامه به امکان‌سنجی استفاده از بتن الیافی پاشیده به‌عنوان پوشش تونل سرزه پرداخته شده و با روش سنتی بتن‌ریزی درجا مقایسه شده است. با توجه به مدل‌سازی‌های انجام شده در ضخامت‌های مختلف با نرم‌افزار  $FLAC^{2D}$  مشخص شده است که بتن پاشیده الیافی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر قادر به تامین نگهداری تونل سرزه است. همچنین با توجه به ملاحظات فنی اقتصادی انجام شده، بتن پاشیده الیافی از لحاظ فنی، برتری چشمگیری نسبت به استفاده از بتن‌ریزی درجا دارد زیرا به منابع انسانی و تجهیزات کمتری برای اجرا نیازمند است و در مقابل نیز، طول عمر و مقاومت بیشتری در برابر عوامل بیرونی دارد. با توجه به محاسبات و بررسی‌های انجام شده نشان داده شده که زمان اجرای بتن پاشیده الیافی برای تونل سرزه تقریباً برابر نصف زمان اجرایی بتن‌ریزی درجا است. همچنین هزینه اجرایی نگهداری این پروژه با روش بتن پاشیده الیافی تقریباً برابر با ۴۴ درصد هزینه اجرایی بتن‌ریزی درجا است.

**کلید واژه:** تونل سرزه، بتن الیافی پاشیده، بتن‌ریزی درجا، مدل‌سازی عددی، تحلیل پایداری، ملاحظات فنی اقتصادی.

## لیست مقالات مستخرج شده از پایان نامه

- دهقانی، ا.، جلالی، س. م. ا.، محمدنژاد، م.، ۱۳۹۵، بررسی و تحلیل عددی استفاده از بتن پاشیده الیافی به عنوان پوشش یکپارچه نهایی (تونل دسترسی سرزه)، دومین همایش ملی پژوهش‌های مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
- دهقانی، ا.، جلالی، س. م. ا.، محمدنژاد، م.، ۱۳۹۵، مقایسه فنی و اقتصادی استفاده از بتن پاشیده الیافی و بتن ریزی درجا به عنوان پوشش نهایی (تونل دسترسی سرزه)، دومین همایش ملی پژوهش‌های مهندسی عمران، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.



## فهرست مطالب

### فصل اول: کلیات ----- ۱

۱-۱- مقدمه ----- ۲

۲-۱- مشخصات عمومی محل اجرای طرح ----- ۳

۳-۱- ضرورت انجام تحقیق ----- ۴

۴-۱- روش انجام تحقیق ----- ۴

۵-۱- ساختار کلی پایان نامه ----- ۵

### فصل دوم: معرفی بتن الیافی و مروری بر تحقیقات پیشین ----- ۷

۱-۲- مقدمه ----- ۸

۲-۲- بتن مسلح به الیاف فولادی ----- ۹

۲-۲-۱- مزایای بتن الیافی ----- ۹

۲-۳- الیاف و رفتار آنها ----- ۱۱

۲-۳-۱- انواع الیاف ----- ۱۱

۲-۴- چگونگی کارکرد الیاف فولادی ----- ۱۴

۲-۴-۱- بهبود خصوصیات بتن ----- ۱۴

۲-۵- مروری بر تحقیقات پیشین ----- ۱۷

۲-۵-۱- مطالعات آزمایشگاهی ----- ۱۷

۲-۵-۲- مطالعات عددی ----- ۲۳

۲-۶- جمع بندی ----- ۲۹

### فصل سوم: تونل دسترسی سرزه ----- ۳۱

۱-۳- مقدمه ----- ۳۲

- ۳-۲- مشخصات پروژه ----- ۳۳
- ۳-۳- زمین‌شناسی عمومی تونل دسترسی سرزه ----- ۳۴
- ۴-۳- زمین‌شناسی مهندسی تونل دسترسی سرزه ----- ۳۶
- ۴-۳-۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ ----- ۳۸
- ۴-۳-۲- مشخصات ناپیوستگی‌ها ----- ۳۹
- ۴-۳-۲- طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ ----- ۳۹
- ۴-۳-۵- تعیین پارامترهای مقاومتی توده سنگ ----- ۴۲
- ۵-۳- تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در مسیر تونل دسترسی ----- ۴۳
- ۵-۳-۱- واحد Ngc ----- ۴۳
- ۵-۳-۲- واحد Ngs ----- ۴۶
- ۵-۳-۳- واحد Ea ----- ۴۹
- ۶-۳- جمع‌بندی ----- ۵۱
- فصل چهارم: مدل‌سازی و تحلیل عددی تونل دسترسی سرزه با پوشش بتن الیافی ----- ۵۳**
- ۴-۱- مقدمه ----- ۵۴
- ۴-۲- آزمایش‌های انجام شده برای تعیین خصوصیات مکانیکی بتن الیافی ----- ۵۴
- ۴-۲-۱- الیاف مورد استفاده ----- ۵۵
- ۴-۲-۲- طرح اختلاط ----- ۵۵
- ۴-۲-۳- آزمایش تعیین مقاومت فشاری ----- ۵۶
- ۴-۲-۴- آزمایش تعیین مقاومت کششی برزیلی ----- ۵۷
- ۴-۲-۵- آزمایش تعیین مقاومت خمشی ----- ۵۸
- ۴-۲-۶- آزمایش تعیین مدول الاستیسیته ----- ۵۹
- ۴-۳- روش‌های عددی در مکانیک سنگ ----- ۶۰

- ۴-۴- انتخاب مناسب ترین روش عددی ----- ۶۲
- ۴-۵- روش تفاضل محدود ----- ۶۴
- ۴-۶- مدل سازی عددی با نرم افزار  $FLAC^{2D}$  ----- ۶۴
- ۴-۶-۱- شناسایی مقطع بحرانی و انتخاب محدوده مناسبی از محیط اطراف تونل ----- ۶۵
- ۴-۶-۲- مشخص کردن ابعاد مدل، مش بندی و ترسیم مقطع تونل ----- ۶۶
- ۴-۶-۳- انتخاب مدل رفتاری زمین و تعیین پارامترهای آن ----- ۶۷
- ۴-۶-۴- اعمال شرایط اولیه و مرزی به مدل ----- ۶۸
- ۴-۶-۵- حل مدل و به تعادل رساندن آن قبل از عملیات حفاری ----- ۷۱
- ۴-۶-۶- حفاری تونل و اعمال ترخیص تنش مناسب ----- ۷۳
- ۴-۶-۷- نصب سیستم نگهداری ----- ۷۹
- ۴-۷- تحلیل پایداری پوشش بتن پاشیده الیافی ----- ۸۰
- ۴-۷-۱- نمودارهای ظرفیت باربری ----- ۸۰
- ۴-۷-۲- ترسیم نمودارهای اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی و بررسی ظرفیت باربری ----- ۸۱
- ۴-۷-۳- ترسیم نمودارهای اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی و بررسی ظرفیت باربری ----- ۸۹
- ۴-۸- جمع بندی ----- ۹۵
- فصل پنجم: مدل سازی و تحلیل عددی تونل دسترسی سرزه با پوشش بتن درجا ----- ۹۷**
- ۵-۱- مقدمه ----- ۹۸
- ۵-۲- مدل سازی عددی پوشش های بتنی درجا ----- ۹۸
- ۵-۲-۱- رویکرد مقطع معادل ----- ۹۸
- ۵-۳- تحلیل پایداری پوشش بتن ریزی درجا ----- ۱۰۳
- ۵-۴- جمع بندی ----- ۱۰۷

فصل ششم: مقایسه فنی و هزینه‌ای پوشش پاشیده بتن الیافی و پوشش بتن ریزی درجا-----۱۰۹

۱-۶-۱- مقدمه ----- ۱۱۰

۲-۶-۲- ملاحظات فنی ----- ۱۱۰

۱-۲-۶-۱- طول عمر و مقاومت در برابر عوامل محیطی ----- ۱۱۰

۲-۲-۶-۲- طراحی ----- ۱۱۰

۴-۲-۶-۴- تجهیزات مورد نیاز ----- ۱۱۱

۵-۲-۶-۵- منابع انسانی ----- ۱۱۲

۳-۶-۳- عوامل محیط زیستی ----- ۱۱۳

۴-۶-۴- زمان اجرا ----- ۱۱۳

۵-۶-۵- هزینه اجرایی ----- ۱۱۵

۵-۶-۵- جمع بندی ----- ۱۱۷

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادها ----- ۱۱۹

۱-۷-۱- نتیجه گیری ----- ۱۲۰

۲-۷-۲- پیشنهادها ----- ۱۲۱

منابع و مراجع ----- ۱۲۳

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲ تقسیم‌بندی انجمن استاندارد انگلیس بر اساس روش ساخت ----- ۱۳
- جدول ۲-۲ تقسیم‌بندی انجمن آزمایش و مواد آمریکا (ASTM) ----- ۱۳
- جدول ۳-۲ تقسیم‌بندی بر اساس مشخصات الیاف ----- ۱۳
- جدول ۴-۲ خصوصیات بتن مسلح به الیاف فولادی در مقایسه با بتن معمولی ----- ۱۵
- جدول ۵-۲ نوع و میزان مواد به کار رفته در تهیه بتن الیافی ----- ۱۸
- جدول ۶-۲ خصوصیات الیاف به کار رفته در بتن الیافی ----- ۱۸
- جدول ۷-۲ نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روب نمونه‌های بتن الیافی ----- ۱۹
- جدول ۸-۲ مواد به کار برده شده برای تمام نمونه‌ها ----- ۲۰
- جدول ۹-۲ خصوصیات الیاف به کار برده شده در بتن الیافی و شاتکریت الیافی ----- ۲۰
- جدول ۱۰-۲ مقاومت فشاری نمونه‌های شاتکریت الیافی و بتن الیافی ----- ۲۱
- جدول ۱۱-۲ مقادیر خروجی از آزمایش خمش سه نقطه‌ای برای نمونه‌های مختلف از بتن الیافی و شاتکریت الیافی ----- ۲۲
- جدول ۱۲-۲ پارامترهای ژئومکانیکی سنگ میزبان ----- ۲۳
- جدول ۱۳-۲ نیروهای وارد بر پوشش در حالت استاتیکی ----- ۲۴
- جدول ۱۴-۲ نتایج تحلیل دینامیکی در شرایط مختلف بارگذاری ----- ۲۴
- جدول ۱۵-۲ مشخصات توده سنگ در بر گیرنده تونل ----- ۲۷
- جدول ۱-۳ برخی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی حاصل از مغزه‌های گمانه DH-7 ----- ۳۸
- جدول ۲-۳ داده‌های ورودی در تعیین سه سیستم طبقه‌بندی توده سنگ ----- ۴۱
- جدول ۳-۳ واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در گستره مورد مطالعه ----- ۴۳
- جدول ۴-۳ کیفیت توده سنگ بر اساس سیستم‌های طبقه‌بندی در ایستگاه ST-3 ----- ۴۵
- جدول ۵-۳ کیفیت توده سنگ بر اساس سیستم‌های طبقه‌بندی در ایستگاه ST-1 ----- ۴۶

- جدول ۳-۶ کیفیت توده سنگ بر اساس سیستم‌های طبقه‌بندی در ایستگاه ST-6 ----- ۴۷
- جدول ۳-۷ کیفیت توده سنگ بر اساس سیستم‌های طبقه‌بندی در ایستگاه ST-7 ----- ۴۹
- جدول ۳-۸ کیفیت توده سنگ بر اساس سیستم‌های طبقه‌بندی در ایستگاه ST-9 ----- ۵۰
- جدول ۴-۱ مشخصات الیاف فولادی استفاده شده ----- ۵۵
- جدول ۴-۲ جزییات طرح اختلاط استفاده شده ----- ۵۶
- جدول ۴-۳ مقاومت فشاری بتن فاقد الیاف فولادی ----- ۵۶
- جدول ۴-۴ مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف فولادی ----- ۵۷
- جدول ۴-۵ مقاومت کشش برزیلی بتن فاقد الیاف ----- ۵۷
- جدول ۴-۶ مقاومت کشش برزیلی حاوی الیاف فولادی ----- ۵۸
- جدول ۴-۷ مقاومت خمشی بتن فاقد الیاف ----- ۵۹
- جدول ۴-۸ مقاومت خمشی بتن حاوی الیاف ----- ۵۹
- جدول ۴-۹ مدول الاستیسیته بتن فاقد الیاف ----- ۶۰
- جدول ۴-۱۰ مدول الاستیسیته بتن حاوی الیاف ----- ۶۰
- جدول ۴-۱۱ تعیین پیوستگی / ناپیوستگی محیط در بر گیرنده با فاکتور پیوستگی ----- ۶۳
- جدول ۴-۱۲ وضعیت پیوستگی زمین در ایستگاه‌های معرف ----- ۶۳
- جدول ۴-۱۳ میزان حداکثر جابجایی حاصل از حفاری در سه مقطع مختلف در مسیر تونل ----- ۶۶
- جدول ۴-۱۴ پارامترهای ورودی مدل موهر- کولمب در مدل‌سازی عددی ----- ۶۸
- جدول ۴-۵ روابط تجربی برای تعیین مقدار  $k$  ----- ۶۹
- جدول ۴-۱۶ مقادیر تنش‌های اولیه و فشار حاصل از طبقات بالایی محاسبه شده ----- ۷۰
- جدول ۴-۱۷ مقادیر کرنش بحرانی محاسبه شده توسط روابط ساکورایی ----- ۷۸
- جدول ۴-۱۸ پارامترهای ورودی المان پوسته برای مدل‌سازی پوشش بتن الیافی در ضخامت‌های مختلف ----- ۸۰
- جدول ۴-۱۹ خصوصیات مکانیکی بتن الیافی استفاده شده در مدل‌سازی ----- ۸۱

- جدول ۴-۲۰ مقادیر حداکثری نیروهای محوری و ممان خمشی وارده بر بتن الیافی در مدلسازی عددی ----- ۸۴
- جدول ۴-۲۱ مقادیر حداکثری نیروهای محوری و ممان خمشی وارده بر بتن الیافی در مدلسازی عددی ----- ۹۲
- جدول ۵-۱ مشخصات مصالح در نظر گرفته شده برای پوشش های بتنی ----- ۱۰۲
- جدول ۵-۲ مقادیر پارامترهای بدست آمده برای پوشش بتنی درجا با ضخامت ۳۰ سانتی متر با استفاده از رویکرد مقطع معادل ----- ۱۰۲
- جدول ۵-۳ مقادیر پارامترهای بدست آمده برای پوشش بتنی درجا با ضخامت ۳۵ سانتی متر با استفاده از رویکرد مقطع معادل ----- ۱۰۲
- جدول ۵-۴ مقادیر پارامترهای بدست آمده برای پوشش بتنی درجا با ضخامت ۴۵ سانتی متر با استفاده از رویکرد مقطع معادل ----- ۱۰۳
- جدول ۵-۵ مقادیر حداکثری نیروی محوری، ممان خمشی و نیروی برشی وارده بر پوشش بتن ریزی درجا حاصل از مدلسازی عددی ----- ۱۰۴
- جدول ۶-۱ تجهیزات مورد نیاز برای اجرای یک پوشش بتن ریزی درجا ----- ۱۱۱
- جدول ۶-۲ تجهیزات مورد نیاز برای اجرای بتن پاشیده الیافی ----- ۱۱۲
- جدول ۶-۳ منابع انسانی مورد نیاز در اجرای بتن ریزی درجا ----- ۱۱۲
- جدول ۶-۴ منابع انسانی مورد نیاز برای اجرای بتن پاشیده الیافی ----- ۱۱۳
- جدول ۶-۵ زمان اجرای پوشش بتن ریزی درجا به ازای یک متر پیشروی در مسیر تونل ----- ۱۱۴
- جدول ۶-۶ زمان اجرای پوشش بتن پاشیده الیافی به ازای یک متر پیشروی در مسیر تونل ----- ۱۱۴
- جدول ۶-۷ هزینه اجرایی برآورد شده به ازای یک متر پوشش بتن ریزی درجا ----- ۱۱۵
- جدول ۶-۸ هزینه اجرایی برآورد شده به ازای یک متر پوشش بتن پاشیده الیافی ----- ۱۱۶

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ نمودار بار- تغییر شکل بتن معمولی (خالص) و بتن الیافی در آزمایش خمش ----- ۱۱
- شکل ۲-۲ انواع الیاف فولادی ----- ۱۲
- شکل ۳-۲ نتایج حاصل از آزمایش خمش سه نقطه‌ای برای نمونه‌های مختلف از بتن الیافی و شاتکریت الیافی --- ۲۲
- شکل ۴-۲ مقطع پوشش تونل فاوور در ایتالیا: (الف) مدل المان محدود و چگونگی مش بندی تونل؛ (ب) تنش‌های اصلی در پوشش نهایی؛ (ج) خصوصیات هندسی پوشش نهایی؛ (د) آرایش آرماتورها در مقطع؛ (ه) جزئیات مربوط به کمان تسلیح پوشش نهایی ----- ۲۶
- شکل ۵-۲ پوشش مسلح بهینه تونل فاوور ایتالیا: (الف) خصوصیات هندسی مقطع پوشش؛ (ب) نیروهای محوری و ممان‌های خمشی وارد بر پوشش در قیاس با نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی پوشش ----- ۲۶
- شکل ۶-۲ مقطع هندسی تونل پارچین ----- ۲۷
- شکل ۷-۲ توزیع نیروهای محوری بر پوشش نهایی تونل پارچین ----- ۲۸
- شکل ۸-۲ توزیع ممان‌های خمشی بر پوشش نهایی تونل پارچین ----- ۲۸
- شکل ۱-۳ موقعیت جغرافیایی تونل انتقال آب کرمان ----- ۳۲
- شکل ۲-۳ موقعیت گزینه‌های پیشنهادی تونل دسترسی ----- ۳۴
- شکل ۳-۳ واحدهای سنگی شناسایی شده در نقشه زمین‌شناسی مسیر تونل دسترسی سرزه ----- ۳۵
- شکل ۴-۳ موقعیت ایستگاه‌های برداشت زمین‌شناسی مهندسی ----- ۳۷
- شکل ۵-۳ تخمین تجربی مدول تغییر شکل توده سنگ ----- ۴۲
- شکل ۶-۳ پروفیل طولی مسیر تونل سرزه در گذر از واحدهای زمین‌شناسی ----- ۴۳
- شکل ۷-۳ ایستگاه ST-2 (خرد شدگی واحد کنگلومرای تحت تاثیر گسل F2) ----- ۴۴
- شکل ۸-۳ تخمین پارامترهای مکانیکی توده سنگ در ایستگاه ST-3 با استفاده از Roclab ----- ۴۵
- شکل ۹-۳ تخمین پارامترهای مکانیکی توده سنگ در ایستگاه ST-1 با استفاده از Roclab ----- ۴۷
- شکل ۱۰-۳ تخمین خصوصیات مکانیکی توده سنگ در ایستگاه ST-6 با استفاده از Roclab ----- ۴۸



- شکل ۳-۱۱ تخمین خصوصیات مکانیکی توده سنگ در ایستگاه ST-7 با استفاده از Roclab ----- ۴۹
- شکل ۳-۱۲ تخمین خصوصیات مکانیکی توده سنگ در ایستگاه ST-9 با استفاده از Roclab ----- ۵۰
- شکل ۴-۱ الیاف فولادی استفاده شده در بتن ----- ۵۵
- شکل ۴-۲ مقاطع بحرانی انتخاب شده در مسیر تونل مورد نظر ----- ۶۵
- شکل ۴-۳ هندسه مقطع تونل سرزه ----- ۶۶
- شکل ۴-۴ ابعاد مدل، مش بندی و هندسه مقطع ----- ۶۷
- شکل ۴-۵ تاریخچه نیروهای نامتعادل کننده ----- ۷۱
- شکل ۴-۶ تاریخچه سرعت گرهی ----- ۷۲
- شکل ۴-۷ تاریخچه جابجایی ----- ۷۲
- شکل ۴-۸ کنتور تنش های قائم ----- ۷۳
- شکل ۴-۹ تغییرات نرخ همگرایی بر حسب فاصله از جبهه کار ----- ۷۴
- شکل ۴-۱۰ نمودار عکس العمل زمین (GRC) ترسیم شده برای مقطع ----- ۷۵
- شکل ۴-۱۱ رابطه بین مدول تغییر شکل پذیری و کرنش بحرانی ----- ۷۷
- شکل ۴-۱۲ کرنش برشی ایجاد شده در اطراف تونل در اثر اعمال ترخیص تنش ----- ۷۸
- شکل ۴-۱۳ کرنش برشی ایجاد شده در اطراف تونل در اثر اعمال ترخیص تنش در Plaxis ----- ۷۹
- شکل ۴-۱۴ مقطعی از پوشش بتنی با ضخامت  $t$  تحت نیروی محوری  $N$  و گشتاور خمشی  $M$  ----- ۸۲
- شکل ۴-۱۵ نمودار اندرکنشی نیروی محوری  $N$  - گشتاور خمشی  $M$  با مقادیر فرضی از  $SF$  ----- ۸۴
- شکل ۴-۱۶ نمودار توزیع نیروهای محوری بر پوشش بتن الیافی با ضخامت ۳۰ سانتی متر ----- ۸۵
- شکل ۴-۱۷ نمودار توزیع ممان های خمشی بر روی پوشش بتن الیافی با ضخامت ۳۰ سانتی متر ----- ۸۵
- شکل ۴-۱۸ توزیع نیروی محوری بر پوشش با ضخامت ۳۰ سانتیمتر در Plaxis ----- ۸۶
- شکل ۴-۱۹ توزیع ممان خمشی بر روی پوشش با ضخامت ۳۰ سانتیمتر در Plaxis ----- ۸۶
- شکل ۴-۲۰ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی برای بتن پاشیده الیافی با ضخامت ۳۰ سانتی متر ----- ۸۷

- شکل ۴-۲۱ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی برای بتن الیافی پاشیده با ضخامت ۲۰ سانتی متر --- ۸۷
- شکل ۴-۲۲ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی برای بتن پوشیده الیافی با ضخامت ۱۰ سانتی متر --- ۸۸
- شکل ۴-۲۳ مقطعی از پوشش بتنی تحت نیروی محوری N و نیروی برشی Q ----- ۸۹
- شکل ۴-۲۴ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی با مقادیر فرضی از SF ----- ۹۱
- شکل ۴-۲۵ نمودار توزیع نیروی برشی بر پوشش بتنی الیافی با ضخامت ۳۰ سانتی متر ----- ۹۲
- شکل ۴-۲۶ توزیع نیروی برشی بر پوشش ۳۰ سانتیمتری توسط Plaxis ----- ۹۳
- شکل ۴-۲۷ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی برای بتن الیافی با ضخامت ۳۰ سانتی متر ----- ۹۳
- شکل ۴-۲۸ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی برای بتن الیافی با ضخامت ۲۰ سانتی متر ----- ۹۴
- شکل ۴-۲۹ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی بتن الیافی با ضخامت ۱۰ سانتی متر ----- ۹۴
- شکل ۵-۱ (الف) نمایش شماتیک یک مقطع از لایه نگهدارنده شامل مواد مختلف ۱ و ۲، (ب) مقطع معادل برای لایه مرکب (کامپوزیتی) ----- ۹۹
- شکل ۵-۲ مقطع در نظر گرفته برای پوشش بتن درجا با ضخامت ۳۰ سانتی متر ----- ۱۰۰
- شکل ۵-۳ پوشش در نظر گرفته برای پوشش بتن درجا با ضخامت ۳۵ سانتی متر ----- ۱۰۱
- شکل ۵-۴ پوشش در نظر گرفته شده برای پوشش بتن درجا با ضخامت ۴۵ سانتی متر ----- ۱۰۱
- شکل ۵-۵ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی مربوط به بتن ریزی درجا با ضخامت ۳۰ سانتی متر - ۱۰۴
- شکل ۵-۶ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی مربوط به بتن ریزی درجا با ضخامت ۳۵ ----- ۱۰۵
- شکل ۵-۷ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی مربوط به بتن ریزی درجا با ضخامت ۴۵ سانتی متر - ۱۰۶
- شکل ۵-۸ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی مربوط به پوشش بتنی درجا با ضخامت ۳۰ سانتی متر ۱۰۶
- شکل ۵-۹ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی مربوط به پوشش بتنی درجا با ضخامت ۳۵ سانتی متر ۱۰۶
- شکل ۵-۱۰ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی مربوط به پوشش بتنی درجا با ضخامت ۴۵ سانتی متر ۱۰۷

فصل اول

کلیات

## ۱-۱- مقدمه

به‌طور کلی در ساخت و ساز فضاهای زیرسطحی به‌ویژه تونل‌ها، چگونگی نگهداری این فضاهای زیرزمینی بسیار حایز اهمیت است. یکی از روش‌های نگهداری تونل، روش پوشش با بتن پاشیده<sup>۱</sup> (SCL) است. در واقع SCL ابزار ایمن و مناسبی است که در آن برای نگهداری حفاری‌های انجام‌شده و در حین اجرا از آن استفاده می‌شود. در این روش، بتن تحت اثر نیروی بادی و از طریق شیلنگ یا لوله به محل موردنظر با سرعت بالایی پاشیده و فشرده می‌شود.

بتن<sup>۲</sup> را می‌توان به‌عنوان یک سنگ مصنوعی دانست که از مخلوط سیمان، آب، ماسه و شن و یا خرده‌سنگ به دست می‌آید. بتن دارای مقاومت فشاری بسیار بالا و مقاومت کششی بسیار پایینی است؛ بنابراین به‌کارگیری بتن غیرمسلح جز در سازه‌های وزنی، در عمل کاربرد چندانی ندارد و لازم است ساختار بتن با استفاده از الیاف<sup>۳</sup> و آرماتورها<sup>۴</sup> مسلح شود. از آنجا که آرماتور بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می‌دهد بنابراین تصور مقطع بتن به‌عنوان یک مقطع ایزوتروپ و همگن، چندان صحیح نخواهد بود. به‌منظور ایجاد شرایط ایزوتروپی و نیز کاهش ضعف شکنندگی و تردی بتن تا حد ممکن، در نیم‌قرن اخیر از رشته‌های نازک و تقریباً دراز در تمام حجم بتن، به‌طور همگن و گسسته استفاده شده است. استفاده از الیاف در بتن باعث افزایش مقاومت کششی، برشی و خمشی، افزایش مقاومت در برابر تورق، افزایش مقاومت در برابر سایش و هوازدهی، افزایش قابلیت باربری بعد از ترک‌خوردگی بتن و همچنین افزایش مقاومت بتن در مقابل ضربه می‌شود.

این پایان‌نامه که با عنوان "امکان‌سنجی استفاده از بتن پاشیده به‌عنوان پوشش نهایی" مطرح شده است به بیان طراحی پوشش بتن پاشیده مسلح به الیاف فولادی اختصاص دارد که بعد از انجام آزمایش‌ها و جمع‌آوری پارامترهای موردنیاز، با استفاده از نرم‌افزار عددی FLAC<sup>2D</sup> انجام و با بتن‌ریزی

<sup>۱</sup> Sprayed Concrete Lining

<sup>۲</sup> Concrete

<sup>۳</sup> Fibers

<sup>۴</sup> Rebars

درجا مقایسه شده است. در آخر نیز اجرای بتن پاشیده الیافی و بتن ریزی درجا از نظر ملاحظات فنی و اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۱-۲- مشخصات عمومی محل اجرای طرح

تونل انتقال آب از سد صفا به کرمان، تونلی است به طول ۳۸ کیلومتر که دهانه ورودی آن از فاصله ۱۳ کیلومتری سد صفا واقع در ۷/۵ کیلومتری جنوب شهرستان رابر شروع شده و در منطقه‌ای در نزدیکی گلزار و در حدود ۷۰ کیلومتری جنوب شهر کرمان خاتمه می‌یابد.

در آخرین تغییرات تصویب شده، این تونل به دو قطعه تقریباً مساوی تقسیم می‌شود. قطعه اول (جنوبی) با طول حدود ۱۹/۲ کیلومتر و شیب ۰/۰۶ درصد از دهانه ورودی (تراز ۲۳۷۵ متر از سطح دریا) تا روستای سرزه (تراز ۲۳۸۷) ادامه دارد. قطعه دوم با شیب ۰/۱۳۶- درصد از مترای حدود ۱۹+۲۰۰ (ادامه قطعه اول) شروع شده و وظیفه آن انتقال آب با جریان آزاد از تراز ۲۳۸۷ به دهانه خروجی (تراز ۲۳۶۱) است. قرارداد اجرای این تونل که از آن به‌عنوان سومین تونل بزرگ جهان یاد می‌شود، با قرارگاه سازندگی خاتم‌الانبیاء (ص) منعقد شده است [۱] و [۲].

در این پروژه به‌منظور خروج ماشین TBM از تونل اصلی و همچنین محدودیت‌های هیدرولیکی در قطعه تحت فشار، احداث سازه دسترسی (شفت یا تونل) ضرورت یافته است. در طراحی هیدرولیکی مسیر این الزام وجود دارد که سازه دسترسی، تونل اصلی را در محدوده حدود ۱۹+۲۰۰ قطع کند. با توجه به مهم‌ترین معیارهای جانمایی تونل دسترسی از قبیل مشخصات و کارایی تونل، مخاطرات زمین‌شناسی، شرایط زیست‌محیطی، تملک زمین و راه‌های دسترسی، تونلی به طول ۲۶۵۸ متر و شیب ۱۱/۸ درصد پیشنهاد شده است [۱].

### ۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

در حال حاضر در بسیاری از تونل‌ها، هم تونل‌های ساخته‌شده و هم در حال ساخت ایران از روش بتن‌ریزی درجا<sup>۱</sup> برای پوشش نهایی تونل استفاده می‌شود. از آنجا که روش سنتی بتن‌ریزی درجا به‌صورت ناپیوسته، هزینه‌بر، زمان‌بر و همراه با مشکلات قالب‌بندی و تزریق است؛ بنابراین روش‌های دیگری نیز مورد بررسی قرار گرفته است تا در صورت امکان از مشکلات مربوط به اجرای پوشش نهایی کاسته شود. بتن پاشی با توجه به ویژگی‌هایی نظیر انعطاف‌پذیری در کیفیت مواد، انعطاف‌پذیری در اجرا و کارایی بالا و همچنین توانایی سازگاری با هر نوع هندسه و اندازه‌ای از تونل، می‌تواند به‌عنوان پوشش نهایی تونل مورد استفاده قرار گیرد.

### ۱-۴- روش انجام تحقیق

در این تحقیق، ابتدا با توجه به برداشت‌های زمین‌شناسی انجام‌شده و گمانه‌های حفاری‌شده، خصوصیات مهندسی مربوط به ساختگاه موردنظر استخراج شده است. این پارامترهای مکانیکی زمین پایه و اساس طراحی و تحلیل پایداری طرح موردنظر است. از این پارامترها برای طراحی و تحلیل سیستم نگهداری تونل موردنظر استفاده شده است. سپس بتن ساده (بدون الیاف) و بتن الیافی مدنظر هم‌زمان در چندین نمونه تهیه و مورد آزمایش قرار گرفته است تا خصوصیات مکانیکی و پارامترهای موردنیاز در مدل‌سازی عددی پوشش با بتن‌ریزی درجا (قالبی) و پوشش با بتن الیافی به دست آید. در ادامه طراحی و مدل‌سازی تونل با پوشش بتن الیافی و پوشش بتن‌ریزی درجا با بهره‌مندی از نرم‌افزار FLAC<sup>2D</sup> انجام و پایداری آن‌ها همراه با تهیه نمودارهای ظرفیت باربری<sup>۲</sup> مورد بررسی قرار گرفته است. در آخر پوشش بتن الیافی با پوشش بتن‌ریزی درجا (قالبی) از لحاظ فنی و اقتصادی مقایسه شده است.

---

<sup>۱</sup>In Situ Concrete Lining

<sup>۲</sup> Capacity Diagram

## ۱-۵- ساختار کلی پایان نامه

این پایان نامه در ۷ فصل به شرح ذیل تدوین شده است:

در فصل اول به کلیات موضوع نظیر زمینه تحقیق، مشخصات عمومی محل اجرای طرح، ضرورت انجام تحقیق، روش انجام تحقیق و ساختار کلی پایان نامه پرداخته شده است.

در فصل دوم در ابتدا به معرفی و بیان خصوصیات بتن الیافی، مشخصات مکانیکی و فیزیکی، کاربردها و محدودیت‌های استفاده از آن پرداخته شده است. سپس پیشینه مطالعات انجام گرفته در زمینه بتن مسلح به الیاف فولادی و موارد استفاده شده آن در صنعت تونل‌سازی در دو بخش آزمایشگاهی و عددی بیان شده است.

فصل سوم به معرفی تفصیلی ساختگاه مورد نظر اختصاص دارد و به بیان مشخصات پروژه، زمین‌شناسی عمومی و مهندسی، تعیین پارامترهای مقاومتی و غیره پرداخته شده است. در ادامه این فصل پارامترهای مورد نیاز در مدل‌سازی، از داده‌های خام با استفاده از نرم‌افزار RocLab استخراج شده است.

فصل چهارم تحت عنوان مدل‌سازی و تحلیل پایداری پوشش بتن الیافی برای تونل دسترسی سرزه است. در این فصل در ابتدا به چگونگی تعیین پارامترهای مکانیکی بتن الیافی پرداخته شده است و در ادامه به اهمیت روش‌های عددی در مهندسی سنگ، شناسایی مقطع بحرانی، روند مدل‌سازی و در پایان به ترسیم نمودارهای ظرفیت باربری و تحلیل پایداری پوشش بتن الیافی با استفاده از این نمودارها پرداخته شده است.

در فصل پنجم مشابه با روند ذکر شده برای مدل‌سازی پوشش بتن الیافی در فصل چهارم به مدل‌سازی و بررسی پایداری پوشش بتن‌ریزی درجا با بهره‌مندی از نمودارهای ظرفیت باربری پرداخته شده و پوشش بتنی درجای پایدار انتخاب شده است.

در فصل ششم مقایسه فنی هزینه‌ای پوشش بتن الیافی پاشیده و پوشش بتن‌ریزی درجا بیان شده است و دو نوع پوشش مذکور از نظر ملاحظات فنی نظیر طول عمر، طراحی، تجهیزات مورد استفاده، مسایل مربوط به محیط زیست، نیروی انسانی و همچنین زمان اجرا و هزینه‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.



## فصل دوم

معرفی متن الیافی و مروری بر

تحقیقات پیشین

## ۲-۱- مقدمه

در طراحی یک پروژه به‌کارگیری مصالح مناسب، مقاوم و ارزان از مهم‌ترین وظایف یک مهندس به‌حساب می‌آید. یکی از مهم‌ترین و ارزان‌ترین مصالح موجود که در دنیا کاربرد وسیعی دارد، بتن است. مزایایی که بتن از آن برخوردار است باعث شده که مورد علاقه اکثر پیمان‌کاران، طراحان و کارفرمایان باشد. از عمده‌ترین مزایای بتن می‌توان به امکان به‌کارگیری آن در اکثر مناطق جغرافیایی، استفاده از مصالح طبیعی و ارزان، دارا بودن هزینه کم در مقایسه با حجم زیاد عملیات، شکل‌پذیری آن با توجه به اشکال هندسی طرح، امکان مکانیزه کردن عملیات و غیره اشاره کرد [۳].

بتن دارای مقاومت فشاری بسیار بالا و مقاومت کششی بسیار پایینی است؛ بنابراین به‌کارگیری بتن غیرمسلح جز در سازه‌های وزنی، در عمل کاربرد چندانی ندارد و لازم است ساختار بتن با استفاده از الیاف و آرماتورها مسلح شود. از آنجا که آرماتور بخش کوچکی از مقطع را تشکیل می‌دهد بنابراین تصور این که مقطع بتن یک مقطع همسانگرد و همگن است چندان صحیح نخواهد بود. به‌منظور ایجاد شرایط همسانگرد و نیز کاهش ضعف شکنندگی و تردی بتن تا حد ممکن، در نیم‌قرن اخیر از رشته‌های نازک و تقریباً درازی در تمام حجم بتن، به‌طور همگن و گسسته استفاده شده است [۴].

در سال‌های اخیر تحقیقات وسیعی انجام‌گرفته و سعی شده است که مشخصات بتن با افزودن الیاف فولادی بهبود بخشیده شود. در حال حاضر بتن مسلح به الیاف فولادی<sup>۱</sup> به‌عنوان یکی از مصالح ساختمانی جدید و کاملاً متفاوت و با مشخصات منحصربه‌فرد از نظر مقاومت، قابلیت کششی و طاقت<sup>۲</sup> در مقابل گسیختگی مطرح است.

---

<sup>۱</sup> Steel Fiber Reinforced Concrete

<sup>۲</sup> Toughness

## ۲-۲- بتن مسلح به الیاف فولادی

بتن الیافی (الیاف فولادی) ترکیبی شامل یک کالبد بتنی مرکب از سیمان، مصالح سنگی و آب و همچنین درصدی از الیاف فولادی است که به‌طور درهم و کاملاً اتفاقی و در جهات مختلف در مخلوط پراکنده شده است. در این نوع بتن شبکه‌های آرماتور، تورهای بافته‌شده و یا آرماتورهای نازک و دراز نمی‌تواند به‌عنوان الیاف پراکنده و منفرد در بتن تلقی گردد [۴].

## ۲-۲-۱- مزایای بتن الیافی

بتن معمولی یک ماده نسبتاً ترد و شکننده است، در حالی که بتن الیافی چون دارای مقاومت زیادتر است و خاصیت جلوگیری از ترک‌خوردگی را دارا است، نسبت به بتن معمولی برتری دارد. مزایای استفاده از الیاف در بتن را می‌توان در ذیل خلاصه کرد [۴] و [۵]:

- افزایش مقاومت کششی، برشی و خمشی
- افزایش قابلیت باربری زیاد بعد از ترک‌خوردگی بتن
- افزایش مقاومت بتن در مقابل ضربه
- مقاومت در برابر سایش، تورق<sup>۱</sup> و هوازگی

یک مزیت بارز بتن الیافی، ظرفیت کاری<sup>۲</sup> زیاد آن است. ظرفیت کاری در این متن به مفهوم ظرفیت یک جسم به‌منظور تبدیل کار خارجی به:

الف) انرژی کرنشی ذخیره‌شده قابل‌تغییر

ب) کار داخلی که با تشکیل ترک‌های جدید با رها شدن و تغییر شکل الیاف و یا تولید حرارت همراه است.

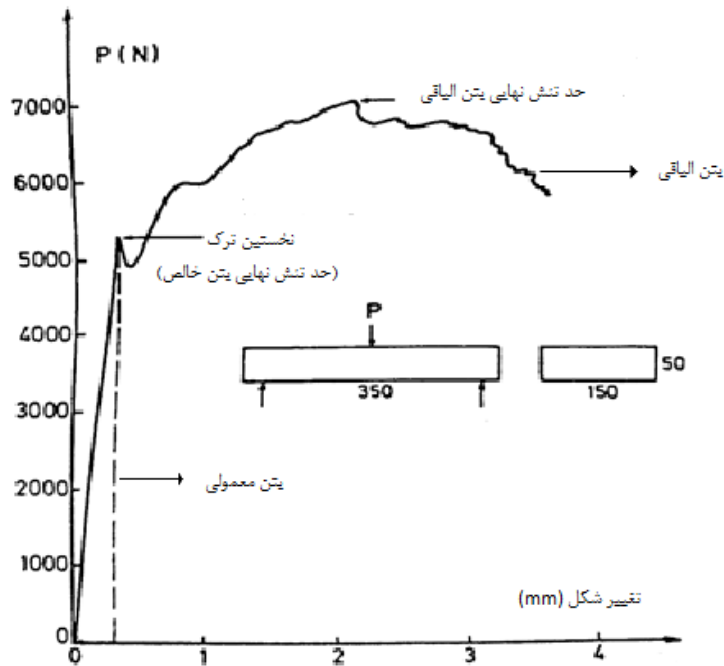
---

<sup>۱</sup> Spalling

<sup>۲</sup> Working Capacity

قابلیت انعطافی که بتن الیافی دارد، همانند خواص مواد پلاستیک باعث می‌شود که بتن الیافی گسیختگی ناگهانی نداشته باشد. از آنجاکه الیاف فولادی در جسم بتن به صورت سه بعدی و به بیانی بهتر چند بعدی پراکنده می‌شود، در صورت تشکیل یک ترک که معمولاً انتظار تغییر شکل می‌رود، در جهات مختلف، الیاف اتصالاتی را به وجود آورده و از گسترش ترک جلوگیری می‌کند. بنابراین رشته‌های الیاف به طور فعال در محدود کردن عرض ترک‌ها وارد عمل شده و با تشکیل ریز ترک‌های زیاد همکاری می‌کند و در نتیجه قابلیت بهره‌برداری بتن افزایش می‌یابد. همان طور که نمودار بار-تغییر شکل در شکل ۱-۲ نشان داده شده است، بتن معمولی یک جسم ترد و شکننده است. با توجه به این نمودار، رفتار منحنی تا حد بار نهایی و شروع ترک خوردگی در بتن خطی است. از آنجاکه در بتن معمولی (خالص) حد بار نهایی و نخستین ترک بر هم منطبق است لذا گسیختگی به طور ناگهانی به وجود می‌آید [۴]، [۶] و [۷].

الیاف فولادی، مقاومت خمشی و قابلیت کششی بتن را افزایش می‌دهد. در نمودار بار-تغییر شکل بتن الیافی (شکل ۱-۲)، شکل منحنی به طور کلی تا نخستین ترک خطی است. اما بعد از نخستین ترک شکل این منحنی غیرخطی می‌شود؛ این تغییر در شکل منحنی، با افزایش تدریجی در شکل توام بوده و در نتیجه بتن الیافی با افزایش بار به مقاومت خود ادامه می‌دهد. وقتی بار افزایش می‌یابد، نخستین ترک گسترش یافته و بتن به سوی گسیختگی پیش می‌رود. بعد از رسیدن به بار نهایی که در آن گسیختگی شروع می‌شود بتن الیافی تا به آن حد نیرو تحمل می‌کند که به بریدگی و یا قطع چسبندگی رشته‌های الیاف با بتن منجر شود [۴] و [۶].



شکل ۱-۲ نمودار بار- تغییر شکل بتن معمولی (خالص) و بتن الیافی در آزمایش خمش [۴]

## ۳-۲- الیاف و رفتار آنها

### ۱-۳-۲- انواع الیاف

الیاف از فرآیندهای گوناگون و در شکل و اندازه‌های مختلف ساخته می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۲-۲ نیز قابل مشاهده است، الیاف ممکن است به‌طور کامل صاف و مستقیم و یا دارای انحنا باشند.

به هر حال اکثراً دارای مقطع دایره‌ای شکل با قطری در حدود  $0/4$  تا  $1/3$  میلی‌متر و طولی در بازه ۲۵ تا ۶۰ میلی‌متر هستند. الیاف فولادی دارای مقاومت کششی در حدود ۲ تا ۳ برابر تورهای (مش‌بندی) مرسوم و همچنین دارای سطح تماس بیرونی بیشتر برای ادغام بهتر با کالبد بتن هستند [۶].



شکل ۲-۲ انواع الیاف فولادی [۶]

بعضی از مشخصات فیزیکی الیاف در بهبود کیفیت بتن به طور مستقیم تاثیر دارند. از جمله این

موارد عبارتند از [۴] و [۶]:

- مکانیزم لنگراندازی<sup>۱</sup> و زنجیر کردن<sup>۲</sup> (شکل صاف و راست یا انحنادار، ته گرد یا چنگکی)
- طول و قطر الیاف و یا به عبارتی نسبت ظاهری<sup>۳</sup>
- مقدار مصرفی<sup>۴</sup> (مقدار تجویز شده) الیاف
- تعداد الیاف به کار برده شده در هر کیلو (تابع اندازه و مقدار تجویز الیاف است)
- مقاومت کششی
- مدول الاستیک

<sup>۱</sup> Anchorage

<sup>۲</sup> Bond

<sup>۳</sup> Aspect Ratio

<sup>۴</sup> Dosage (Kg/m<sup>3</sup>)

انجمن استاندارد انگلیس<sup>۱</sup> (BSEN 14889-1) بر اساس روش ساخت، الیاف را در پنج گروه مطابق

با جدول ۱-۲ تقسیم بندی کرده است:

جدول ۱-۲ تقسیم بندی انجمن استاندارد انگلیس بر اساس روش ساخت [۶]

شماره گروه	روش ساخت
اول	خرده سیمها در حالت سرد
دوم	برش ورقهها
سوم	استخراج ذوبی
چهارم	ریش ریش کردن (رنده کردن) سیمها در حالت سرد
پنجم	رنده کردن بلوکها

مشابه همین روش انجمن آزمایش و مواد آمریکا<sup>۲</sup> (ASTM) نیز تقسیم بندی را مطابق جدول ۲-۲

بیان کرده است:

جدول ۲-۲ تقسیم بندی انجمن آزمایش و مواد آمریکا (ASTM) [۶]

شماره گروه	روش ساخت
اول	خرده سیمها
دوم	برش ورقهها
سوم	استخراج ذوبی
چهارم	دیگر روشها

علاوه بر این روش هایی نیز وجود دارد که بر اساس مشخصات خود الیاف، آن ها را مطابق جدول

۳-۲ تقسیم بندی می کند:

جدول ۳-۲ تقسیم بندی بر اساس مشخصات الیاف [۶]

مشخصات	خصوصیات
سطح مقطع	دایره ای، مستقیم (صاف)، هلالی و غیره
انحنایها	مستقیم، موجی، ته چنگکی و غیره
طول	۱۹-۶۰ سانتی متر
نسبت ظاهری	۳۰ تا ۱۰۰
مقاومت کششی	۲۸۰۰-۳۴۵ مگا پاسکال
مدول یانگ	۲۵۰ گیگا پاسکال

<sup>۱</sup> British Standards Institution

<sup>۲</sup> American Society for Testing and Materials

انواع مختلفی از الیاف پلیمری نیز در دسترس است که در حالت کلی به دو نوع ذیل تقسیم بندی می شود [۶]:

- ریز الیاف که به طور کلی بر خصوصیات اولیه بتن تاثیر می گذارد و می تواند مقاومت اولیه بتن را بهبود دهد. به طور معمول این الیاف همراه با الیاف فولادی به کار می رود.
- درشت الیاف که شبیه الیاف فولادی است و می تواند ظرفیت باربری بتن را بعد از ترک افزایش دهد.

## ۲-۴- چگونگی کارکرد الیاف فولادی

### ۲-۴-۱- بهبود خصوصیات بتن

بتن یک ماده شکننده با مقاومت کششی پایین است. در تراکم، افزودن الیاف به بتن باعث افزایش طاقت، انعطاف پذیری و ظرفیت جذب انرژی می شود. در یک توزیع عادی از الیاف مقاومت فشاری بتن دچار تغییرات چندانی نخواهد شد. الیاف در بتن به صورت های مختلفی انجام وظیفه می کنند. اولاً الیاف، تشکیل و توسعه ترک های حاصل از نشست ناگهانی پلاستیک<sup>۱</sup> و پدیده انقباض<sup>۲</sup> (کوچک شدگی) را کاهش می دهند. ثانیاً ظرفیت باربری بتن را پس از ترک افزایش می دهند [۴] و [۶].

الیاف به صورت تصادفی در بتن توزیع می شوند. بنابراین میکرو ترک ها را قطع کرده و از پیوستن آنها به همدیگر و تشکیل ترک های بزرگ جلوگیری می کند. بعد از ترک خوردگی نیز، الیاف ترک را پوشش داده و ظرفیت باربری باقیمانده را افزایش می دهند. در واقع این ظرفیت وابسته به مقدار و نوع

<sup>۱</sup> Early-age plastic settlement

<sup>۲</sup> Shrinkage



الیاف فولادی استفاده شده است و همچنین می‌تواند در طرح رفتار پلاستیکی بتن مورد توجه قرار گیرد.

خصوصیات مکانیکی بتن مسلح به الیاف، با توجه به نوع الیاف و حجم شکستگی کنترل می‌شود. سطح بهبود بتن مسلح نسبت به بتن معمولی بسته به مقدار تجویز و نوع الیاف مصرفی است. برخی از خصوصیات تاثیرپذیر در جدول ۴-۲ بیان شده است.

جدول ۴-۲ خصوصیات بتن مسلح به الیاف فولادی در مقایسه با بتن معمولی [۶]

توضیحات	خصوصیات
افزایش می‌یابد	مقاومت سایشی
به مقدار کمی افزایش می‌یابد	تاب (مقاومت) فشردگی
تغییرات محسوسی ندارد	مقاومت الکتریکی
حتی در مقدار کم تجویز الیاف، نیز بهبود می‌یابد	مقاومت در برابر خستگی
قبل از اولین ترک تغییرات کمی دارد ولی بعد از ایجاد ترک مقاومت خمشی را	مقاومت خمشی
بسیار بالا می‌برد	
می‌تواند بهبود یابد	مقاومت در چرخه انجماد/ ذوب
بسیار بهبود می‌یابد	مقاومت در برابر ضربه
تغییرات محسوسی ندارد	مدول الاستیسیته
حتی در مقادیر کم تجویز الیاف، باعث کاهش عرض ترک‌ها می‌شود	جلوگیری از انقباض
حتی در مقدار کم تجویز الیاف، نیز بهبود می‌یابد	مقاومت برشی
در تمام ماتریکس بتن پخش شده و باعث تحکیم بتن می‌شود	مقاومت در برابر خرد شدن
بسیار بهبود می‌یابد	مقاومت در برابر شوک گرمایی
حتی در مقدار کم تجویز الیاف، نیز بهبود می‌یابد	طاقت

ایده اضافه کردن الیاف به مخلوط‌های ترد و شکننده که در مقابل کشش توان ناچیزی دارند، از زمان‌های قدیم وجود داشته است. علی‌رغم این‌که فناوری بتن الیافی در ایران کمتر شناخته شده است امروزه در دنیا انواع بسیار متنوعی از الیاف برای کاربردهای گوناگون در بتن وجود دارد که یکی از پرکاربردترین آن‌ها، الیاف فولادی است. الیاف فولادی دارای مدول الاستیسیته و کرنش شکست بالایی بوده که با توجه به قابلیت شکل‌پذیری مناسب و مقاومت کششی بالا از مناسب‌ترین و اقتصادی‌ترین نوع الیاف به حساب می‌آید. این نوع الیاف به اشکال ظاهری گوناگون (مستقیم، انتهای قلاب‌دار،

دنداندار و غیره) برای بهبود بخشیدن به رفتار بتن قابل ساخت است و همچنین اختلاط آن‌ها با دیگر مواد بتن به سهولت انجام‌پذیر است. این مزیت‌ها سبب می‌شود که الیاف فولادی بیشترین کاربرد را نسبت به سایر انواع الیاف داشته باشد. از جمله کاربردهای این نوع بتن الیافی می‌توان به سازه‌های تحت ضربه و انفجار، باند فرودگاه‌ها، کف سالن‌های صنعتی، لوله‌ها و پوسته‌های نازک، تونل‌ها، کف‌سازی خیابان‌ها، قسمت‌هایی که در معرض تغییرات بالای دما و حتی در دماهای بسیار بالا هستند، اشاره کرد. با توجه به مزایای ویژه و کاربردهای وسیع بتن مسلح به الیاف فولادی جا دارد که در ضمن شناخت بیشتر این فناوری اقدامات لازم برای به‌کارگیری عملی آن صورت گیرد [۳].

تسلیح بتن در صنعت برای تحمل بارهای کششی امری اجتناب‌ناپذیر است. در بتن تقویت شده با الیاف فولادی، کرنش شکست کششی بتن به طور قابل توجهی کمتر از کرنش تسلیم فولاد است؛ بنابراین ترک‌های بتن قبل از هر بارگذاری مهمی به فولاد انتقال داده می‌شود. علاوه بر این فولاد به عنوان یک عضو مقاومتی مهم در بارگذاری کششی نهایی شرکت نموده و عرض ترک‌های ایجاد شده را در حد مشخص شده‌ای محدود می‌کند؛ به طوری که در بسیاری از موارد یک مقدار کم فولاد در بتن توزیع شده و از توسعه ترک‌های کنترل نشده یا از شکست‌های حاصل از بیش بارهای تصادفی<sup>۱</sup> جلوگیری می‌کند [۶].

امروزه بیشترین کاربرد بتن تقویت شده با الیاف فولادی در صنعت کف‌سازی و سنگ‌فرش است. در انگلستان چندین میلیون مترمربع از ورقه‌های مسلح به الیاف فولادی در بیش از ده سال گذشته هم برای نگهداری زمین و هم برای کف نگهدارنده شمع استفاده شده است. دیگر کاربردهای وسیع بتن تقویت شده با الیاف می‌توان به بتن پاشی، کف‌پوشی و استفاده در المان‌های پیش ساخته اشاره کرد.

---

<sup>۱</sup> Accidental Overload

الیاف اغلب برای جایگزینی شبکه‌های فولادی مرسوم در تخته‌های برشی زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. صرفه‌جویی در هزینه تهیه و نصب شبکه‌های مش‌بندی می‌تواند جبرانی برای تهیه الیاف فولادی باشد. این امر سبب می‌شود با کاهش دخالت بشر در نصب مش‌های فولادی به‌طور ایمن‌تر و سالم‌تری نگهداری زمین انجام و از بروز مشکلات روش‌های مرسوم در اعماق زمین جلوگیری کرد [۶].

## ۲-۵- مروری بر تحقیقات پیشین

با آن‌که بتن مسلح به الیاف فولادی به‌طور وسیع در کشورهای مختلف استفاده می‌شود، با این حال اطلاعات دقیقی از خصوصیات، استفاده و جزییات بتن مسلح به الیاف وجود ندارد. در این قسمت به بیان عمده مطالعات انجام شده در زمینه بتن مسلح به الیاف فولادی پرداخته شده است. در این پایان‌نامه مطالعات انجام شده در دو بخش مطالعات آزمایشگاهی و مطالعات عددی تقسیم بندی شده است. با توجه به این‌که در پایان‌نامه حاضر به بررسی عددی ظرفیت باربری بتن الیافی در پوشش تونل‌ها پرداخته شده است، به تعداد محدودی از مطالعات آزمایشگاهی بر روی بتن پاشیده الیافی اشاره شده است.

### ۲-۵-۱- مطالعات آزمایشگاهی

جنگ<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۱ به بررسی رفتار خمشی، طاقت و جذب انرژی بتن الیاف فولادی پاشیده پرداختند. هدف آن‌ها از این بررسی، معرفی شاخص‌هایی بود که نشان دهنده تنوع در بتن پاشیده باشند. آن‌ها نمونه‌های مختلفی از بتن الیافی در سنین ۷ و ۲۸ روزه تهیه کردند. در جدول ۲-۵ و ۲-۶ میزان و نوع مواد مصرفی در تهیه بتن الیافی نشان داده شده است. نمونه‌ها از پاشش مخلوط از قبل تهیه شده در حالت مرطوب در قالب‌هایی به ابعاد  $100 \times 100 \times 30$  سانتی‌متر تهیه شده است. ماشین بتن پاش دارای ویژگی‌های ماکزیمم شعاع پاشش ۱۳ متر و حجم پاشش ۱۰-۱۲ متر مکعب

---

<sup>۱</sup> Jeng

در ساعت بوده است. تیرهای تهیه شده دارای ابعاد  $15 \times 15 \times 60$  سانتی متر بوده و با آزمایش خمش

سه نقطه‌ای با دهانه ۴۵ سانتی متر مورد بررسی قرار گرفته است [۸].

جدول ۲-۵ نوع و میزان مواد به کار رفته در تهیه بتن الیافی [۸]

شاخص نمونه	نوع الیاف	الیاف (کیلوگرم بر متر مکعب)	مقدار بتن (کیلوگرم بر متر مکعب)	فوم سیلیکا (کیلوگرم بر متر مکعب)	مصالح درشت دانه (کیلوگرم بر متر مکعب)	مصالح ریزدانه (کیلوگرم بر متر مکعب)	نسبت آب به سیمان	تعداد نمونه تهیه شده
A-1	A	۶۰	۴۰۰	۴۰	۶۳۰	۱۰۳۷	۰/۴۹	۳
A-2	A	۴۵	۴۰۰	۴۰	۶۴۵	۱۰۳۷	۰/۴۹	۳
A-3	A	۳۰	۴۰۰	۴۰	۶۶۰	۱۰۳۷	۰/۴۹	۳
B-1	B	۶۰	۴۰۰	۴۰	۶۳۰	۱۰۳۷	۰/۴۹	۳
C-1	C	۶۰	۴۰۰	۴۰	۶۳۰	۱۰۳۷	۰/۴۹	۶
C-2	C	۴۵	۴۰۰	۴۰	۶۴۵	۱۰۳۷	۰/۴۹	۶
C-3	C	۳۰	۴۰۰	۴۰	۶۶۰	۱۰۳۷	۰/۴۹	۳
D-1	D	۶۰	۴۰۰	۴۰	۶۳۰	۱۰۳۷	۰/۴۹	۳
E-1	A	۶۰	۴۵۰	۴۰	۶۳۰	۹۸۷	۰/۴۴	۳
E-2	A	۶۰	۳۵۰	۴۰	۶۳۰	۱۰۳۷	۰/۵۵	۳
F-1	A	۶۰	۳۸۵	۵۵	۶۳۰	۱۰۳۷	۰/۴۹	۳
F-2	A	۶۰	۴۱۵	۲۵	۶۳۰	۱۰۳۷	۰/۴۹	۳

جدول ۲-۶ خصوصیات الیاف به کار رفته در بتن الیافی [۸]

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (mm)	نسبت ظاهری	مقاومت کششی (MPa)	مواد	شکل الیاف
A	$30 \pm 2$	$0.55 \pm 0.1$	۵۵	۱۱۱۳	فولاد سرد شده کم کربن	دایره‌ای قلابدار
B	$30 \pm 2$	$0.71 \pm 0.1$	۴۲	۹۱۵	برش ورقه	صاف با مقطع مستطیلی نازک
C	$30 \pm 2$	$0.75 \pm 0.1$	۴۰	۹۲۵	فولاد سرد شده کم کربن	دایره‌ای قلابدار
D	$35 \pm 2$	$0.75 \pm 0.1$	۶۵	۱۱۲۵	فولاد سرد شده کم کربن	دایره‌ای قلابدار

جدول ۷-۲ نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روب نمونه‌های بتن الیافی [۸]

	$P_u$ (kgf)	$f_c$ (MPa)	$\sigma_c$ (MPa)	$N_b$	$N_t$	$I_5$	$I_{10}$	$I_{50}$	$I_{90}$	$I_{50}$	$R_{5,10}$	$R_{10,30}$	$R_{30,30}$	$(f_c)^{150}$ (MPa)	$(f_c)^{200}$ (MPa)	$(f_c)^{300}$ (MPa)	$(f_c)^{450}$ (MPa)	$(f_c)^{1mm}$ (MPa)	$(f_c)^{3mm}$ (MPa)	$(f_m)^{1mm}$	$(f_m)^{3mm}$
A-1	3940	5.19 ± 0.23	28.2	105	190	4.2	7.1	11.5	15.7	23.0	59.2	42.7	36.8	2.83	3.02	3.27	3.53	2.79	2.10	53.6	40.5
A-2	3691	4.99 ± 0.44	28.8	55	105	4.3	7.6	10.8	13.7	19.4	67.1	30.5	28.2	1.97	2.17	2.46	2.94	1.73	1.24	34.7	24.9
A-3	3658	4.85 ± 0.16	26.0	58	116	3.9	6.5	9.4	12.0	16.4	50.7	27.5	22.1	2.07	2.36	2.89	3.58	1.50	1.11	31.0	22.9
B-1	3978	5.08 ± 0.39	33.5	97	197	4.3	7.2	13.1	18.9	28.5	59.7	58.3	48.1	3.28	3.49	3.74	3.84	3.61	2.46	67.5	46.0
C-1	4002	5.45 ± 0.41	32.9	55	119	4.5	8.4	12.7	16.1	21.7	77.2	38.5	28.3	2.31	2.62	3.08	3.60	2.21	1.20	40.5	22.0
C-2	3535	4.53 ± 0.22	34.7	50	107	4.4	8.0	12.1	15.7	22.4	72.9	38.6	33.5	2.28	2.52	2.82	3.74	2.15	1.43	46.6	30.9
C-3	4029	5.35 ± 0.13	29.2	26	52	4.3	8.0	13.6	13.1	17.8	74.3	25.4	23.3	2.00	2.46	2.44	4.21	1.84	0.58	34.4	10.9
D-1	4054	5.45 ± 0.30	27.0	94	183	4.2	7.6	12.3	16.6	24.2	67.8	45.0	38.0	3.02	3.23	3.53	3.87	2.87	2.29	52.6	41.9
E-1	4647	5.99 ± 0.34	33.6	133	246	4.4	7.4	12.6	17.7	26.3	60.6	51.5	42.9	3.69	3.95	4.22	4.44	3.79	2.70	63.3	45.2
E-2	3530	4.71 ± 0.48	28.6	99	196	4.1	6.9	10.9	14.9	22.0	55.4	40.0	35.6	2.25	2.44	2.66	1.98	2.25	1.56	47.7	33.2
F-1	3899	5.21 ± 0.10	31.9	94	209	4.4	7.4	13.1	18.3	27.2	60.4	54.5	44.3	2.93	3.17	3.43	3.62	3.17	2.01	60.9	38.6
F-2	4101	5.22 ± 0.18	30.5	103	196	4.4	8.3	13.2	16.9	23.7	76.9	43.3	33.9	2.70	3.00	3.43	3.98	2.34	1.45	44.9	28.0

$f_c$  مقاومت خمشی اولین ترک  $\sigma_c$  مقاومت فشاری نمونه‌های استوانه‌ای  $N_b$  تعداد الیاف قرار گرفته در حالت کششی در سطح شکست  $N_t$  تعداد الیاف قرار گرفته بر روب نمونه‌های بتن الیافی قرار گرفته در سطح شکست

با توجه به جدول ۲-۷ نتایج آن‌ها نشان داد افزایش مقدار الیاف، سیمان و نسبت ظاهری الیاف، میزان طاقت و جذب انرژی بتن الیافی پاشیده را بهبود می‌بخشد [۸].

لئونگ<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۳ به مقایسه شاتکریت الیافی و بتن الیافی با طرح اختلاط مشابه پرداختند. آن‌ها پنج دسته نمونه طرح اختلاط را هم به صورت بتن الیافی و هم به صورت شاتکریت الیافی تهیه نمودند. عملیات اختلاط و مواد به کار برده شده در تمام نمونه‌ها یکسان و مطابق با جدول ۲-۸ بوده است. در تهیه نمونه‌ها، انواع مختلفی از الیاف نظیر الیاف فولادی (ST)، پلی‌پروپیلن<sup>۲</sup> (PP)، پلی‌وینیل‌الکل<sup>۳</sup> (PVA) و ترکیبی از پلی‌پروپیلن و پلی‌وینیل‌الکل به کار برده شده بود که خصوصیات آن‌ها در جدول ۲-۹ نشان داده شده است [۹].

جدول ۲-۸ مواد به کار برده شده برای تمام نمونه‌ها [۹]

سیمان	خاک سنگ	شن و ماسه رودخانه‌ای	آب	فوم سیلیسی
۴۳۰	۱۰۹۷	۳۶۵	۲۷۵	۳۵

جدول ۲-۹ خصوصیات الیاف به کار برده شده در بتن الیافی و شاتکریت الیافی [۹]

نوع الیاف	طول (mm)	قطر (μm)	مقاومت کششی (MPa)	E (GPa)	وزن مخصوص
الیاف فولادی (ST)	۳۵	۵۰۰	۱۱۵۰	۲۰۰	۷/۸۴
پلی‌پروپیلن (PP)	۱۵	۳۷	۸۰ تا ۱۱۰	۳/۵	۰/۹
پلی‌وینیل‌الکل (PAV)	۱۲	۵۰	۱۵۳۰	۳۳	۱/۳

<sup>۱</sup> Leung

<sup>۲</sup> Polyvinylalcohol

<sup>۳</sup> Polypropylene

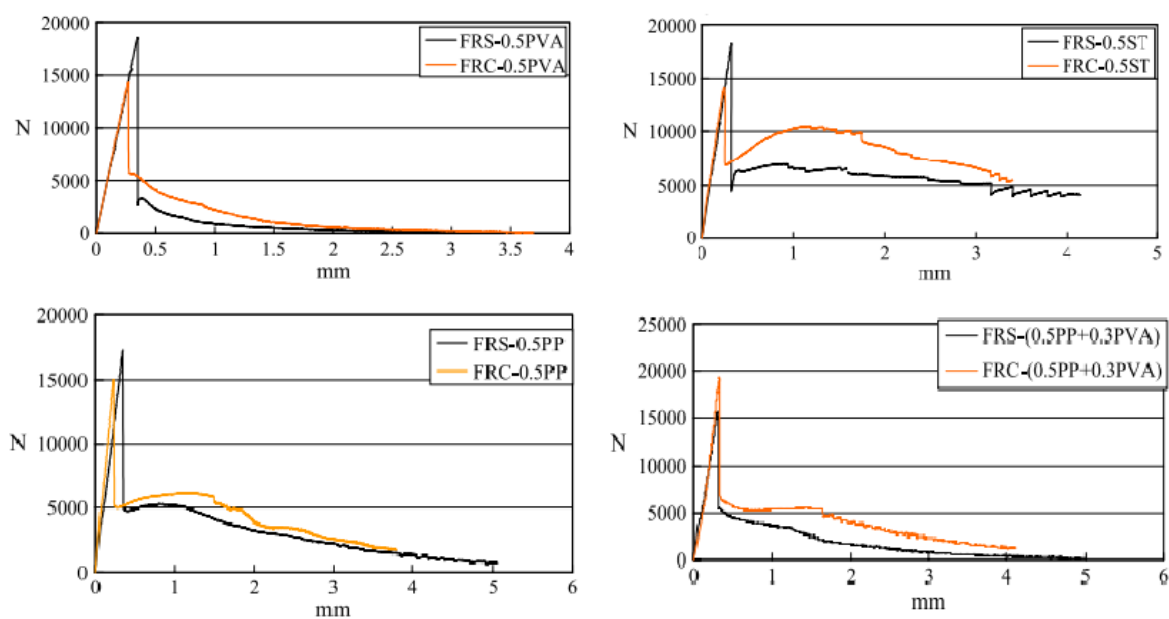
دسته‌ای از نمونه‌ها فاقد الیاف و سایر دسته‌ها به ترتیب دارای ۰/۵ درصد الیاف PP، ۰/۵ درصد الیاف PVA، ۰/۵ درصد الیاف ST و ترکیب ۰/۵ درصد الیاف PP و ۰/۳ درصد الیاف PVA بوده‌اند. برای تهیه نمونه‌های شاتکریتی، ابتدا مواد در مخزن میکسر ادغام و بعد از انتقال به دستگاه بتن پاش در قالب‌های چوبی به ابعاد  $1/2 \times 1/2$  متر توسط ربات پاشیده شد. برای تهیه نمونه‌های بتن الیافی نیز بعد از اختلاط مواد، بتن در قالب‌های فولادی ریخته و لرزاننده شد [۹].

آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌هایی استوانه‌ای شکل با قطر ۱۰۰ میلی‌متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی‌متر انجام شد که نتایج آن در جدول ۲-۱۰ نشان داده شده است. با توجه به جدول ۲-۱۰ مشاهده شد که مقاومت فشاری تک محوری بتن الیافی در همه نمونه‌ها بیشتر از شاتکریت الیافی است. همچنین با مسلح کردن بتن و شاتکریت به الیاف و قیاس آن با بتن و شاتکریت غیرمسلح مشاهده کردند که الیاف PP و PVA مقاومت فشاری را کاهش و الیاف فولادی (ST) مقاومت فشاری نمونه‌ها را تا ۳۰ درصد افزایش می‌دهد [۹].

جدول ۲-۱۰ مقاومت فشاری نمونه‌های شاتکریت الیافی و بتن الیافی [۹]

$(\sigma_c)_{FRS} / (\sigma_c)_{FRC}$	نمونه‌های شاتکریت		ترکیب
	نمونه‌های بتن		
	$\sigma_c (MPa)$	$\sigma_c (MPa)$	
۰/۷۶	۴۲/۹	۳۲/۴	معمولی (غیرمسلح)
۰/۸۴	۳۸/۶	۳۲/۲	PP درصد ۰/۵
۰/۷۰	۳۶/۸	۲۵/۷	PVA درصد ۰/۵
۰/۵۸	۵۸/۰	۳۳/۴	ST درصد ۰/۵
۰/۶۰	۴۴/۵	۲۶/۶	PVA درصد ۰/۳ و PP درصد ۰/۵

همچنین نمونه تیرهایی به ابعاد  $10 \times 10 \times 35$  سانتی‌متر را تحت آزمایش سه نقطه‌ای با دهانه ۳۰ میلی‌متر مطابق با ASTM C1018 قرار دادند که نتایج آن‌ها مطابق با شکل ۲-۳ بدست آمد و مقدار خروجی‌ها در جدول ۲-۱۱ بیان شده است.



شکل ۲-۳ نتایج حاصل از آزمایش خمش سه نقطه‌ای برای نمونه‌های مختلف از بتن ییافی و شاتکریت ییافی [۹]  
 جدول ۲-۱۱ مقادیر خروجی از آزمایش خمش سه نقطه‌ای برای نمونه‌های مختلف از بتن ییافی و شاتکریت ییافی

[۹]

FRC		FRS		بار (N)	
بار باقیمانده	بار اوج	بار باقیمانده	بار اوج		
L/150	L/600	L/150	L/600		
۳۹۶۱	۵۴۸۶	۱۵۰۲۹	۳۲۶۴	۴۸۹۷	۱۵۲۵۴
۵۸۳	۴۰۹۱	۱۴۳۳۲	۲۸۳	۲۳۳۳	۱۸۵۵۵
۸۶۰۶	۸۲۳۰	۱۴۰۲۰	۵۸۲۷	۶۳۸۸	۱۸۲۹۸
۳۹۵۶	۵۶۹۰	۱۹۲۲۰	۱۷۳۰	۴۵۲۴	۱۵۵۸۸
				PP درصد ۰/۵	
				PVA درصد ۰/۵	
				ST درصد ۰/۵	
				PP و درصد ۰/۵	
				PVA درصد ۰/۳	

آن‌ها نتیجه‌گیری کردند که مقاومت فشاری بتن ییافی به‌طور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از شاتکریت ییافی بوده است. همچنین مشاهده کردند مقاومت خمشی شاتکریت ییافی بیشتر از بتن ییافی بوده اما مقاومت خمشی باقیمانده شاتکریت ییافی از بتن ییافی کمتر است. [۹].



ماشیمو<sup>۱</sup> و همکارانش در سال ۲۰۰۶ آزمایشاتی را برای بررسی مکانیزم ترک خوردگی در پوشش بتنی و پوشش بتن الیافی فولادی طرح ریزی کردند. آن‌ها پی بردند که با افزودن الیاف به بتن، در شرایط نگهداری یکسان، ترک‌های ریز در زمان کمتری نسبت به یک بتن معمولی رخ می‌دهد اما در مقابل دارای عرض ترک‌های بسیار کوچک هستند. گسترش ترک در طول زمان نشان می‌داد افزودن الیاف به بتن از گسترش ترک‌ها جلوگیری می‌کند [۱۰].

## ۲-۵-۲ مطالعات عددی

مدلسازی عددی یکی از گسترده‌ترین روش‌ها برای بررسی اندرکنش احداث سازه‌های زیرزمینی است. از مزایای این روش با توجه به گسترش سخت‌افزاری و نرم‌افزاری کامپیوترها، سرعت و وسعت مدلسازی شرایط مختلف می‌باشد. از معایب مدلسازی عددی می‌توان به کاهش دقت نتایج به علت فرضیات انجام شده برای سادگی بیشتر اشاره کرد. در این بخش به چند مطالعه موردی که با استفاده از روش‌های عددی به مدل‌سازی بتن الیافی در تونل پرداخته‌اند، اشاره شده است.

در سال ۲۰۰۶ زمانیان و صحرانورد مدل‌سازی‌هایی از بتن پاشیده الیافی فولادی برای جایگزینی بتن‌ریزی درجا انجام دادند. این مطالعات بر روی قطعه دوم دوراهان - لوداب انجام گرفت. مسیر قطعه دوم دوراهان - لوداب از نظر توپوگرافی در حالت کوهستانی شدید بوده که مستلزم تونل‌زنی است. بر اساس داده‌های طبقه‌بندی انجام شده از توده سنگ با روش RMR، روباره و ساختار زمین شناسی منطقه، پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ میزبان، از قبیل پارامترهای چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ تعیین شده است. جدول ۲-۱۲ بحرانی‌ترین مقطع را از نظر روباره و سنگ میزبان نشان داده است که طراحی‌ها بر اساس این مقطع انجام گرفته است.

جدول ۲-۱۲ پارامترهای ژئومکانیکی سنگ میزبان [۱۱]

$\varphi$ (Deg)	C (KPa)	E (GPa)	روباره (متر)	RMR
۲۰	۱۵۰	۱/۵۸	۱۱۶	۳۱

<sup>۱</sup> Mashimo

قابل ذکر است که مقطع تونل به صورت نعل اسبی و دارای قطر ۸/۵ متر است و به صورت دو مقطعی با گام‌های حفاری ۲ متر در نظر گرفته شده است. در این پژوهش مدلسازی‌هایی با استفاده از نرم افزار Plaxis انجام و تحلیل استاتیکی شده است (جدول ۲-۱۳). همچنین تحلیل لرزه‌ای تونل با استفاده از نرم افزار SAP2000 ver.9 انجام گرفته است که نتایج آن در جدول ۲-۱۴ بیان شده است.

جدول ۲-۱۳ نیروهای وارد بر پوشش در حالت استاتیکی [۱۱]

$P(KN)$	$V(KN)$	$M(KN - m)$	نیروهای وارد بر پوشش
۱۸۸۲	۹/۸۲	۷/۳۸	بعد از بتن پاشی

جدول ۲-۱۴ نتایج تحلیل دینامیکی در شرایط مختلف بارگذاری

نتیجه	$V_u(ton)$	$M_u(ton.m)$	$P_u(ton)$	بارگذاری
قابل قبول	-----	۱۲/۷۴	۳۹/۴۴	کنترل مقاطع بحرانی خمش در ترکیب بار $1/3D + 1/4Rock + 1/4EQ$
قابل قبول	-----	۸/۰۵	۶۵/۲۹	کنترل مقاطع بحرانی نیروی محوری در ترکیب بار $1/3D + 1/4Rock + 1/4EQ$
قابل قبول	۵/۶	-----	-----	کنترل مقاطع بحرانی برش در ترکیب بار $1/3D + 1/4Rock + 1/4EQ$
قابل قبول	-----	۷/۲۷	۱۰۳/۹۷	کنترل مقاطع بحرانی خمش در ترکیب بار $1/3D + 1/4SymmetricRock + 1/4EQ$
قابل قبول	-----	۴/۳۱	۱۱۱/۵	کنترل مقاطع بحرانی نیروی محوری در ترکیب بار $1/3D + 1/4SymmetricRock + 1/4EQ$
قابل قبول	۶/۶۹	-----	-----	کنترل مقاطع بحرانی برش در ترکیب بار $1/3D + 1/4SymmetricRock + 1/4EQ$

آن‌ها پی بردند که ضخامت ۳۵ سانتی‌متر از بتن الیافی علاوه بر کفایت در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی ضریب اطمینان بسیار بالایی در اجرا ایجاد خواهد نمود و در شرایط یکسان به ضخامت کمتری از بتن الیافی به نسبت بتن ریزی درجا نیاز بوده و در برابر بارهای دراز مدت نظیر زلزله

مقاومت بهتری نسبت به بتن ریزی درجا از خود نشان می‌دهند. همچنین به مقادیر کمتری از فولاد نیاز بوده و از توجیه اقتصادی بهتری نیز برخوردار است [۱۱].

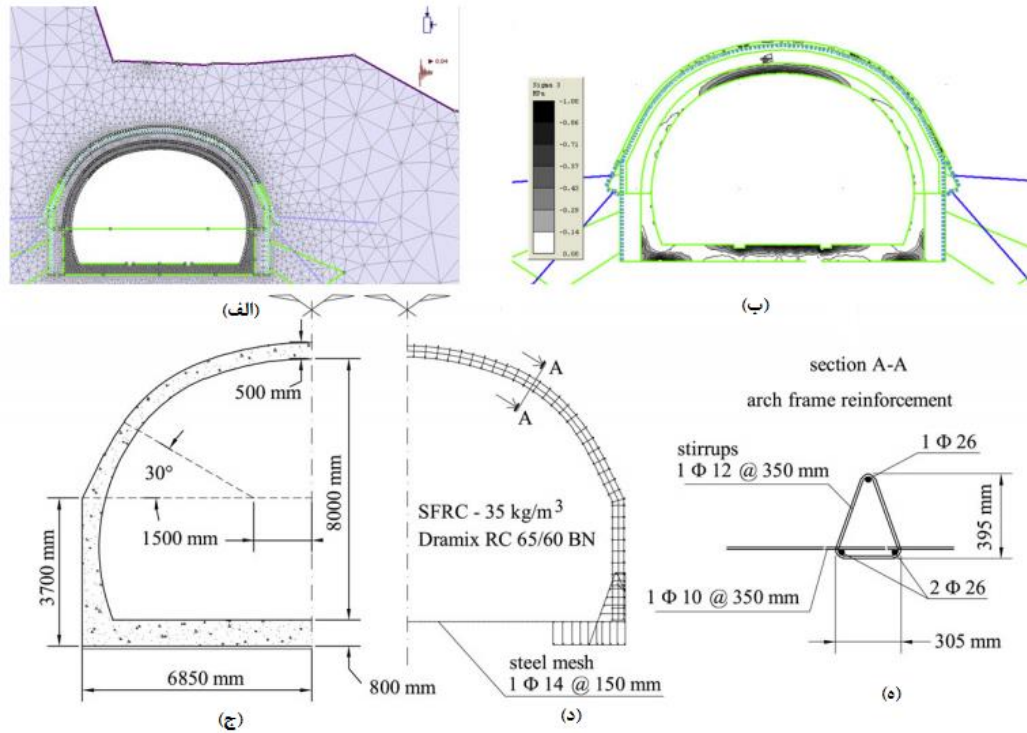
والینی<sup>۱</sup> و فانتیلی<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۹ به بررسی کاربرد الیافی در کنار آرماتور گذاری در پوشش تونل پرداختند. آن‌ها به مدلسازی پوشش تونل فاور<sup>۳</sup> در کشور ایتالیا با استفاده از نرم افزار المان محدود Phase2 پرداختند. در این مدلسازی شرایط بارگذاری به این طریق انجام گرفته است که در ابتدا محیط سنگی در برگیرنده تونل بدون در نظر گیری تونل مدل شده است (شرایط اولیه)، سپس حفاری تونل و پوشش اولیه در نظر گرفته شده است و در ادامه شرایط درازمدت تونل همراه با بارهای وارده از طرف جاده بالایی تونل و زلزله لحاظ شده است. در شکل ۲-۴ (الف و ب) به ترتیب چگونگی مش بندی و وضعیت تنش در پوشش نهایی نشان داده شده است. در شکل ۲-۴ (ج تا ه) به ترتیب خصوصیات هندسی پوشش، نحوه قرارگیری آرماتورها در پوشش و جزئیات مربوط به کمان تسلیح پوشش بتن نشان داده شده است. آن‌ها بر اساس استانداردهای Eurocode 2 و Rilem TC 162-TDF مقطع بهینه پوشش را مطابق با شکل ۲-۵ (الف) در نظر گرفتند و مطابق با آن شکل ۲-۵ (ب) را ترسیم کردند. آن‌ها پی بردند چه آرماتور موجود باشد و چه نباشد الیاف هم در مرحله بهره‌برداری و هم در مرحله گسیختگی اثر مثبتی بر بتن پوشش دارند. همچنین بیان کردند با استفاده از الیاف فولادی در کنار استفاده از آرماتور، می‌توان میزان آرماتور مصرفی را کاهش داد و حتی در بعضی موارد آرماتور را به کلی حذف کرد [۱۲].

---

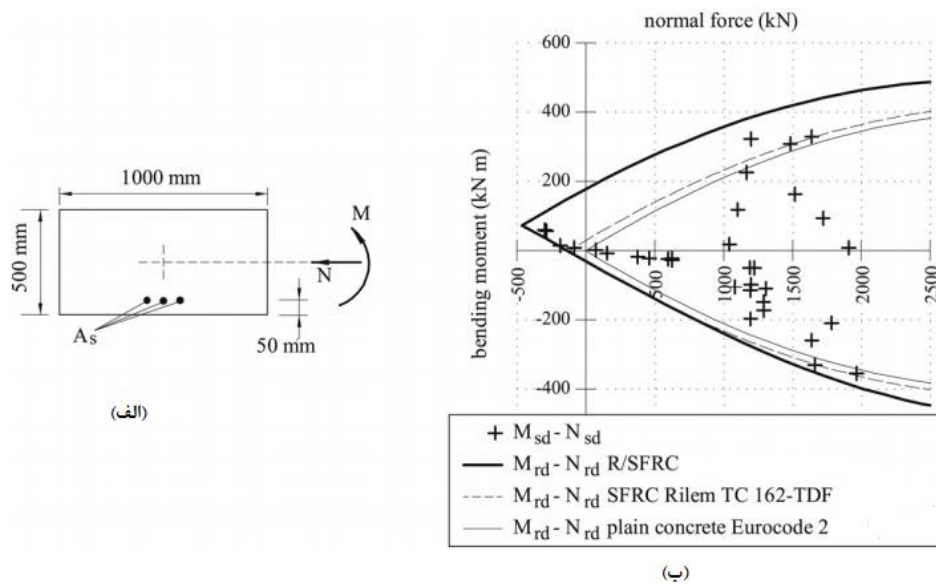
<sup>۱</sup> Vallini

<sup>۲</sup> Faver

<sup>۳</sup> Fantili

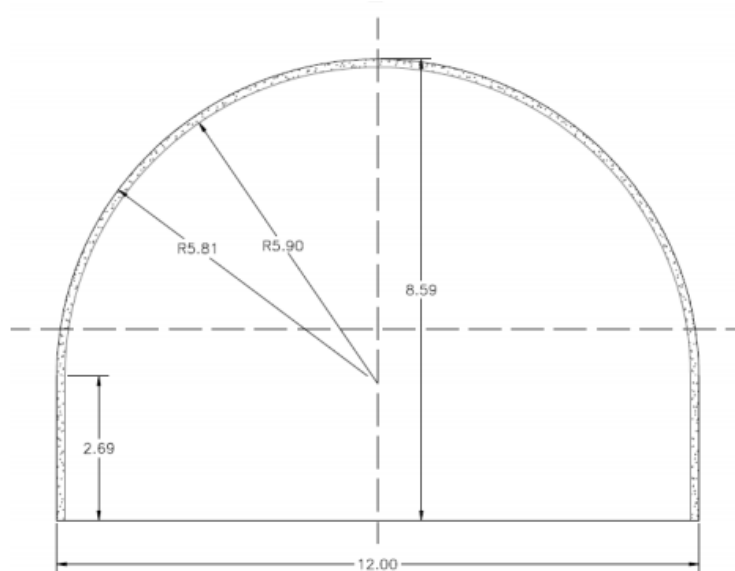


شکل ۲-۴ مقطع پوشش تونل فاوور در ایتالیا: (الف) مدل المان محدود و چگونگی مش بندی تونل؛ (ب) تنش‌های اصلی در پوشش نهایی؛ (ج) خصوصیات هندسی پوشش نهایی؛ (د) آرایش آرماتورها در مقطع؛ (ه) جزئیات مربوط به کمان تسلیح پوشش نهایی [۱۲]



شکل ۲-۵ پوشش مسلح بهینه تونل فاوور ایتالیا: (الف) خصوصیات هندسی مقطع پوشش؛ (ب) نیروهای محوری و ممان‌های خمشی وارد بر پوشش در قیاس با نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی پوشش [۱۲]

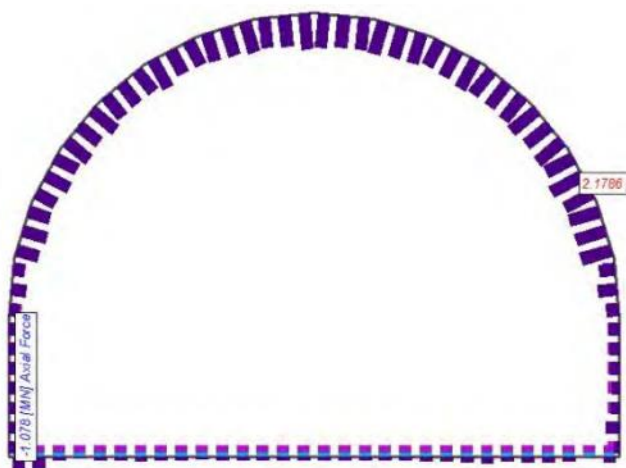
در سال ۲۰۱۱ صافی و همکارانش به بررسی ادغام الیاف مصنوعی و الیاف فولادی در بتن پاشیده پرداختند. این مطالعات بر روی تونل راه پارچین انجام گرفت. تونل راه پارچین در استان تهران و در مسیر تهران - پارچین و در نزدیکی سد ماملو واقع شده است. حدود یک کیلومتر از مسیر تونل در جنس‌های مختلف زمین شناسی از سنگ‌های آندزیت قوی تا لایه‌های شیل ضعیف حفاری شده است. شکل مقطع تونل در شکل ۶-۲ نشان داده شده است. چنانچه پوشش مرسوم به صورت بتن مسلح است ولی در اینجا برای تسریع در اجرای ساخت و ساز تونل، شاتکریت به عنوان پوشش نهایی پیشنهاد شده است. همچنین مشخصات مربوط به توده سنگ ضعیف در برگیرنده تونل در مقاطع بحرانی در جدول ۱۵-۲ بیان شده است [۱۳].



شکل ۶-۲ مقطع هندسی تونل پارچین [۱۳]

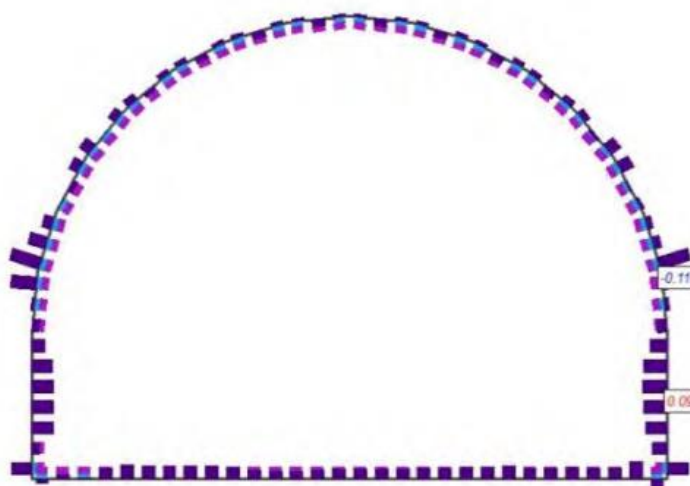
جدول ۱۵-۲ مشخصات توده سنگ در برگیرنده تونل [۱۳]

$\varphi$ (Deg)	$C$ ( $kg/cm^2$ )	E (GPa)	$\nu$	$\gamma_d$ ( $gr/m^3$ )
۲۰	۱/۵	۴	۰/۲۵	۲/۴



شکل ۲-۷ توزیع نیروهای محوری بر پوشش نهایی تونل پارچین [۸]

آن‌ها با بررسی نمونه‌های اجرا شده از بتن الیافی فولادی و پانل‌های ساخته شده از بتن الیافی و همچنین با انجام مدلسازی‌های عددی با استفاده از نرم افزار Phase2 که نتایج آن در شکل ۲-۷ و شکل ۲-۸ بیان شده است، بیان کردند که ۳۰ سانتی‌متر شاتکریت همراه با با ردیف پنل لوله مسلح به آرماتور می‌تواند پوشش نهایی تونل پارچین را تامین نماید. همچنین در نتیجه‌گیری‌ها بیان کردند بتن الیافی در مقایسه با روش‌های سنتی دارای سرعت اجرایی ۳ تا ۴ برابر بوده و به دلیل ادغام با پوشش اولیه و تشکیل پوشش یکپارچه کارایی بیشتری خواهد داشت [۱۳].



شکل ۲-۸ توزیع ممان‌های خمشی بر پوشش نهایی تونل پارچین [۱۳]

در سال‌های اخیر بیشتر تحقیقات معطوف به کارهای آزمایشگاهی و تاثیر خصوصیات فیزیکی و ساختاری الیاف و همچنین مطالعه بر الیاف جدید و چگونگی کارکرد آن در پوشش‌های پیش ساخته گذرانده می‌شود. در کشور ایران نیز تحقیقات چندانی در رابطه با بتن پاشیده الیافی برای پوشش تونل انجام نگرفته است.

## ۲-۶- جمع‌بندی

با توجه به مطالب ذکرشده در این فصل، بتن مسلح به الیاف فولادی می‌تواند به‌عنوان یکی از مصالح ارزان و با خاصیت مقاومتی بالا در امر ساخت و سازهای سطحی و زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. قابل ذکر است که بتن مسلح به الیاف فولادی لازم است قبل از قرارگیری در شرایط مختلف ساختاری، در محیطی آزمایشگاهی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد.



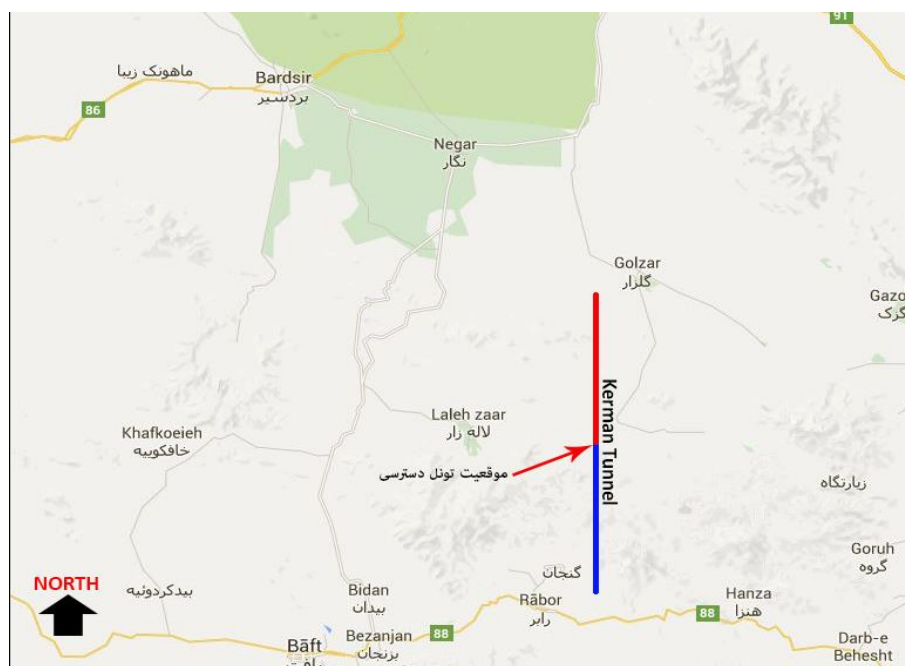


فصل سوم

تول دستری سرزه

### ۳-۱- مقدمه

اولین طرح آب‌رسانی در شهر کرمان مربوط به سال ۱۳۳۵ است که در این طرح ۵ حلقه چاه عمیق در دشت کرمان حفر شده است و در سال ۱۳۴۲ بهره‌برداری از چاه‌ها و سیستم آب‌رسانی متصل به آن‌ها آغاز شده است. در حال حاضر آب مورد نیاز شهر کرمان از ۴۲ حلقه چاه عمیق و تعدادی رشته قنات تامین می‌شود. مطالعات انجام شده توسط مهندسين مشاور مهتاب قدس بر روی مدل ریاضی آب زیرزمینی دشت‌های کرمان، بردسیر، قریه العرب و بهرام‌جرد (۱۳۶۹ تا ۱۳۷۰) نشان می‌دهد که بیلان آب‌های زیرزمینی در مناطق مذکور کلاً منفی بوده و سطح آب زیرزمینی در طی زمان به تدریج افت نموده است. با روند فعلی رشد جمعیت پیش‌بینی می‌شود که تا سال ۱۴۰۰ جمعیت شهر کرمان از یک میلیون نفر گذشته و در این صورت نیاز آب مصرفی سالیانه به حدود بیش از ۱۰۰ میلیون متر مکعب خواهد رسید. از این رو برای برطرف کردن این نیاز تونل انتقال آبی از سد صفا به کرمان در نظر گرفته شده است. گستره‌ای از طرح احداث سازه تونل در ارتفاعات جنوب بهرام‌جرد واقع شده که محدوده‌ای از رابر تا گلزار را شامل شده است [۱].



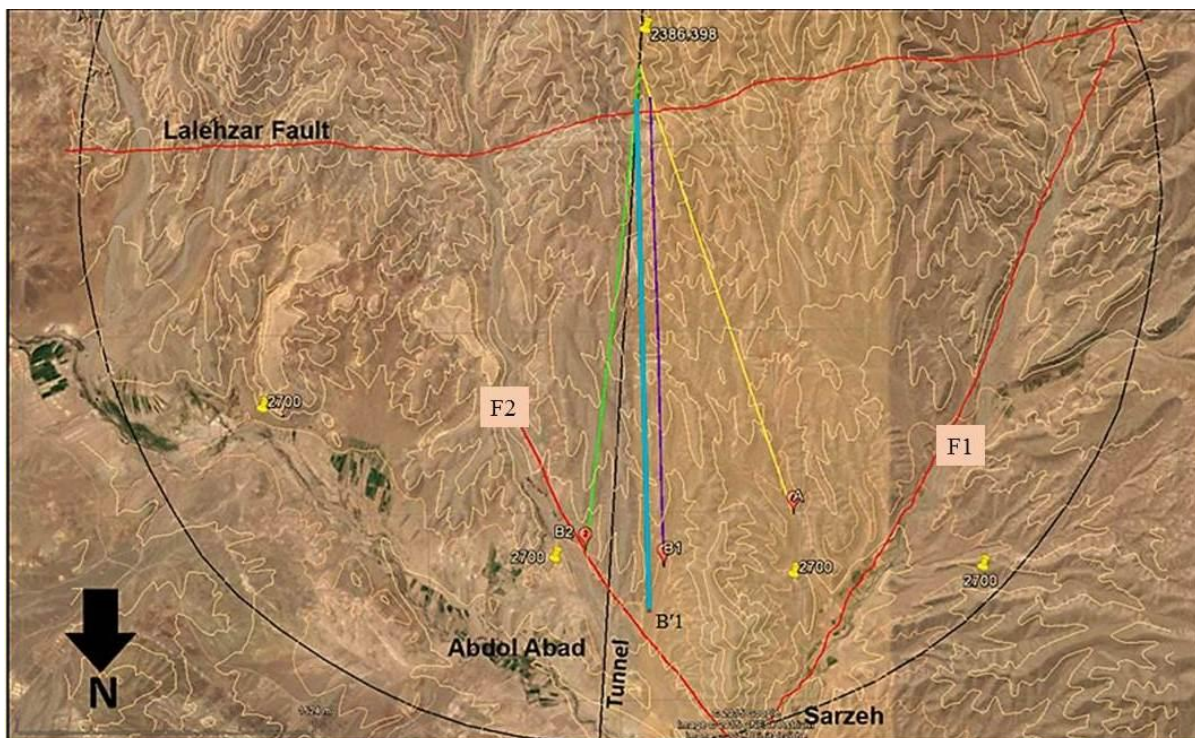
شکل ۳-۱ موقعیت جغرافیایی تونل انتقال آب کرمان [۱]

### ۳-۲- مشخصات پروژه

تونل انتقال آب از سد صفا به کرمان، تونلی به طول ۳۸ کیلومتر است که دهانه ورودی آن از فاصله ۱۳ کیلومتری سد صفا واقع در ۷/۵ کیلومتری جنوب شهرستان رابر شروع شده و در منطقه‌ای در نزدیکی گلزار و در حدود ۷۰ کیلومتری جنوب شهر کرمان خاتمه می‌یابد.

در آخرین تغییرات تصویب شده، این تونل به دو قطعه تقریباً مساوی تقسیم می‌شود. قطعه اول (جنوبی) با طول حدود ۱۹/۲ کیلومتر و شیب ۰/۰۶ درصد از دهانه ورودی (تراز ۲۳۷۵ متر از سطح دریا) تا روستای سرزه (تراز ۲۳۸۷) ادامه دارد. قطعه دوم با شیب ۰/۱۳۶- درصد از محدوده حدود ۱۹+۲۰۰ متر (ادامه قطعه اول) شروع شده و وظیفه آن انتقال آب با جریان آزاد از تراز ۲۳۸۷ به دهانه خروجی (تراز ۲۳۶۱) است.

در این پروژه به منظور خروج ماشین TBM از تونل اصلی و همچنین محدودیت‌های هیدرولیکی در قطعه تحت فشار؛ احداث سازه دسترسی (شفت یا تونل) ضرورت یافته است. در طراحی هیدرولیکی مسیر لازم شده است که سازه دسترسی، تونل اصلی را در محدوده حدود ۱۹+۲۰۰ متر قطع کند. با توجه به مهم‌ترین معیارهای جانمایی تونل دسترسی از قبیل مشخصات و کارایی تونل، مخاطرات زمین‌شناسی، شرایط زیست‌محیطی، تملک زمین و راه‌های دسترسی، گزینه موسوم به B1' به عنوان گزینه برتر پیشنهاد شده است. این گزینه تونلی به طول ۲۶۵۸ متر و شیب ۱۱/۸ درصد است که برای دسترسی به دهانه آن احداث جاده‌ای با طول حدود یک کیلومتر از جاده خاکی روستای سرزه ضرورت دارد [۱] (شکل ۳-۲).

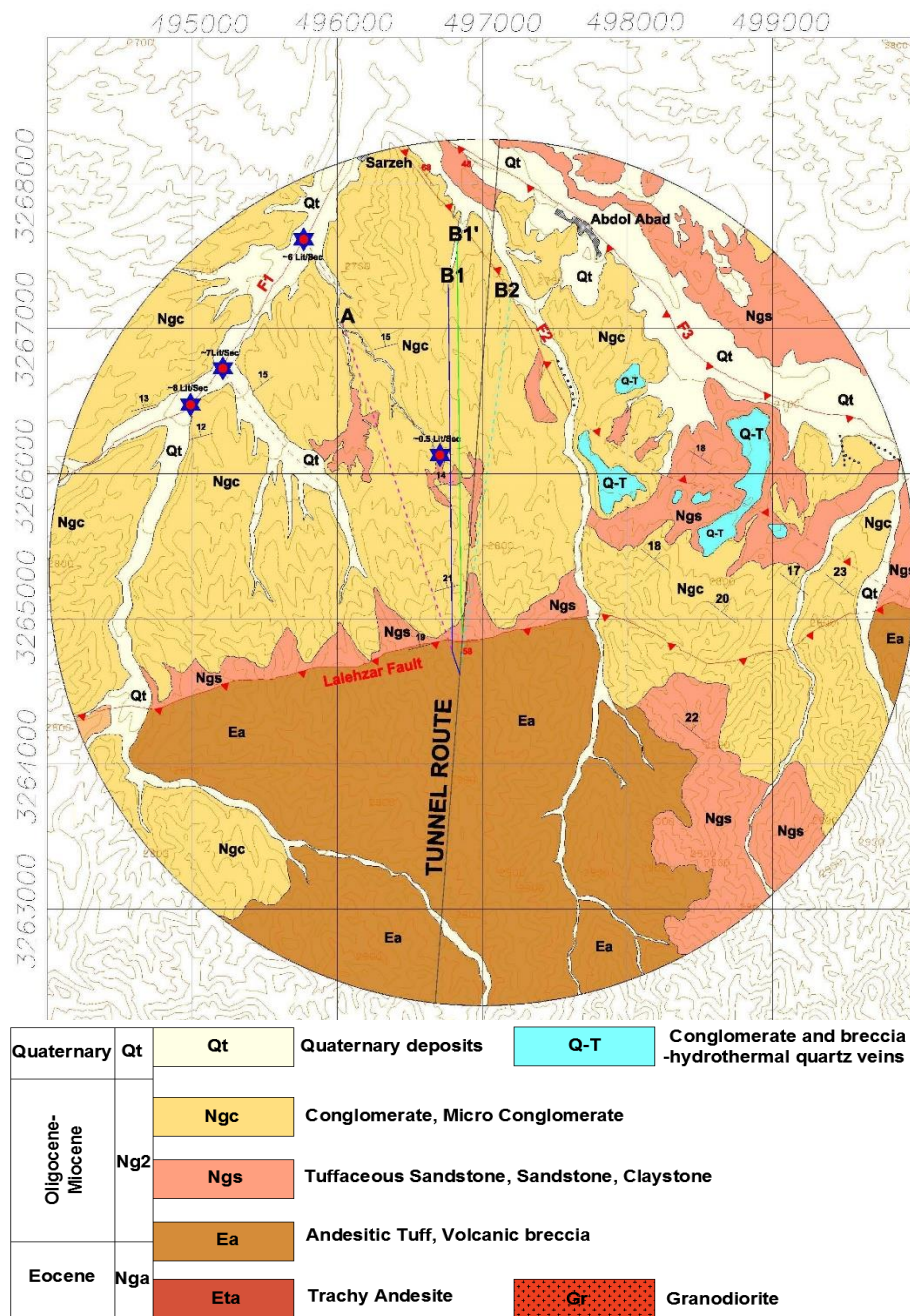


شکل ۲-۳ موقعیت گزینه‌های پیشنهادی تونل دسترسی [۱]

### ۳-۳- زمین‌شناسی عمومی تونل دسترسی سرزه

سازندی که بیشترین گسترش را در جنوب و شمال منطقه دارد آذرین‌های دوره‌ی نئوژن بوده که تقریباً تمامی ارتفاعات جنوب دشت‌ها را به وجود آورده است. بلندترین ارتفاعات منطقه نظیر کوه هزار از نوع این سازند است. فعالیت ماگمایی نئوژن اغلب زیردریایی بوده و در مواقعی که از فعالیت ماگما کاسته شده، آثار آن را به صورت بین لایه‌ای با سنگ‌های رسوبی می‌توان مشاهده نمود. همچنین از نئوژن می‌توان رسوبات نوع ماسه‌سنگ، کنگلومرا، سیلت، مارن و مارن ماسه دار را نام برد که اغلب دارای سیمان بندی سست بوده و تخریب آن‌ها در سطح زمین قشر ضخیمی از آبرفت‌ها را تشکیل داده است. این نوع رسوبات در حاشیه ارتفاعات و به طور پراکنده در سطح دشت رخنمون دارند. بخش مارنی این سازند در اغلب مناطق سنگ کف سفره را به وجود می‌آورد. واحد سنگی گرانیته‌ی که با توجه به روابط قطع شدگی جوان‌تر از آذرین‌های دوره‌ی نئوژن است بخش عمده‌ای از مسیر تونل انتقال را شامل می‌شود. بر اساس نقشه زمین‌شناسی مهندسی ۱/۲۵۰۰۰ تونل دسترسی سرزه در مجموعه

کنگومرا و ماسه‌سنگ با سیمان ضعیف (واحد Ng2) و سنگ‌های آذرآواری همراه با کنگومرا (واحد Nga) واقع شده است. بازدیدهای صحرایی که از کل محدوده صورت گرفته نشان می‌دهد که هر یک از این واحدها به نوبه خود قابل تقسیم به واحدهای سنگی مجزایی هستند که نتیجه مطالعات اخیر به صورت نقشه در شکل ۳-۳ آورده شده است [۱].



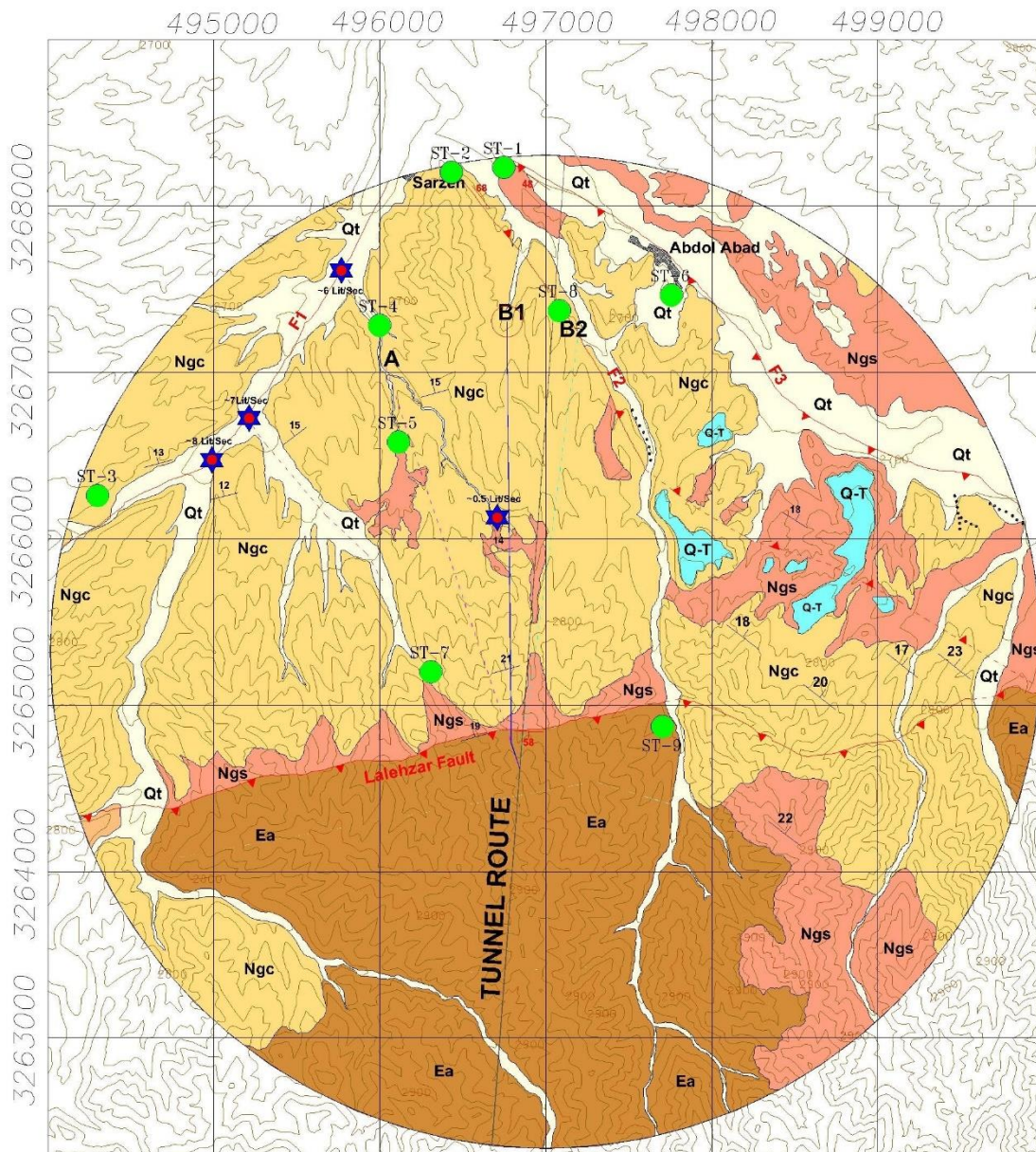
شکل ۳-۳ واحدهای سنگی شناسایی شده در نقشه زمین‌شناسی مسیر تونل دسترسی سرزه [۱]

همان‌طور که در نقشه زمین‌شناسی شکل ۳-۳ ملاحظه می‌شود واحدهای ایوسن بالایی - الیگوسن شامل واحد Nga است که به دو زیر واحد Ea و Eta تقسیم شده است. بر روی آن واحدهای الیگو - میوسن Ng2 قرار دارد که به واحدهای Ngc و Ngs و بخش‌های بالایی واحد Ea تفکیک یافته است. بر روی واحد Ngc رسوبات کواترنری قرار دارند که واحدهای کواترنری در محدوده تونل دسترسی به واحدهای Qt و Q-T تقسیم می‌شوند. واحد Qt در منطقه مورد مطالعه عمدتاً از رسوبات رودخانه‌ای کنگلومرایی سخت نشده تا کمی سخت شده تشکیل شده است که در امتداد رودخانه‌های اصلی گسترش یافته‌اند. این رسوبات با توجه به موقعیت قرارگیری آن‌ها ضخامتی تا حدود ۱ متر را شامل می‌شوند. در راستای دره‌های شیرینک و سرزه بیشترین میزان این رسوبات بوده که در محل اتصال این دو رودخانه اصلی در شمال شرق نقشه بیشینه میزان این رسوبات قابل مشاهده می‌باشد و به تدریج به سمت سرمنشا این رودخانه‌ها در جنوب محل تقاطع تونل اصلی و تونل دسترسی کمترین میزان گسترش این رسوبات قابل مشاهده می‌باشد.

واحد Q-T شامل واحدهای برشی و کنگلومرایی به شدت سیمان شده با رسوبات کربناتی و سیلیسی هیدروترمالی است. گسترش این واحد در محدوده گسل F1 می‌باشد و به نظر می‌رسد سیالات هیدروترمال پس از عبور از درزه‌ها و شکستگی‌های زون گسله، به منافذ واحد کنگلومرایی نفوذ کرده و به صورت سیمان یا رگه‌های سیلیسی جایگزین شده است.

### ۳-۴- زمین‌شناسی مهندسی تونل دسترسی سرزه

مطالعات زمین‌شناسی مهندسی از مهم‌ترین بخش‌های مطالعاتی در صنعت تونل‌سازی است. به منظور جمع‌آوری داده‌های زمین‌شناسی مهندسی، بازدیدهای صحرایی از منطقه انجام شده است. در محدوده مورد مطالعه ۹ ایستگاه نمونه‌برداری جهت بررسی خصوصیات مهندسی سنگ بکر و توده سنگ‌ها مشخص شده است که در هر ایستگاه از طریق برداشت و آزمون‌های مقدماتی صحرایی، ویژگی‌های سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها تعیین شده است (شکل ۳-۴) [۱].



شکل ۳-۴ موقعیت ایستگاه‌های برداشت زمین‌شناسی مهندسی [۱]

منظور از ویژگی‌های توده سنگ‌ها آن دسته از خصوصیات است که به‌طور مستقیم بر رفتار مکانیکی توده سنگ‌ها و میزان پایداری آن‌ها هنگام حفر تونل و همچنین بر قابلیت حفاری آن‌ها تاثیر می‌گذارد. این ویژگی‌ها علاوه بر این که منعکس‌کننده رفتار فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ هستند تا حد زیادی به شرایط ناپوستگی‌ها نیز وابسته هستند.

### ۳-۴-۱- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ

ویژگی‌های ماده سنگ را می‌توان شامل مواردی نظیر مقاومت فشاری تک‌محوری، مقاومت کششی، پارامترهای مقاومت برشی، مدول یانگ، سایندگی و سختی دانست. تعیین این خواص نیازمند نمونه‌برداری صحیح و دقیق از تمامی واحدهای سنگی منطقه و انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی این نمونه‌ها می‌باشد، اگرچه با استفاده از برخی از آزمون‌های مقدماتی صحرایی و روابط تجربی نیز قابل تخمین هستند.

مقاومت فشاری یکی از خصوصیات سنگ بکر است که با انجام آزمون‌های صحرایی مقدماتی بر روی رخنمون‌های سطحی تعیین می‌شود. ساده‌ترین آزمونی که در این زمینه وجود دارد، آزمون شاخص دستی است که می‌توان با استفاده از چکش زمین‌شناسی، مقاومت تراکمی تک‌محوری سنگ‌ها را تخمین زد. در این پروژه، علاوه بر آزمون صحرایی فوق از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی در گمانه DH-7 نیز برای تدقیق خصوصیات ماده سنگ در محدوده مورد مطالعه استفاده شده است (جدول ۳-۱).

جدول ۳-۱ برخی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی حاصل از مغزه‌های گمانه DH-7 [۱]

عمق (m)	سنگ شناسی	تخلخل (%)	جذب آب (%)	چگالی اشباع ( $gr/cm^3$ )	چگالی خشک ( $gr/cm^3$ )	UCS (MPa)
۱۷۶	کنگومرا	۸/۲۰	۳/۴۳	۲/۴۶	۲/۳۸	۷۴/۵۳
۲۵۲	کنگومرا	۱۴/۷۳	۶/۲۲	۲/۵۱	۲/۳۶	
۲۶۶	کنگومرا	۱۴/۵۰	۶/۳۹	۲/۴۱	۲/۲۶	۳۵/۱۱
۲۷۸	کنگومرا	۱۹/۱۸	۸/۷۳	۲/۳۸	۲/۱۹	
۳۵۷	کنگومرا	۱۲/۳۰	۵/۳۸	۲/۴۲	۲/۲۹	۳۲/۸۰
۳۷۰	کنگومرا	۸/۸۴	۳/۷۷	۲/۴۲	۲/۳۳	۶۸/۷۷
۳۷۷	کنگومرا	۹/۱۱	۳/۹۱	۲/۴۲	۲/۳۳	۳۶/۳۴
۴۴۲	کنگومرا	۸/۶۴	۳/۶۲	۲/۴۲	۲/۳۶	
۵۳۸	کنگومرا	۶/۸۶	۲/۸۳	۲/۴۹	۲/۴۲	



### ۲-۴-۳- مشخصات ناپیوستگی‌ها

برای تعیین شرایط ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ‌ها لازم است مشخصات ناپیوستگی‌ها در بخش‌های مختلف محدوده مورد مطالعه، با استفاده از روش خط برداشت<sup>۱</sup> یا به صورت پراکنده در ایستگاه‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. مشخصات ناپیوستگی‌ها که بر رفتار ژئومکانیکی توده سنگ موثر هستند را می‌توان در دو گروه ویژگی‌های هندسی و ویژگی‌های مکانیکی دسته‌بندی نمود. ویژگی‌های دسته اول شامل موقعیت فضایی و هندسی (جهت شیب، زاویه شیب، تعداد دسته ناپیوستگی‌ها، فاصله‌داری و تداوم، زبری، موج‌داری، بازشدگی و مواد پرکننده) می‌باشد که در گزارش مربوط به زمین‌شناسی منطقه بر اساس روش پیشنهادی ISRM 1981 از رخنمون‌های سطحی توده سنگ‌های منطقه برداشت شده و مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی‌های مکانیکی ناپیوستگی‌ها (پارامترهای مقاومت برشی سطح ناپیوستگی‌ها) نیز بر اساس اطلاعاتی که از ارزیابی‌های صحرایی به دست آمده است، تعیین شده است.

### ۲-۴-۳- طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ

از کاربردی‌ترین سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ می‌توان سیستم‌های RMR، GSI، Q و RMI را نام برد که در هر یک از این روش‌های طبقه‌بندی، تعیین پارامترهای سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها ضرورت دارد. در این گزارش با توجه به شرایط زمین‌شناسی در هر ایستگاه و خصوصیات ناپیوستگی‌ها و ویژگی‌های سنگ بکر، از یکی از روش‌های طبقه‌بندی استفاده شده و سپس با استفاده از روابط تجربی سایر روش‌های طبقه‌بندی محاسبه شده است.

سیستم طبقه‌بندی ژئومکانیکی توده سنگ که به طبقه‌بندی RMR معروف است مبتنی بر ۶ پارامتر مطابق با رابطه ۱-۳ است [۱۴].

$$RMR = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B \quad (1-3)$$

$A1$  امتیاز مقاومت تراکمی تک‌محوری؛  $A2$  امتیاز کیفیت مغزه حفاری شده (RQD)؛  $A3$  امتیاز فاصله درزه‌ها؛  $A4$  امتیاز شرایط درزه‌ها؛  $A5$  امتیاز شرایط آب زیرزمینی؛  $B$  امتیاز جهت‌گیری درزه‌ها یکی از محدودیت‌ها در سیستم طبقه‌بندی  $RMR$  عدم اختصاص امتیاز به شرایط تنش در توده سنگ است. بنابراین در شرایطی که پدیده مچاله شدگی<sup>۱</sup> و یا انفجار سنگ<sup>۲</sup> وجود داشته باشد استفاده از  $RMR$  پیشنهاد نمی‌شود. همچنین در زون‌های خرد شده و گسله و یا سنگ‌های متورم شونده طبقه‌بندی با سیستم  $RMR$  مشکل است [۱۵].

سیستم طبقه‌بندی نیروژی در سال ۱۹۷۴ توسط بارتن بکار گرفته شد و به نام شاخص کیفی تونل‌سازی ( $Q$ ) شهرت یافت. مطابق با رابطه (۲-۳)، این سیستم نیز شامل ۶ پارامتر تعیین‌کننده کیفیت توده سنگ است [۱۵]:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (2-3)$$

در این رابطه  $RQD$  کیفیت مغزه حفاری شده؛  $J_n$  عدد دسته درزه؛  $J_r$  عدد زبری سطح درزه؛  $J_a$  عدد هوازدگی سطح درزه؛  $J_w$  عدد وضعیت آب در درزه؛  $SRF$ : ضریب کاهش تنش است.

یکی از معایب این سیستم طبقه‌بندی، وجود دامنه بزرگ مقادیر عددی  $Q$  است که در این سیستم بهترین شرایط برای انتخاب نوع نگهدارنده تونل، استفاده از مقادیر  $0.1 < Q < 40$  است [۲۰].

شاخص استحکام توده سنگ<sup>۳</sup> یا سیستم طبقه‌بندی  $GSI$  که توسط هوک و مارینوس<sup>۴</sup> معرفی شده است بر این فرض استوار است که توده سنگ توسط یک زمین‌شناس و یا زمین‌شناس مهندس با

<sup>۱</sup> Squeezing

<sup>۲</sup> Rock bursting

<sup>۳</sup> Geological Strength Index

<sup>۴</sup> Hoek and Marinos (2000)

تجربه و ماهر مشاهده شده است. بنابراین طبقه‌بندی GSI یک سیستم کاملا بصری است که گاهی می‌تواند مقادیر متفاوتی را لحاظ کند [۱۶].

در این پروژه طبقه‌بندی توده سنگ در سیستم GSI به صورت توصیفی و با استفاده از چارت پیشنهادی هوک و مارینوس صورت می‌گیرد.

شاخص توده سنگ RMI اولین بار توسط پالمستروم معرفی شد. این سیستم به عنوان تخمینی در تعیین مقاومت فشاری توده سنگ بکار می‌رود [۱۵].

به منظور طبقه‌بندی توده سنگ، داده‌های برداشت شده از هر ایستگاه در صفحه گسترده ثبت می‌شود. در این گزارش برای محاسبه مقادیر RMR، Q و RMI از صفحه گسترده پالمستروم استفاده شده است (جدول ۲-۳) [۱۵].

جدول ۲-۳ داده‌های ورودی در تعیین سه سیستم طبقه‌بندی توده سنگ [۱۵]

INPUT PARAMETERS		UNIT	Symbol used in:		
Parameter	Classification		RMR	Q	RMI
A. ROCK(S)	Uniaxial compressive strength of intact rock	MPa	A1	<sup>1)</sup>	$\sigma_c$
B. DEGREE OF JOINTING	RQD (Rock Quality Designation)	%	A2	RQD	-
	Block volume	m <sup>3</sup>	-	-	Vb
C. JOINTING PATTERN	Average joint spacing	m	A3	-	-
	Number of joint sets (at the actual location)	rating	-	Jn	Nj
D. JOINT CHARACTERISTICS	Orientation of main joint set	rating	B	-	Co
	Joint smoothness	rating	A4c	Jr <sup>2)</sup>	jR <sup>2)</sup>
	Joint waviness	rating	-		
	Joint alteration (weathering and filling)	rating	A4e	Ja	jA
	Joint size (length)	rating	A4a	-	jL
	Joint persistence (continuity)	rating	-	-	cj
	Joint separation (aperture)	rating	A4b	-	-
E. INTERLOCKING	Compactness of rockmass structure	rating	-	-	IL
F. GROUND WATER	Water inflow or water pressure	rating	A5	Jw	GW
G. ROCK STRESSES (around tunnel)	Stress level	rating	-	SRF	SL
	Overstressing (rock burst or squeezing ground)	rating	-		CF <sup>3)</sup>
H. WEAKNESS ZONE	Type of weakness zone	rating	-	-	-
	Size (thickness) of the zone	m	-	-	Tz
	Orientation of the zone	rating	-	-	Coz

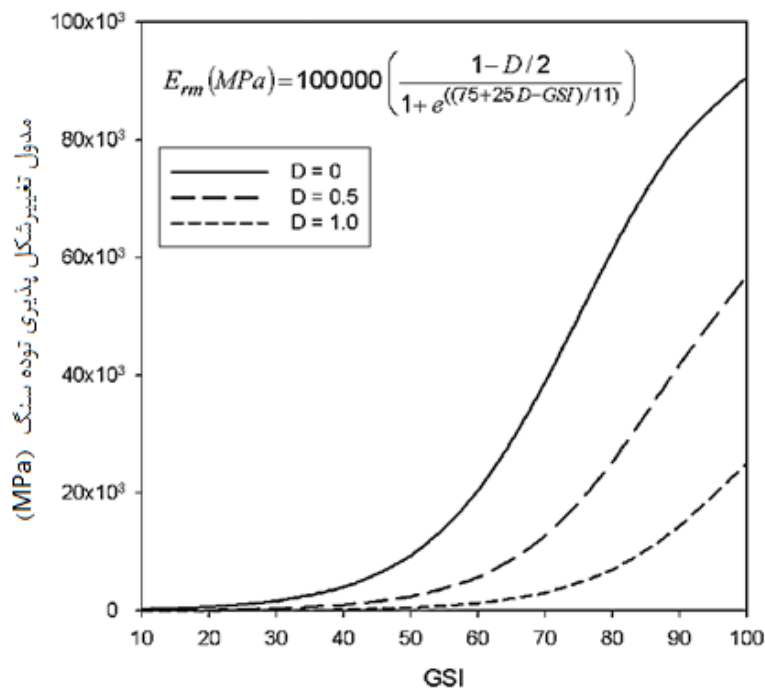
<sup>1)</sup> Compressive strength of rock is included in the revised  $Q_c = Q \times \sigma_c / 100$  (Barton, 2002); <sup>2)</sup>  $J_r = jR = j_s \times j_w$ ; <sup>3)</sup> CF = rockmass competency. Interlocking of the rockmass structure is included in the RMI in this paper. In this way the effect of disturbed rockmasses is included.

### ۳-۴-۵- تعیین پارامترهای مقاومتی توده سنگ

برای تعیین پارامترهای مقاومتی توده سنگ از معیار شکست هوک و براون استفاده شده است. این معیار رابطه‌ای تجربی بین تنش‌های اصلی حداقل و حداکثر برقرار می‌کند. و برای پیش‌بینی رفتار ماده سنگ و توده سنگ درزه‌دار قابل استفاده است (رابطه ۳-۳).

$$\sigma_1 = \sigma_r + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_r}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (3-3)$$

در این رابطه  $\sigma_{ci}$  مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر و پارامترهای  $m_b$ ،  $s$  و  $a$  ثابت‌های توده سنگ هستند. با استفاده از معیار فوق و بهره‌گیری از نرم افزار Roclab پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت چسبندگی توده سنگ تخمین زده شده است. همچنین مدول تغییر شکل توده سنگ با بکارگیری مقادیر GSI و رابطه هوک- دایدرکس<sup>۱</sup> (رابطه ۳-۴) تخمین زده می‌شود (شکل ۳-۵) [۱۷].



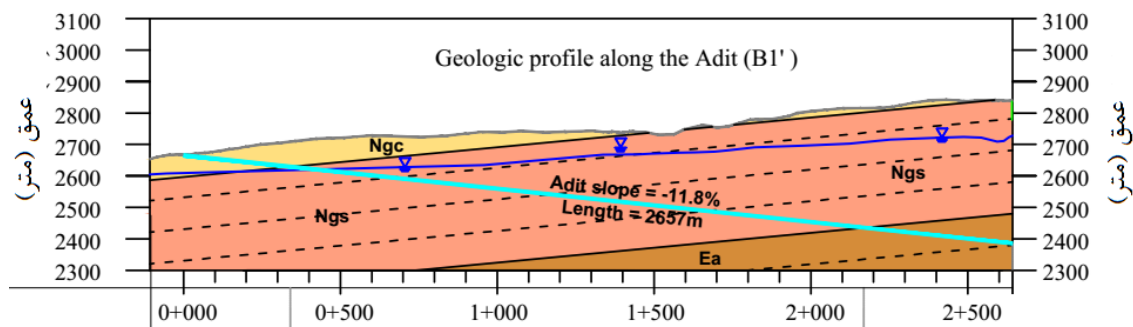
شکل ۳-۵ تخمین تجربی مدول تغییر شکل توده سنگ [۱۶]

<sup>۱</sup> Hoek- Diederichs

$$E_m = E_i \left( 0.02 + \frac{1-D/2}{1 + e^{((6.0+1.5D-GSI)/11)}} \right) \quad (4-3)$$

### ۵-۳- تفکیک واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در مسیر تونل دسترسی

همان‌طور که در بخش ۳-۳ توضیح داده شده است سنگ‌هایی که در گستره مورد مطالعه قرار دارند به ۷ واحد تقسیم می‌شوند. با توجه به شکل ۶-۳، از واحدهای مذکور ۳ واحد Ngc، Ngs، Ea و در مسیر تونل دسترسی قرار دارند و در جدول ۳-۳ نمایش داده شده است.



شکل ۶-۳ پروفیل طولی مسیر تونل سرزه در گذر از واحدهای زمین‌شناسی [۱]

جدول ۳-۳ واحدهای زمین‌شناسی مهندسی در گستره مورد مطالعه [۱]

ردیف	نام واحد	لیتولوژی	محدوده قرارگیری در تونل (m)
۱	Q- T	کنگلومرای سیلیسی شده هیدروترمال	در مسیر تونل قرار نمی‌گیرد
۲	Qt	نهشته‌های کواترنری	در مسیر تونل قرار نمی‌گیرد
۳	Ngc	کنگلومرای و میکروکنگلومرای	۰ - ۳۷۲
۴	Ngs	ماسه‌سنگ توفی، ماسه‌سنگ و رس سنگ	۳۷۲ - ۲۱۳۷
۵	Ea	توف آندزیتی و برش ولکانیکی	۱۷۶۵ - ۲۶۹۰
۶	Eta	تراکی آندزیت	در مسیر تونل قرار نمی‌گیرد
۷	Gr	گرانودیوریت	در مسیر تونل قرار نمی‌گیرد

### ۵-۳-۱- واحد Ngc

واحد کنگلومرایی و میکروکنگلومرایی Ngc جوان‌ترین واحد سنگی در مسیر تونل دسترسی سرزه است که بر روی نقشه زمین‌شناسی، بخش عمده‌ای از گستره مورد مطالعه را می‌پوشاند. تحت تاثیر عوامل فرسایشی رخنمون این واحد در منطقه بیشتر به صورت رسوبات بادی است که گاهی ضخامت

رسوبات تا ۴ متر نیز تخمین زده شده است. بر اساس پروفیل زمین‌شناسی این واحد از دهانه ورودی تونل سرزه شروع شده و با شیب ملایم تا محدوده ۳۷۲ +۰ متر ادامه می‌یابد. در بازدیدهای میدانی ۵ ایستگاه (ST-2, ST-3, ST-4, ST-5, ST-8) در این واحد قرار گرفته‌اند که به دلیل وجود ساختارهای زمین‌شناسی متفاوت، خصوصیات فیزیکی و مهندسی توده سنگ در هر ایستگاه منحصر به فرد است [۱].

ایستگاه ST-2 در مجاورت گسل F2 قرار دارد بنابراین شرایط واحد Ngc در این ایستگاه توصیف کننده گسل F2 می‌باشد. ضخامت پهنه برشی این گسل که در آن توده سنگ به شدت خرد شده است در حدود ۵۰ متر است. به دلیل هوازگی شدید و کیفیت بسیار پایین توده سنگ ( $GSI = 10$ ) امکان تعیین پارامترهایی مهندسی توده سنگ وجود نداشته است (شکل ۷-۳) [۱].



شکل ۷-۳ ایستگاه ST-2 (خرد شدگی واحد کنگلومرای تحت تاثیر گسل F2) [۱]

واحد Ngc در ایستگاه ST-3 شامل کنگلومرای ریزدانه با سیمان شدگی خوب و مقاومت بالا است که تطابق خوبی با خصوصیات کنگلومرا در گمانه DH-7 دارد. بنابراین در این موقعیت به عنوان شاخص واحد Ngc معرفی شده و کیفیت توده سنگ بر اساس برداشت‌های میدانی در این ایستگاه توصیف شده است (جدول ۴-۳). همچنین خصوصیات مکانیکی توده سنگ در شکل ۸-۳ بیان شده است.

جدول ۳-۴ کیفیت توده سنگ بر اساس سیستم‌های طبقه‌بندی در ایستگاه ST-3 [۱]

ردیف	مشخصه	مقدار	واحد
۱	مقاومت تک‌محوری سنگ بکر (UCS)	۵۰ - ۱۰۰	MPa
۲	تعیین کیفیت سنگ (RQD)	۸۰ - ۹۰	-
۳	امتیازدهی توده سنگ (RMR)	۵۰	-
۴	شاخص کیفی توده سنگ (Q)	۳/۵	-
۵	شاخص مقاومتی توده سنگ (GSI)	۵۵	-
۶	شاخص توده سنگ (RMi)	۴/۶	-



#### Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength ( $\sigma_{ci}$ ) = 75 MPa  
 GSI = 55  $m_i$  = 21 Disturbance factor = 0.8  
 intact modulus ( $E_i$ ) = 26250 MPa

#### Hoek-Brown Criterion

$m_b$  = 1.442  $s$  = 0.0011  $a$  = 0.504

#### Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 3.494 MPa friction angle = 29.31 deg

#### Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.057 MPa  
 uniaxial compressive strength = 2.413 MPa  
 global strength = 11.938 MPa  
 modulus of deformation = 3292.96 MPa

شکل ۳-۸ تخمین پارامترهای مکانیکی توده سنگ در ایستگاه ST-3 با استفاده از Roclab

در سایر ایستگاه‌های ST-4، ST-5 و ST-8 به دلیل پوشش آبرفتی ضخیم امکان برداشت کامل خصوصیات مهندسی توده سنگ وجود نداشته است بنابراین تنها می‌توان واحد Ngc را به صورت زیر تشریح کرد.

واحد Ngc در ایستگاه ST-4 شامل کنگلومرای متوسط دانه با ساختار متوسط لایه و امتداد شمال - شمال غرب و شیب ۱۵ درجه می‌باشد که توسط ضخامت از آبرفت پوشیده شده است. در این ایستگاه مقاومت فشاری ماده سنگ حدود ۵۰ تا ۱۰۰ مگا پاسکال تخمین زده می‌شود. ایستگاه ST-5 مرز کنگلومرا و ماسه‌سنگ در واحد Ngc است. در این موقعیت کنگلومرای ریز تا متوسط دانه با

مقاومت بالا (۶۰ تا ۸۰ مگا پاسکال) مشاهده می‌شود. در ایستگاه ST-8 به دلیل پوشش ضخیم آبرفتی امکان برداشت خصوصیات ناپیوستگی‌های توده سنگ وجود ندارد. ولیکن طبقات کنگلومرایی با شیب ملایم قابل تشخیص داده شده است.

### ۳-۵-۲- واحد Ngs

واحد Ngs شامل توالی ماسه‌سنگ توفی، ماسه‌سنگ و رس سنگ با منشا آذرینی است. از این واحد گاهی رخنمون‌هایی در سطح زمین دیده می‌شود که تحت تاثیر هوازدگی شدید قرار گرفته و امکان شناسایی خصوصیات توده سنگ ممکن نیست. در گستره مورد مطالعه، این واحد بر روی واحدهای برش ولکانیکی قرار گرفته و در توالی رسوبی واحد Ngc بر روی آن واقع شده است. در پروفیل زمین‌شناسی این واحد ۱۸۳۶ متر از طول تونل را پوشش می‌دهد [۱]. به منظور بررسی خصوصیات مهندسی توده سنگ در این واحد ۳ ایستگاه ST-1، ST-6 و ST-7 انتخاب شده که برداشت‌های صحرائی در این ایستگاه‌ها به شرح زیر است.

ایستگاه ST-1 در زون گسله F3 واقع شده است؛ بنابراین تحت تاثیر گسل به شدت خرد شده به طوری که بلوک‌های سنگی بزرگ‌تر از ۱۰ سانتیمتر به ندرت دیده می‌شود. از نظر سنگ شناسی در این ایستگاه، ماسه‌سنگ‌ها همراه با توف‌های هوازده هستند. برداشت‌های میدانی و خصوصیات مکانیکی مربوط به توده سنگ در ایستگاه ST-1 به ترتیب در جدول ۳-۵ و شکل ۳-۹ بیان شده است.

جدول ۳-۵ کیفیت توده سنگ بر اساس سیستم‌های طبقه‌بندی در ایستگاه ST-1 [۱]

ردیف	مشخصه	مقدار	واحد
۱	مقاومت تک‌محوری سنگ بکر (UCS)	۵ - ۲۵	MPa
۲	تعیین کیفیت سنگ (RQD)	۵ - ۱۵	-
۳	امتیازدهی توده سنگ (RMR)	۲۴	-
۴	شاخص کیفی توده سنگ (Q)	۰/۰۵	-
۵	شاخص مقاومتی توده سنگ (GSI)	۲۵ - ۳۰	-
۶	شاخص توده سنگ (RMi)	۰/۱	-





**Hoek-Brown Classification**  
 intact uniaxial comp. strength ( $\sigma_{ci}$ ) = 15 MPa  
 GSI = 26  $m_i = 21$  Disturbance factor = 0.8  
 intact modulus ( $E_i$ ) = 5250 MPa  
 modulus ratio (MR) = 350

**Hoek-Brown Criterion**  
 $m_b = 0.257$   $s = 1.35e-5$   $a = 0.529$

**Mohr-Coulomb Fit**  
 cohesion = 0.321 MPa friction angle = 16.10 deg

**Rock Mass Parameters**  
 tensile strength = -0.001 MPa  
 uniaxial compressive strength = 0.040 MPa  
 global strength = 0.854 MPa  
 modulus of deformation = 152.38 MPa

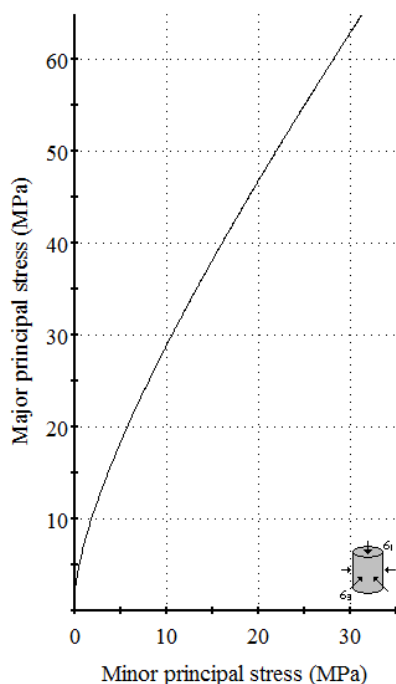
شکل ۳-۹ تخمین پارامترهای مکانیکی توده سنگ در ایستگاه ST-1 با استفاده Roclab

واحد Ngs در ایستگاه ST-6 متشکل از توده سنگی با مقاومت بالا است. اگرچه در این موقعیت درجه هوازدگی خفیف است اما دلیل افزایش مقاومت منشا ولکانیکی رسوبات است به گونه‌ای که در نمونه‌های دستی ساختاری شبیه به توف و سنگ‌های آذرین دارند. برداشت‌های میدانی و خصوصیات مکانیکی مربوط به توده سنگ در ایستگاه ST-6 به ترتیب در جدول ۳-۶ و شکل ۳-۱۰ بیان شده است.

جدول ۳-۶ کیفیت توده سنگ بر اساس سیستم‌های طبقه‌بندی در ایستگاه ST-6 [۱]

ردیف	مشخصه	مقدار	واحد
۱	مقاومت تک‌محوری سنگ بکر (UCS)	۱۰۰ تا ۱۵۰	MPa
۲	تعیین کیفیت سنگ (RQD)	۶۰ تا ۷۰	-
۳	امتیازدهی توده سنگ (RMR)	۴۸	-
۴	شاخص کیفی توده سنگ (Q)	۰/۳۵	-
۵	شاخص مقاومتی توده سنگ (GSI)	۴۵ تا ۵۰	-
۶	شاخص توده سنگ (RMi)	۲	-

### Analysis of Rock/Soil Strength using RocData



#### Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength ( $\sigma_{ci}$ ) = 125 MPa  
 GSI = 47  $m_i = 7$  Disturbance factor = 0.8  
 intact modulus ( $E_i$ ) = 34375 MPa

#### Hoek-Brown Criterion

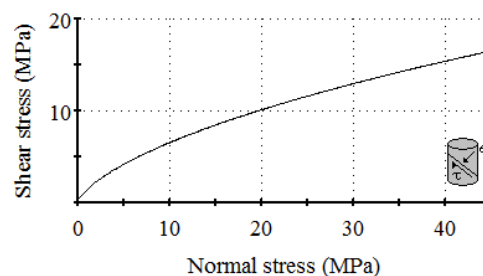
$m_b = 0.299$   $s = 0.0003$   $a = 0.507$

#### Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 3.256 MPa friction angle = 17.53 deg

#### Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.136 MPa  
 uniaxial compressive strength = 2.131 MPa  
 global strength = 8.886 MPa  
 modulus of deformation = 2614.02 MPa



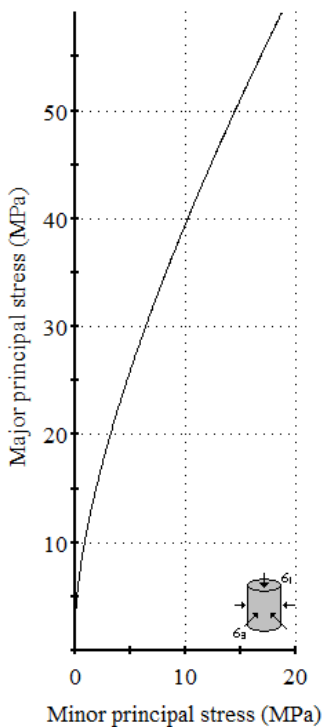
شکل ۳-۱۰ تخمین خصوصیات مکانیکی توده سنگ در ایستگاه ST-6 با استفاده از Roclab

ایستگاه ST-7 در فرودپواره گسل لاله‌زار قرار دارد. در این ایستگاه واحد زمین‌شناسی Ngs شامل ماسه‌سنگ توفی متوسط تا ضخیم لایه است که مقاومت ماده سنگ کمتر از ماسه‌سنگ‌های توفی در ایستگاه ST-6 می‌باشد. برداشت خصوصیات مهندسی توده سنگ در این ایستگاه نشان دهنده ماسه‌سنگی درزه‌دار با هوازدگی خفیف و کیفیت خوب ( $RQD=82$ ) می‌باشد. این توده سنگ در طبقه‌بندی مهندسی در گروه متوسط ( $RMR=50$ ) قرار می‌گیرد در حالی که در سایر سیستم‌های طبقه‌بندی سنگی ضعیف محسوب می‌شود. برداشت‌های میدانی و خصوصیات مکانیکی مربوط به توده سنگ در ایستگاه ST-7 به ترتیب در جدول ۳-۷ و شکل ۳-۱۱ بیان شده است.

جدول ۳-۷ کیفیت توده سنگ بر اساس سیستم‌های طبقه‌بندی در ایستگاه ST-7 [۱]

ردیف	مشخصه	مقدار	واحد
۱	مقاومت تک‌محوری (UCS)	۱۰۰ - ۵۰	MPa
۲	تعیین کیفیت سنگ (RQD)	۸۵ - ۸۰	-
۳	امتیازدهی توده سنگ (RMR)	۵۰	-
۴	شاخص کیفی توده سنگ (Q)	۱/۳۷	-
۵	شاخص مقاومتی توده سنگ (GSI)	۵۵	-
۶	شاخص توده سنگ (RMi)	۴/۳۲	-

#### Analysis of Rock/Soil Strength using RocData



#### Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength ( $\sigma_{ci}$ ) = 75 MPa  
 GSI = 55  $m_i$  = 17 Disturbance factor = 0.8  
 intact modulus ( $E_i$ ) = 20625 MPa  
 modulus ratio (MR) = 275

#### Hoek-Brown Criterion

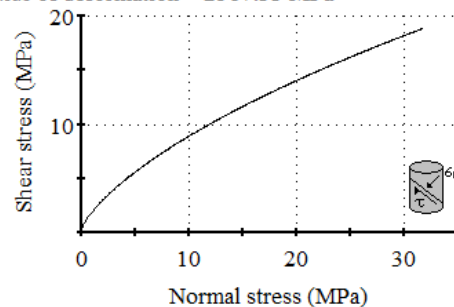
$m_b$  = 1.167  $s$  = 0.0011  $a$  = 0.504

#### Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 3.260 MPa friction angle = 27.57 deg

#### Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.070 MPa  
 uniaxial compressive strength = 2.413 MPa  
 global strength = 10.758 MPa  
 modulus of deformation = 2587.33 MPa



شکل ۳-۱۱ تخمین خصوصیات مکانیکی توده سنگ در ایستگاه ST-7 با استفاده از Roclab

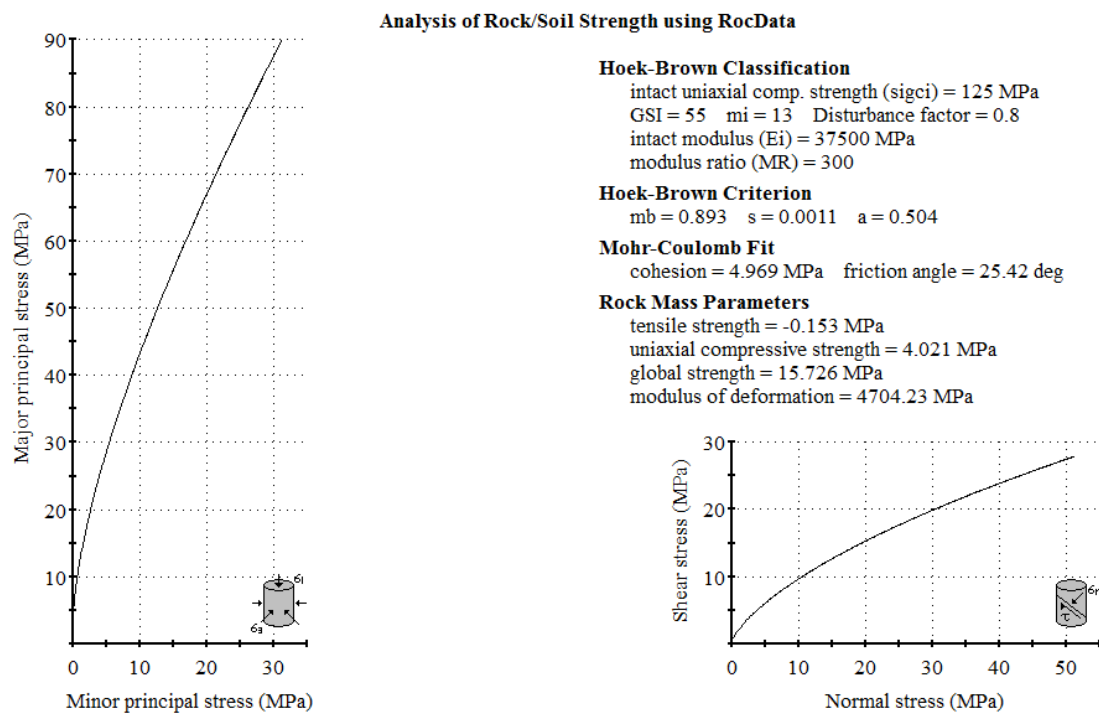
### ۳-۵-۳- واحد Ea

توف‌های آندزیتی و برش‌های آذرینی واحد Ea قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه است که به‌طور عمده در فرادیواره گسل لاله‌زار در سطح رخنمون یافته است. بخش‌های راسی این واحد که در زیر واحدهای تخریبی و آتشفشانی کلاسیکی Ngs و Ngc واقع شده‌اند شامل برش‌های آتشفشانی کلاسیکی

می‌باشند. در این برش‌ها قطعات متفاوت ولکانیکی از ترکیبات آندزیتی در خمیره‌ای از واحدهای ولکانیکی ریزدانه قرار گرفته‌اند. این واحد سنگی با شیب ملایم ۲۰ تا ۲۲ درجه‌ای به سمت شمال-شمال شرق در فرادیواره گسل لاله‌زار گسترش یافته است واحد برش ولکانیکی در ادامه بر روی توف‌های آندزیتی با لایه‌بندی متوسط و منظم قرار گرفته و در مجموع واحد  $Ea$  را تشکیل می‌دهند. این واحد ۴۷۷ متر از طول تونل را در بر می‌گیرد.

جدول ۳-۸ کیفیت توده سنگ بر اساس سیستم‌های طبقه‌بندی در ایستگاه ST-9

ردیف	مشخصه	مقدار	واحد
۱	مقاومت تک‌محوری (UCS)	۱۰۰ تا ۱۵۰	MPa
۲	تعیین کیفیت سنگ (RQD)	۸۰ تا ۸۵	-
۳	امتیازدهی توده سنگ (RMR)	۶۸	-
۴	شاخص کیفی توده سنگ (Q)	۱۸/۴۸	-
۵	شاخص مقاومتی توده سنگ (GSI)	۷۵	-
۶	شاخص توده سنگ (RMi)	۱۹/۴	-



شکل ۳-۱۲ تخمین خصوصیات مکانیکی توده سنگ در ایستگاه ST-9 با استفاده از Roclab

پارامترهای مورد نیاز در طبقه‌بندی توده سنگ و خصوصیات زمین‌شناسی مهندسی این واحد در ایستگاه ST-9 برداشت شده است که خصوصیات مربوط به طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ و پارامترهای مقاومتی آن به ترتیب در جدول ۳-۸ و شکل ۳-۱۲ بیان شده است.

### ۳-۶- جمع‌بندی

- واحد زمین‌شناسی Ng2 بخش عمده‌ای از گستره مورد مطالعه را پوشش می‌دهد. این واحد متشکل از بخش زیرین Ngs (ماسه‌سنگ توفی، ماسه‌سنگ) و بخش فوقانی Ngc (کنگومرا و میکرو کنگومرا) است.
- واحدهای کواترنری در محدوده تونل دسترسی به واحدهای Qt و Q-T تقسیم می‌شوند. واحد Qt در منطقه مورد مطالعه عمدتاً از رسوبات رودخانه‌ای کنگلومرای سخت نشده تا کمی سخت شده تشکیل شده در حالی که واحد Q-T شامل واحدهای برشی و کنگلومرای به شدت سیمان شده با رسوبات کربناتی و سیلیسی هیدروترمالی است.
- در گستره مورد مطالعه ۴ گسل به نام‌های F1، F2، F3 و گسل لاله‌زار شناخته شده است. یکی از دلایل انتخاب گزینه 'B1' به عنوان گزینه برتر تونل دسترسی دوری از زونهای خرد شده و گسل‌های مذکور است.
- مطالعه گمانه DH-7 نشان می‌دهد که در عمق ۹ متری امکان برخورد به تراز آب زیرزمینی وجود دارد. بنابراین تمام طول تونل در زیر سطح آب زیرزمینی حفاری خواهد شد و در طبقه‌بندی زمین‌شناسی مهندسی شرایط اشباع توده سنگ لحاظ شده است.
- در برداشتهای زمین‌شناسی به منظور تعیین خصوصیات مهندسی توده سنگ ۹ ایستگاه انتخاب شده است که ایستگاه‌های ST-3، ST-7 و ST-9 به ترتیب معرف خصوصیات مهندسی واحد Ngc، Ea هستند.
- با توجه به محاسبات انجام شده، امتیاز توده سنگ (RMR) برای سه واحد زمین‌شناسی Ngc، Ea و Ngc به ترتیب برابر ۵۰، ۵۰ و ۶۸ برآورد شده است.



## فصل چهارم

مدل سازی و تحلیل عددی توئل

دستری سرزه با پوشش بتن الیافی

#### ۴-۱- مقدمه

با توجه به فصل‌های قبل و آزمایش‌های انجام شده برای بیان خصوصیات مکانیکی بتن الیافی، پوشش بتن الیافی با توجه به تسریع در اجرا و همچنین نیاز کمتر به نیروی انسانی و خطرات کمتر به عنوان پوشش نهایی مورد بررسی قرار گرفته است. در این میان به دلیل پیچیده بودن مساله، از روش‌های عددی در تحلیل پوشش بتن الیافی استفاده شده است. در فصل جاری با مدل‌سازی عددی هندسه تونل در سازندهای مختلف با روبراه‌های متفاوت، مقطع بحرانی در مسیر تونل سرزه تعیین شده و مدل‌سازی پوشش تونل در این مقطع مورد بررسی قرار گرفته است. در ادامه پوشش بتن الیافی با ضخامت‌های ۳۰، ۲۰ و ۱۰ سانتی‌متر برای مقطع بحرانی طراحی و با استفاده از نمودارهای ظرفیت باربری، تحلیل و بررسی شده است.

#### ۴-۲- آزمایش‌های انجام شده برای تعیین خصوصیات مکانیکی بتن الیافی

با توجه به مطالب ذکر شده، بتن مسلح به الیاف فولادی می‌تواند به‌عنوان یکی از مصالح ارزان و با خاصیت مقاومتی بالا در امر ساخت و سازهای سطحی و زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد. قابل ذکر است که بتن مسلح به الیاف فولادی لازم است قبل از قرارگیری در شرایط مختلف ساختاری، در محیطی آزمایشگاهی مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گیرد.

هدف از انجام آزمایش‌های حاضر، تعیین پارامترهای مکانیکی بتن مسلح به الیاف فولادی برای استفاده در مدل‌سازی عددی است. از این‌رو در این بخش به بررسی تاثیر الیاف فولادی شرکت صنایع مفتولی زنجان بر روی مشخصات مکانیکی بتن حاوی این الیاف پرداخته شده است. آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و فاقد الیاف فولادی عبارت‌اند از:

الف) آزمایش تعیین مقاومت فشاری

ب) آزمایش تعیین مقاومت کششی برزیلی



د) آزمایش تعیین مقاومت خمشی

ه) آزمایش تعیین مدول الاستیسیته

#### ۴-۲-۱- الیاف مورد استفاده

الیاف مورد استفاده در ساخت بتن از نوع الیاف فولادی قلابدار بوده و مشخصات آنها در جدول

۱-۴-۱-۴ ارائه شده است. شکل ۱-۴-۱ تصویری از الیاف فولادی مورد استفاده را نشان می‌دهد [۱۸].

جدول ۱-۴-۱ مشخصات الیاف فولادی استفاده شده [۱۸]

ردیف	مشخصه	مقدار
۱	طول (mm)	۵۰
۲	قطر (mm)	۱
۳	نسبت طول به قطر (نسبت ظاهری)	۵۰
۴	تعداد الیاف در هر کیلوگرم	۳۲۲۰
۵	مقاومت کششی (MPa)	>۹۵۰
۶	مدول الاستیسیته (GPa)	۲۰۰



شکل ۱-۴-۱ الیاف فولادی استفاده شده در بتن [۱۸]

#### ۴-۲-۲- طرح اختلاط

در این پروژه، دو طرح اختلاط از بتن ساخته شده و آزمایش‌های ذکر شده بر روی آنها انجام

شده است (جدول ۲-۴). طرح‌های اختلاط در تمامی ویژگی‌ها شبیه یکدیگر بوده و یکی از آنها فاقد

الیاف و دیگری حاوی ۳۰ کیلوگرم الیاف فولادی قلابدار در مترمکعب بتن است. نسبت آب به سیمان

نیز برابر ۰/۳۳ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در فرایند اختلاط، الیاف پیش از افزودن آب و ماده افزودنی فوق روان کننده، به مجموعه مصالح سنگی و سیمان اضافه شده‌اند [۱۸].

جدول ۴-۲ جزئیات طرح اختلاط استفاده شده [۱۸]

اجزا بتن	ماسه	شن نخودی	شن بادامی	سیمان	آب	فوق روان کننده
		(۵/۹ میلی‌متر)	(۵/۹_۱۹ میلی‌متر)			
وزن اجزا (کیلوگرم بر متر مکعب)	۱۰۸	۳۳۶	۳۵۰	۴۵۰	۱۴۸/۵	۳/۰۶۰

#### ۴-۲-۳- آزمایش تعیین مقاومت فشاری

آزمایش‌های مقاومت فشاری بتن مطابق استاندارد BS 1881 بر روی آزمون‌های مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر انجام گرفته است [۱۹]. در این روش آزمایش، بار محوری فشاری به آزمون‌های مکعبی با سرعت مشخص اعمال شده و تا گسیخته شدن آزمون ادامه می‌یابد. مقاومت فشاری از تقسیم حداکثر بار تحمل شده توسط آزمون بر سطح مقطع واقعی آن به دست می‌آید. این آزمایش بر روی آزمون‌های فاقد الیاف فولادی و حاوی الیاف در سنین ۷ و ۲۸ روزه انجام گرفته و نتایج آن در جدول ۴-۳ و ۴-۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از الیاف فولادی به میزان ۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب تاثیر نسبتاً محدودی (در حدود ۱۰ درصد) بر افزایش مقاومت فشاری بتن داشته است.

جدول ۴-۳ مقاومت فشاری بتن فاقد الیاف فولادی [۱۸]

سن بتن (روز)	مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی بتن (MPa)			متوسط مقاومت فشاری بتن (MPa)
	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	
۷	۵۱/۷	۵۰/۲	۵۰/۶	۵۰/۸
۲۸	۵۵/۱	۵۶/۶	۵۶/۱	۵۵/۹

جدول ۴-۴ مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف فولادی [۱۸]

متوسط مقاومت فشاری بتن (MPa)	مقاومت فشاری آزمون‌های مکعبی بتن (MPa)			سن بتن (روز)
	نمونه ۳	نمونه ۲	نمونه ۱	
۵۵/۲	۵۴/۶	۵۵/۷	۵۵/۳	۷
۶۰/۳	۶۱/۳	۶۱/۱	۵۸/۴	۲۸

#### ۴-۲-۴- آزمایش تعیین مقاومت کششی برزیلی

به طور کلی انجام آزمایش کشش مستقیم بتن متداول نیست. از این رو به منظور تعیین مقاومت کششی بتن از آزمایش برزیلی استفاده می‌کنند. آزمایش تعیین مقاومت کششی برزیلی بتن مطابق استاندارد ASTM C496 بر روی آزمون‌های استوانه‌ای استاندارد به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر در سنین ۷ و ۲۸ روزه انجام گرفته است [۲۰]. در این آزمایش استوانه در امتداد قطرش به صورت خوابیده تحت فشار قرار می‌گیرد تا دو نیم شود. تنش فشاری سبب ایجاد کشش یکنواختی در راستای عمود بر امتداد قطر قایم می‌شود و مقدار مقاومت کششی از رابطه ۲-۱ تعیین می‌شود.

$$R = \frac{2P}{\pi LD} \quad (۱-۴)$$

که در آن  $R$  مقاومت کششی،  $P$  بار شکست،  $L$  طول آزمون و  $D$  قطر آزمون است.

نتایج مقاومت کشش برزیلی آزمون‌های فاقد الیاف فولادی و حاوی الیاف در جدول ۴-۵ و ۴-۶ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می‌شود متوسط مقاومت کشش برزیلی بتن حاوی الیاف فولادی نسبت به بتن فاقد الیاف در سنین ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۶۰ و ۸۰ درصد افزایش یافته است [۱۸].

جدول ۴-۵ مقاومت کشش برزیلی بتن فاقد الیاف [۱۸]

متوسط مقاومت کشش برزیلی بتن (MPa)	مقاومت کشش برزیلی آزمون‌های استوانه بتن (MPa)		سن بتن (روز)
	نمونه ۲	نمونه ۱	
۲/۶	۲/۶	۲/۶	۷
۳/۰	۳/۱	۲/۹	۲۸

جدول ۴-۶ مقاومت کشش برزیلی حاوی الیاف فولادی [۱۸]

سن بتن (روز)	مقاومت کشش برزیلی نمونه ۱	مقاومت کشش برزیلی نمونه ۲	متوسط مقاومت کشش برزیلی بتن (MPa)
۷	۴/۳	۴/۲	۴/۲
۲۸	۵/۳	۵/۳	۵/۳

#### ۴-۲-۵- آزمایش تعیین مقاومت خمشی

تعیین مقاومت خمشی بتن در تخمین باری که تحت آن ترک خوردگی توسعه می‌یابد ارزش دارد. آزمایش تعیین مقاومت خمشی بتن مطابق استاندارد ASTM C293 بر روی آزمون‌های منشوری به ابعاد ۱۰۰×۱۰۰×۵۰ میلی‌متر در سنین ۷ و ۲۸ روزه انجام گرفته است. در این روش آزمون منشوری به‌طور افقی زیر جک روی دو تکیه‌گاه قرار می‌گیرد و بار در یک نقطه به وسط دهانه اعمال شده تا آزمون گسیخته شود و مقدار مقاومت خمشی از رابطه ۴-۲ محاسبه شده است [۲۱].

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (۴-۲)$$

در این رابطه  $R$  مقاومت خمشی،  $P$  حداکثر بار هنگام گسیختگی،  $L$  طول دهانه،  $b$  عرض آزمون و  $d$  ارتفاع مقطع آزمون (قطر) است.

مقاومت خمشی آزمون‌های حاوی الیاف فولادی و فاقد الیاف در جدول ۴-۷ و ۴-۸ بیان شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که متوسط مقاومت خمشی بتن حاوی الیاف فولادی نسبت به بتن فاقد الیاف نتایج در هر دو سن ۷ و ۲۸ روزه ۱/۷ برابر افزایش یافته است. الگوی گسیختگی بتن‌های حاوی الیاف فولادی قلاب‌دار به دو صورت بیرون کشیدگی کامل الیاف همراه با صاف شدن انتهای قلابی شکل آن و یا پاره شدن ناحیه قلابی شکل الیاف است. این نوع الگوی گسیختگی در کنار قلابی بودن و طول زیاد الیاف فولادی موجب مهار مکانیکی الیاف با بتن شده و با افزایش مقاومت بیرون کشیدگی باعث افزایش مقاومت خمشی بتن الیافی نسبت به بتن فاقد الیاف می‌شود.

جدول ۴-۷ مقاومت خمشی بتن فاقد الیاف [۱۸]

سن بتن (روز)	مقاومت خمشی نمونه ۱	مقاومت خمشی نمونه ۲	متوسط مقاومت خمشی بتن (MPa)
۷	۴/۲	۴/۳	۴/۳
۲۸	۴/۵	۴/۸	۴/۶

جدول ۴-۸ مقاومت خمشی بتن حاوی الیاف [۱۸]

سن بتن (روز)	مقاومت خمشی نمونه ۱	مقاومت خمشی نمونه ۲	متوسط مقاومت خمشی بتن (MPa)
۷	۷/۲	۷/۳	۷/۳
۲۸	۷/۶	۷/۶	۷/۶

#### ۴-۲-۶- آزمایش تعیین مدول الاستیسیته

آزمایش تعیین مدول الاستیسیته بتن مطابق استاندارد ASTM C469 بر روی آزمون‌های استوانه‌ای استاندارد به قطر ۱۵۰ و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر در سنین ۷ و ۲۸ روزه انجام گرفته است. مطابق استاندارد، پیش از انجام آزمایش، آزمون‌های بتنی با استفاده از گوگرد مذاب کلاهدک گذاری شده‌اند و پس از آماده‌سازی نهایی آزمون‌ها، آزمایش تعیین مدول الاستیسیته انجام گرفته است. بدین منظور، ابتدا یک برآورد اولیه از مقاومت فشاری آزمون‌های بتنی ( $f'_c$ ) صورت گرفته است. سپس در گام‌های متوالی تا مقدار ۰/۴ بر روی آزمون بارگذاری شده و در گام‌های تنش مختلف میزان کرنش متناظر قرائت شده تا به کمک آن مدول الاستیسیته آزمون‌های بتنی تعیین شود. همچنین در حین بارگذاری و تعیین مدول الاستیسیته، میزان مقاومت فشاری برآورد شده نیز اصلاح می‌گردد. برای تعیین مدول الاستیسیته، بارگذاری تا چند نوبت تکرار شده تا در مراحل مختلف میزان مدول الاستیسیته به دست آمده یکسان بوده و تکرار شود. پس از تعیین میزان مدول الاستیسیته آزمون‌ها،

بارگذاری ادامه می‌یابد تا آزمون شکسته شده و میزان مقاومت فشاری آن تعیین شود. مدول الاستیسیته از رابطه ۳-۴ تعیین می‌شود.

$$E = (s_p - s_1) / (\varepsilon_p - 0.000050) \quad (3-4)$$

در این رابطه  $E$  مدول الاستیسیته،  $s_2$  تنش متناظر با  $0.4$  بار نهایی،  $s_1$  تنش متناظر با کرنش  $0.000050$  و  $\varepsilon_2$  کرنش طولی ناشی از اعمال تنش  $s_2$  می‌باشد. نتایج مدول الاستیسیته آزمون‌های حاوی الیاف فولادی و فاقد الیاف در جدول ۴-۹ و ۴-۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزودن الیاف فولادی تاثیر چندانی بر مدول الاستیسیته بتن نداشته است [۱۸].

جدول ۴-۹ مدول الاستیسیته بتن فاقد الیاف [۱۸]

نوع بتن	سن بتن (روز)	مدول الاستیسیته (GPa)
بتن فاقد الیاف فولادی	۷	۳۱/۵
	۲۸	۳۹/۱
جدول ۴-۱۰ مدول الاستیسیته بتن حاوی الیاف		
نوع بتن	سن بتن (روز)	مدول الاستیسیته (GPa)
بتن حاوی الیاف فولادی	۷	۳۱/۶
	۲۸	۳۹/۵

#### ۴-۳- روش‌های عددی در مکانیک سنگ

در دهه اخیر با رشد نرم‌افزاری و سخت‌افزاری در عرصه کامپیوتر، استفاده از روش‌های عددی بسیار زیاد شده است. به منظور حل مساله با روش‌های عددی، نیاز به معادلات درونیابی و چهارچوب تعیین مدل و محیط مورد مساله است. معادلات درونیابی شامل یکسری معادلات ریاضی هستند که با استفاده از نقاط معلوم که تاثیر بیشتری روی مساله دارند، جواب نقاط مجهول را پیدا می‌کنند. به این طریق مجهولات سیستم را کاهش می‌دهند و محیط را از بینهایت درجه آزادی به درجه آزادی محدودی می‌رسانند. روش‌های عددی بر خلاف روش‌های ریاضی جواب قطعی نمی‌دهند

لذا می‌توان با استفاده از روش‌های عددی و بسته به پروژه و اهمیت آن، مساله را با دقت متفاوتی حل کرد [۲۲].

روش‌های عددی به‌طور گسترده در مسایل مهندسی برای اهداف متفاوت استفاده می‌شود. به‌طور کلی روش‌های عددی و موارد استفاده از آن به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [۲۳].

۱- روش‌های پیوسته

الف- روش المان محدود<sup>۱</sup> (FEM)

ب- روش تفاضل محدود<sup>۲</sup> (FDM)

ج- روش المان مرزی<sup>۳</sup> (BEM)

۲- روش‌های گسسته

الف- روش المان مجزا<sup>۴</sup> (DEM)

ب- روش شبکه شکستگی مجزا<sup>۵</sup> (DFN)

۳- روش‌های ترکیبی<sup>۶</sup>

الف- ترکیب FEM/BEM، BEM/DEM یا FEM/DEM

ب- سایر ترکیب روش‌های گسسته و پیوسته

---

<sup>۱</sup> Finite Element Method

<sup>۲</sup> Finite Difference Method

<sup>۳</sup> Boundary Element Method

<sup>۴</sup> Discrete Element Method

<sup>۵</sup> Discrete Element Method

<sup>۶</sup> Hybrid Method

#### ۴-۴- انتخاب مناسب ترین روش عددی

روش‌های عددی باید متناسب با نوع و هدف مساله انتخاب شوند. انتخاب روش‌های عددی مناسب تا حد زیادی به محیط توده سنگ و ناپیوستگی‌ها بستگی دارد. به گونه‌ای که اگر ناپیوستگی‌ها در توده سنگ پراکنده باشند و فاصله داری آن‌ها نسبت به ابعاد حفاری بزرگ باشد روش پیوسته مناسب است. همچنین هرگاه تغییر شکل (جابجایی) ناپیوستگی‌ها در برابر تغییر شکل توده سنگ ناچیز باشد، روش پیوسته مناسب است. اما اگر تغییر شکل در امتداد ناپیوستگی‌ها نسبت به تغییر شکل بلوک‌ها قابل ملاحظه باشد و یا فاصله داری ناپیوستگی‌ها نسبت به ابعاد حفاری قابل قیاس باشد، در چنین شرایطی روش ناپوسته و روش المان مجزا مناسب تر است [۲۴].

بنابراین شناخت محیط‌های پیوسته و ناپیوسته تاثیر بسزایی در فرآیند شبیه‌سازی خواهد داشت و به‌طور کلی محیطی که سازه در آن قرار دارد یا در آن ساخته می‌شود به سه گروه محیط پیوسته، ناپیوسته و شبه پیوسته تقسیم می‌شود.

در گام طراحی و تحلیل سازه مورد نظر تصمیم به پیوسته یا ناپیوسته گرفتن محیط در برگیرنده از مهمترین نظرات مهندسی است. به هر حال در نظر گرفتن یک عامل بسیار مهم برای ملاحظات طراحی و متناسب با درزه داری ضروری است. پیوستگی زمین<sup>۱</sup> بیان می‌کند حجمی از توده سنگ که مورد گودبرداری قرار گرفته است می‌تواند به عنوان محیط ناپیوسته قرار گیرد یا خیر. این پارامتر تنها برای طبقه‌بندی زمین نیست بلکه روش آنالیز را نیز به صورت تقریبی مشخص می‌کند [۲۵]. برای اهداف مهندسی سنگ، پیوستگی زمین می‌تواند به واسطه ضریب پیوستگی<sup>۲</sup> (CF) و با استفاده از رابطه (۴-۴) بیان شود.

$$CF = \frac{D_t}{D_b} \quad (4-4)$$

<sup>۱</sup> Continuity of Ground

<sup>۲</sup> Continuity Factor



که در این رابطه  $D_t$  قطر تونل (m) و  $D_b$  قطر بلوک (m) است.

محدوده بین پیوستگی و ناپیوستگی توسط چندین محقق مورد بررسی قرار گرفته است. دیر<sup>۱</sup> و

میلر<sup>۲</sup> (۱۹۹۶) بیان کردند چنانچه نسبت فاصله‌داری درزه‌ها به قطر تونل ( $\frac{1}{CF}$ ) بین بازه  $\frac{1}{100}$  تا  $\frac{1}{5}$

قرار گیرد زمین ناپیوسته و در غیر این صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شود [۲۵].

در ادامه استیل<sup>۳</sup> و پالمستروم<sup>۴</sup> (۲۰۰۸) ضریب پیوستگی زمین را تصحیح و جدول ۴-۱۱ را ارائه

دادند. با توجه به جدول ۱ چنانچه  $15 < CF < 30$  باشد محیط ناپیوسته و اگر  $CF > 30$  یا  $CF < 3$

باشد محیط کاملاً پیوسته و در بازه‌های  $15 < CF < 30$  و  $3 < CF < 6$  همپوشانی پیوستگی و

ناپیوستگی وجود دارد [۲۶].

جدول ۴-۱۱ تعیین پیوستگی / ناپیوستگی محیط در بر گیرنده با فاکتور پیوستگی [۲۵]

$CF=D_t/D_b$	پیوستگی زمین (CF)
پیوسته (خرد شده)	$>30$
ناپیوسته - پیوسته (بلوکی - خرد شده)	۳۰ تا ۱۵
ناپیوسته (بلوکی)	۱۵ تا ۶
پیوسته - ناپیوسته (سالم - بلوکی)	۶ تا ۳
سالم	$<3$

در طول مسیر تونل، مقدار پیوستگی برای هریک از سازندهای قرارگیری در مسیر تونل تعیین و

در جدول ۴-۱۲ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱۲ وضعیت پیوستگی زمین در ایستگاه‌های معرف

وضعیت پیوستگی	پیوستگی زمین (CF)	ایستگاه (سازند)
ناپیوسته - پیوسته (بلوکی - خرد شده)	۲۷	(Ngc) ST-3
ناپیوسته - پیوسته (بلوکی - خرد شده)	۲۷	(Ngs) ST-7
ناپیوسته - پیوسته (بلوکی - خرد شده)	۲۵	(Ea) ST-9

<sup>۱</sup> Deere

<sup>۳</sup> Still

<sup>۲</sup> Miller

<sup>۴</sup> Palmestrom

با توجه به جدول ۴-۱۲ و مقادیر تعیین شده برای پیوستگی، محیط در بر گیرنده تونل در وضعیت ناپیوسته - پیوسته (بلوکی - خرد شده) و چسبیده به مرز پیوسته (خرد شده) قرار گرفته است و از این رو این محیط به عنوان محیطی پیوسته در نظر گرفته شده است.

#### ۴-۵- روش تفاضل محدود

روش تفاضل محدود یکی از قدیمی‌ترین و پرکاربردترین روش‌های عددی در حل مسایل مهندسی است که برای حل دستگاه‌های معادلات دیفرانسیلی که مقدار اولیه و شرایط مرزی آن‌ها مشخص شده باشد استفاده می‌شود. این روش همانند روش المان محدود، فضای مساله را به صورت پیوسته با المان‌هایی که در گره‌ها به هم متصل هستند، مدل می‌کند. این روش نسبت به روش‌های عددی دیگر به توان محاسباتی زیادی برای پردازش نیاز ندارد. محققین زیادی از جمله ویکینس<sup>۱</sup> در سال ۱۹۶۳ نشان داده‌اند که نتایج حاصل از روش تفاضل محدود و روش المان محدود برای مسایل خاص یکسان است اما استفاده از روش تفاضل محدود انعطاف‌پذیر تر از روش المان محدود است. از مهم‌ترین نرم‌افزارهای که از روش تفاضل محدود برای مسایل مهندسی سنگ و ژئوتکنیک استفاده می‌کند، می‌توان به FLAC اشاره کرد [۲۷].

#### ۴-۶- مدل‌سازی عددی با نرم افزار FLAC<sup>2D</sup>

به منظور مدل‌سازی مقطع مورد بررسی در نرم افزار FLAC<sup>2D</sup> لازم است که مرز مدل به اندازه کافی از دهانه تونل فاصله داشته باشد تا بتوان فرض کرنش صفحه‌ای را در نظر گرفت. همچنین برای حذف اثر شرایط مرزی بر روی نتایج حاصل مدل‌سازی، باید ابعاد مدل را تا جایی ادامه داد که این اثر در حل

---

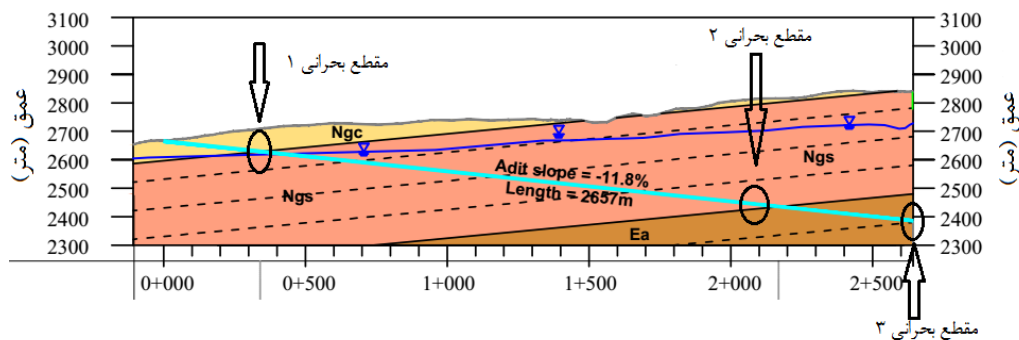
<sup>۱</sup> Wikins

تعداد اولیه مدل، به طور کامل از بین رود. مراحل مدل‌سازی با توجه به شرایط اجرایی و همچنین الگوی مدل‌سازی در نرم افزار به صورت زیر انجام شده است [۲۸]:

۱. مشخص کردن ابعاد مدل، مش بندی و ترسیم مقطع تونل
۲. انتخاب مدل رفتاری زمین و تعیین پارامترهای آن
۳. اعمال شرایط اولیه و مرزی به مدل
۴. حل مدل و به تعادل رساندن آن قبل از عملیات حفاری
۵. حفاری تونل و اعمال ترخیص تنش متناسب به مدل
۶. نصب سیستم نگهداری و حل مدل تا رسیدن به حالت پایدار

#### ۴-۶-۱- شناسایی مقطع بحرانی و انتخاب محدوده مناسبی از محیط اطراف تونل

در ابتدا و قبل از تمرکز بر روی مدل‌سازی اصلی لازم است مقطع بحرانی شناسایی و مطالعات اصلی بر روی این مقطع انجام شود. چنانچه در شکل ۴-۲ نشان داده شده است در مسیر تونل سه مقطع با هندسه یکسان در سازندهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به مدل‌سازی‌های انجام شده، با عنایت به حداکثر جابجایی‌های انجام شده در زمان حفر کامل، مشخص شده است که مقطع بحرانی مربوط به محدوده ۲۱۳۷ متر از طول تونل در سازند Ngs است (جدول ۴-۱۳). این محدوده از جنس ماسه‌سنگ توفی است که میزان روبراه‌های تقریباً برابر با ۳۷۵ متر دارا می‌باشد. در این تحقیق مطالعات بر روی این مقطع انجام گرفته است.



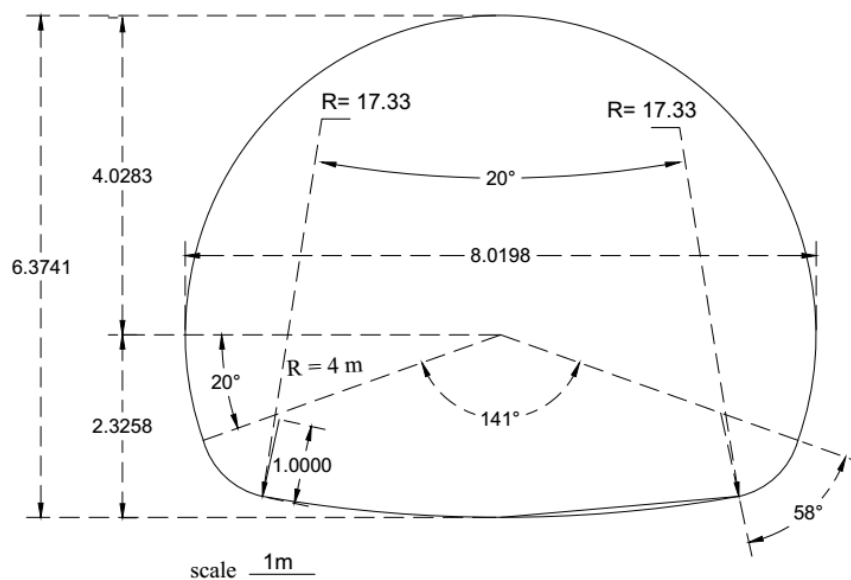
شکل ۴-۲ مقاطع بحرانی انتخاب شده در مسیر تونل مورد نظر

جدول ۴-۱۳ میزان حداکثر جابجایی حاصل از حفاری در سه مقطع مختلف در مسیر تونل

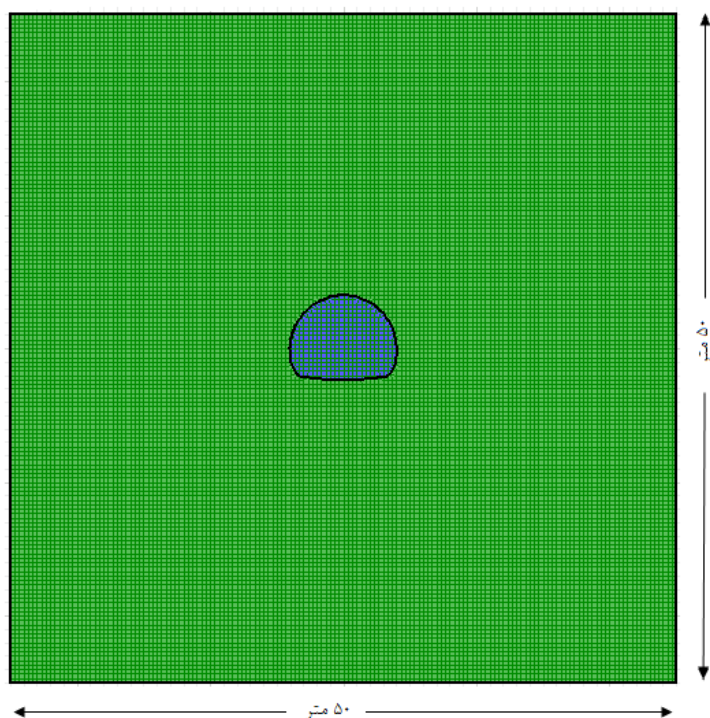
ردیف	مقطع	میزان حداکثر جابجایی (cm)
۱	ST-3	۱/۵۲۳
۲	ST-7	۲/۶۴۵
۳	ST-9	۱/۹۲۰

#### ۴-۶-۲- مشخص کردن ابعاد مدل، مش بندی و ترسیم مقطع تونل

برای تعیین ابعاد مدل، لازم است مرزهای مدل تا جایی ادامه یابد که شرایط مرزی بر نتایج مدل سازی بی تاثیر باشد و همچنین ابعاد مدل به اندازه ای بزرگ نباشد که زمان تحلیل و حل مدل را بالا برد. شکل مقطع تونل سرزه در شکل ۴-۳ نشان داده شده است [۱]. تونل دارای قطر ۸ متر و ارتفاعی برابر با ۶/۳۷ متر است. از این رو با توجه به قطر ۸ متری تونل، ابعاد بهینه مدل  $۵۰ \times ۵۰$  مترمربع با تعداد ۲۲۵۰۰ مش در نظر گرفته شده است (شکل ۴-۴).



شکل ۴-۳ هندسه مقطع تونل سرزه [۱]



شکل ۴-۴ ابعاد مدل، مش بندی و هندسه مقطع

#### ۴-۶-۳- انتخاب مدل رفتاری زمین و تعیین پارامترهای آن

در نرم افزار 7 ver  $FLAC^{2D}$ ، ۱۴ نوع مدل رفتاری پایه تعریف شده که در گروه‌های مدلی تهی<sup>۱</sup>، الاستیک و پلاستیک طبقه‌بندی شده است. این مدل‌های رفتاری در بازه ای از مدل‌های الاستیک خطی تا پلاستیک غیر خطی قرار دارند که بسته به شرایط می‌توان از یک یا چند مدل رفتاری در مدل‌سازی استفاده کرد. یکی از این مدل‌های رفتاری، مدل پلاستیک موهر-کولمب است که بیانگر موادی است که در اثر برش تسلیم می‌شوند. این مدل رفتاری در مدل‌سازی محیط‌های خاکی و سنگی مدل مرسومی است [۲۹]. پارامترهای مورد نیاز در مدل پلاستیک موهر-کولمب عبارتند از: جرم حجمی، مدول حجمی، مدول برشی، چسبندگی، زاویه اصطکاک، زاویه اتساع و مقاومت کششی. چنانچه هر یک از این پارامترها تعریف نشوند، برنامه مقدار صفر را برای آن منظور می‌کند.

<sup>۱</sup> Null

در فصل سوم به ویژگی های ژئومکانیکی مسیر تونل به طور کامل اشاره شده است. در مقطع بحرانی تعیین شده، خصوصیات ژئومکانیکی ذکر شده در جدول ۴-۱۴ آورده شده است.

جدول ۴-۱۴ پارامترهای ورودی مدل موهر- کولمب در مدل سازی عددی [۱]

ردیف	مشخصه	علامت	مقدار	واحد
۱	جرم مخصوص	$\rho$	۲۲۷۰	$Kg/m^3$
۲	مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ	$E_m$	۲/۵۸۷	$GPa$
۳	نسبت پواسون	$\nu$	۰/۳۳	-
۴	زاویه اصطکاک داخلی	$\phi$	۲۷/۵۷	درجه
۵	چسبندگی	$C$	۳/۲۶۰	$MPa$
۶	مقاومت کششی توده سنگ	$\sigma_t$	۰/۰۷	$MPa$

#### ۴-۶-۴ اعمال شرایط اولیه و مرزی به مدل

سنگ‌ها در عمق تحت تاثیر تنش‌های ناشی از وزن طبقات بالایی و تنش‌های حاصل از فعالیت‌های تکتونیکی قرار می‌گیرند. اطلاع از بزرگی و جهت این تنش‌های برجا و تنش‌های جدید ایجاد شده، در زمان طراحی حفاریات زیرزمینی بسیار حایز اهمیت است. با اعمال شرایط اولیه سعی می‌شود تنش‌های برجا موجود در زمین قبل از حفاری شبیه‌سازی گردد. چنانچه این عمل انجام نشود، ممکن است در رفتارهای بعدی مدل تاثیر منفی بگذارد. در حالت ایده‌آل اطلاعات در مورد این گونه تنش‌ها از اندازه‌گیری سر زمین بدست می‌آید ولی وقتی اندازه‌گیری سر زمین مقدور نیست می‌توان با استفاده از عمق سازه و پارامترهای ژئوتکنیکی زمین تنش‌ها را برآورد کرد.

الف- تعیین تنش قائم

رابطه (۴-۶) برای تعیین تنش عمودی<sup>۱</sup> ارایه شده است.

$$\sigma_v = \gamma z \quad (۴-۶)$$

<sup>۱</sup> Vertical Stress

که در این رابطه،  $\sigma_v$  تنش عمودی ( $Pa$ )،  $\gamma$  وزن مخصوص طبقات بالایی ( $N/m^3$ ) و  $z$  عمق از سطح زمین ( $m$ ) است.

ب- تعیین تنش افقی

تخمین تنش‌های افقی<sup>۱</sup> در سنگ بسیار مشکل‌تر از تنش عمودی است. در حالت طبیعی میانگین تنش افقی وابسته به تنش عمودی است و با ضریب  $k$  (نسبت تنش افقی به تنش عمودی) به صورت رابطه (۷-۴) بیان می‌شود. همچنین برای تعیین مقدار  $k$  روابطی پیشنهاد شده که در جدول ۴-۱۵ بیان شده است [۲۴] و [۲۵].

$$\sigma_{have} = k\sigma_v = k\gamma z \quad (7-4)$$

جدول ۴-۵ روابط تجربی برای تعیین مقدار  $k$  [۳۰] و [۳۱]

منبع	تغییرات مقدار $k$ بر اساس عمق یا نسبت پواسون ( $\nu$ )	مکان و بازه عمقی ( $m$ )
Terzaghi and Richart (1952)	$k = \frac{\nu}{1-\nu}$	-
Van Heerden (1976)	$k = 0.448 + \frac{248}{z}, (r = 0.85)$	آفریقای جنوبی (۰ تا ۲۵۰۰)
Hoek and Brown (1980)	$0.3 + \frac{100}{z} < k < 0.5 + \frac{1500}{z}$	گستره‌ی جهانی (۰ تا ۳۰۰۰)
Li (1986)	$0.3 + \frac{100}{z} < k < 0.5 + \frac{440}{z}$	چین (۰ تا ۵۰۰)
Rummel (1986)	$0.5 + \frac{150}{z} < k < 0.98 + \frac{250}{z}$	گستره‌ی جهانی (۵۰۰ تا ۳۰۰۰)
Herget (1987)	$k = 1/25 + \frac{267}{z}$	کانادا (۰ تا ۲۰۰)
Sheorey (1994)	$k = 0.25 + 7E_h(0.001 + \frac{1}{z})$	-
Sheorey (2001)	$k = 0.33 + 9/5E_h(0.001 + \frac{1}{z})$	-
Rummel (2002)	$0.66 + \frac{72}{z} < k < 1/3 + \frac{110}{z}$	هنگ کنگ (۰ تا ۲۰۰)

<sup>۱</sup> Horizontal Stress

در تعیین مقدار  $k$ ، با توجه به عمق مقطع مورد بررسی و در نظر گرفتن مکان ارایه روابط، سه رابطه ترزاقی و ریچارت (۱۹۵۲)، هوک و برون (۱۹۸۰) و شئوری (۲۰۰۱) مورد بررسی قرار گرفته است. رابطه ترزاقی از این فرض ناشی می‌شود که وزن به صورت ناگهانی به جرم اجسام الاستیک وارد می‌شود، به صورتی که امکان جابجایی جانبی ندارد. این حالت به دلایلی از قبیل جابجایی تکتونیکی متناوب و شکست مواد و تنش‌های محصور شده حاصل از چین خوردگی و شرایط موضعی، به ندرت در عمل پیش می‌آید [۲۹]. با توجه به این که معادله شئوری تطابق بسیار خوبی با رابطه هوک و برون دارد و به عبارتی تصحیح کننده و محدود کننده بازه‌ی حاصل از رابطه هوک و برون است، به عنوان رابطه‌ای برای تعیین مقدار  $k$  در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به مطالب ذکر شده، مقادیر تنش‌های اولیه مربوط به مقطع مورد نظر با توجه به عمق در جدول ۴-۱۶ بیان شده است. همچنین قابل ذکر است که فشار حاصل از وزن طبقات بالایی نیز محاسبه و به صورت فشار به سطح بالایی مدل اعمال شده است.

جدول ۴-۱۶ مقادیر تنش‌های اولیه و فشار حاصل از طبقات بالایی محاسبه شده

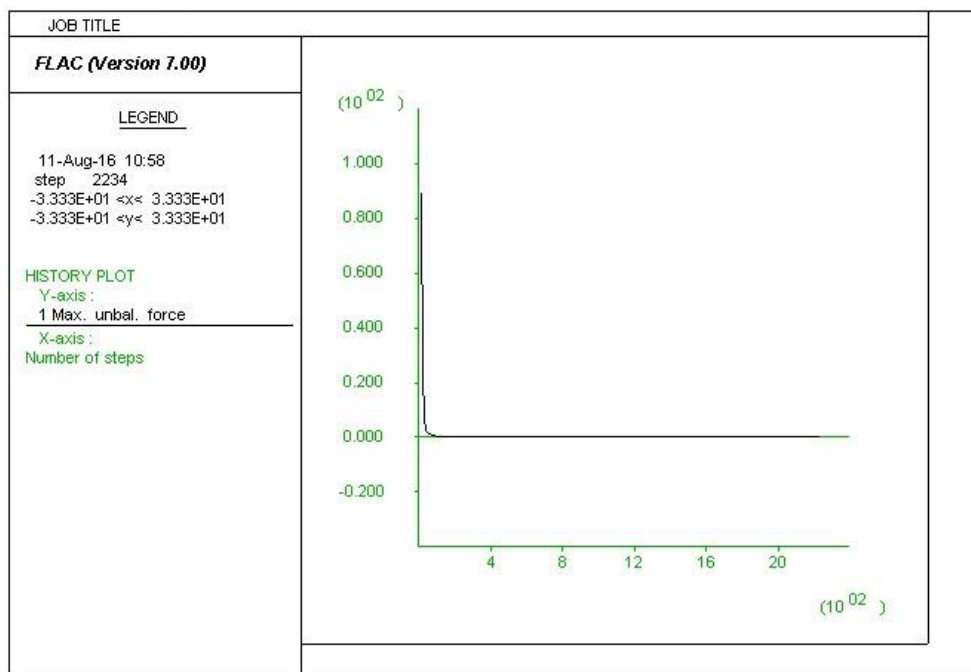
ردیف	مشخصه	علامت	مقدار	واحد
۱	نسبت تنش افقی با قائم	$k$	۰/۴۲	-
۲	تنش قائم	$\sigma_v$	۸/۷۱۶۴	MPa
۳	تنش‌های افقی	$\sigma_{zz}$ ، $\sigma_{xx}$	۳/۶۶۱	MPa
۴	فشار حاصل از وزن طبقات بالایی	$P$	۷/۶۰۲۹	MPa

برای محدود ساختن بینهایت درجه آزادی، لازم است تا مرز شبکه‌ها به واسطه مرزهای مصنوعی بسته شود. از این رو دیواره چپ و راست مدل در جهت  $x$  و پایین مدل در جهت  $y$  ثابت شده است.

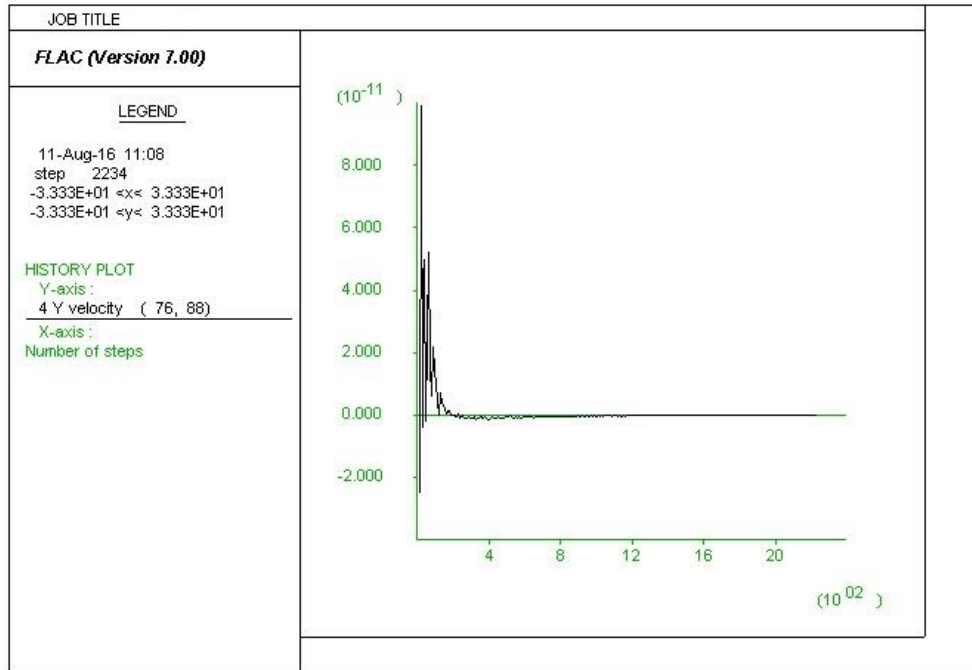


#### ۴-۶-۵- حل مدل و به تعادل رساندن آن قبل از عملیات حفاری

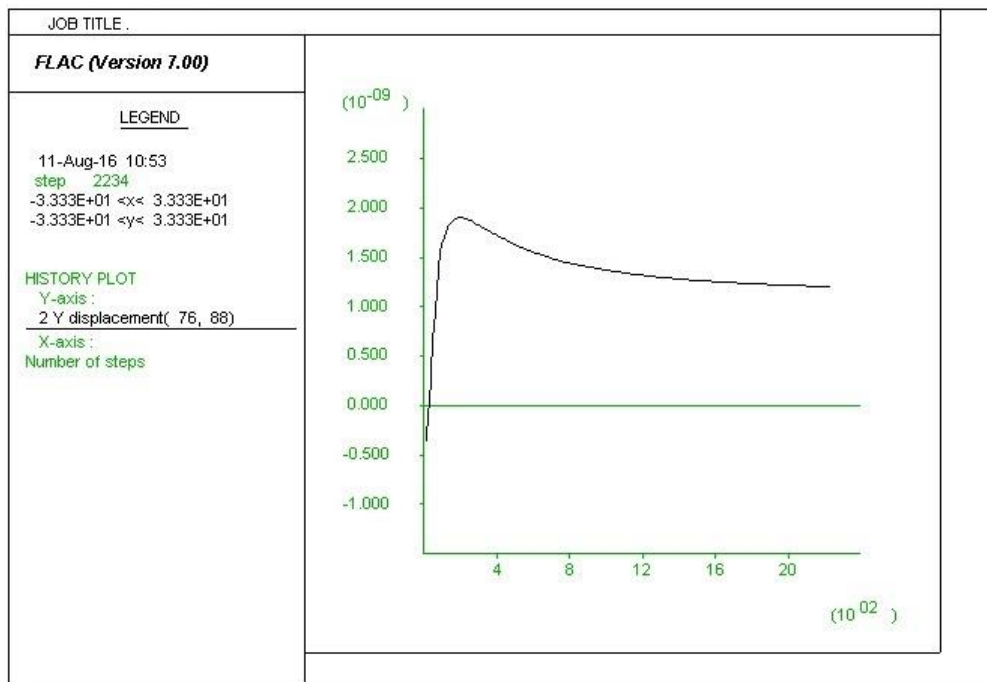
گام اول در حل مدل عددی این است که فرآیند مطابق با روند موجود در طبیعت روی دهد و شرایط مدل نزدیک به واقعیت، شبیه‌سازی شود. این عمل برای نشان دادن شرایط تعادل در مدل، قبل از حفر تونل است. در نتیجه لازم است مدل با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی، شرایط مرزی و تنش‌های برجا، قبل از حفاری به تعادل برسد. در این حالت مدل به تعادل اولیه رسیده و شرایط طبیعی زمین را دارا خواهد بود. در شکل‌های ۴-۵ تا ۴-۸ به ترتیب تاریخچه مربوط به نیروهای نامتعادل کننده، سرعت گرهی و جابجایی و همچنین کنترهای تنش قائم در تعادل اولیه با توجه به شرایط مرزی و اعمال شرایط اولیه مشاهده می‌شود. با توجه به همگرا شدن مقادیر نیروهی نامتعادل کننده و سرعت گرهی به صفر و همگرایی جابجایی به مقدار ثابتی و همچنین مطابقت مقادیر تنش‌هایی که توسط وزن بار توده سنگ در مدل‌سازی در اعماق مختلف به وجود آمده و کنترهای تنش عمودی، نشان دهنده تعادل اولیه درست مدل‌سازی است.



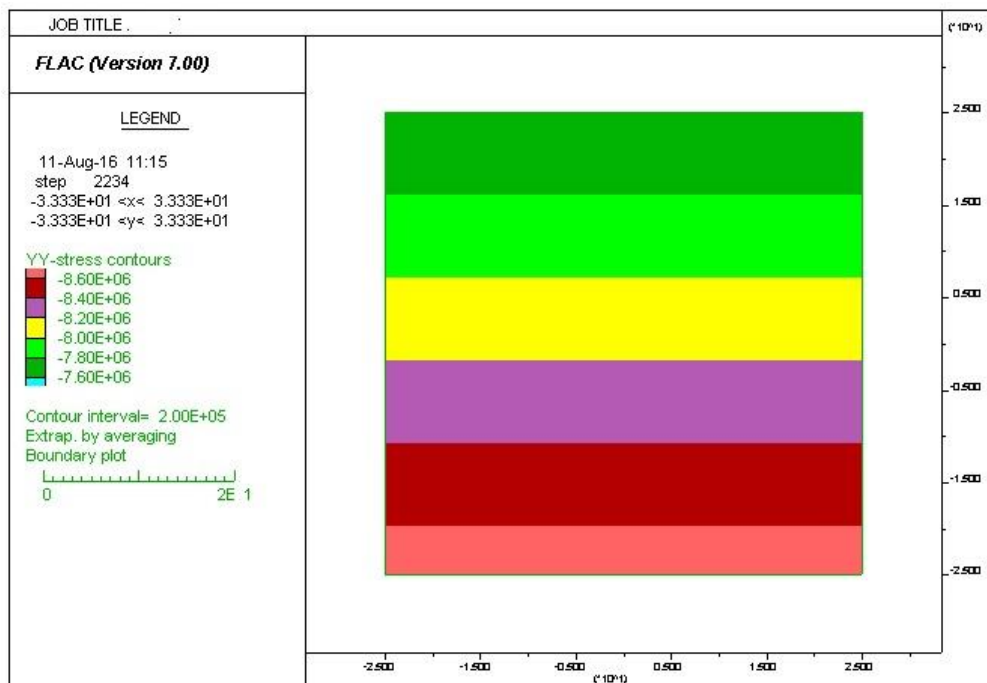
شکل ۴-۵ تاریخچه نیروهای نامتعادل کننده



شکل ۴-۶ تاریخچه سرعت گرهی



شکل ۴-۷ تاریخچه جابجایی



شکل ۴-۸ کنتور تنش های قائم

#### ۴-۶-۶-۶ حفاری تونل و اعمال ترخیص تنش مناسب

بعد از برقراری تعادل اولیه نوبت به حفر و نصب سیستم نگهداری می‌رسد. تخمین نگهداری در پایدارسازی تونل یکی از مسایل مهم در طراحی است. با اعمال ترخیص تنش لازم و میزان جابجایی مجاز به تونل، بعد سوم مربوط به حالت سه‌بعدی در حالت دوبعدی قابل مدل‌سازی است.

#### ۴-۶-۶-۶-۱ تعیین نرخ همگرایی بر حسب فاصله از جبهه کار

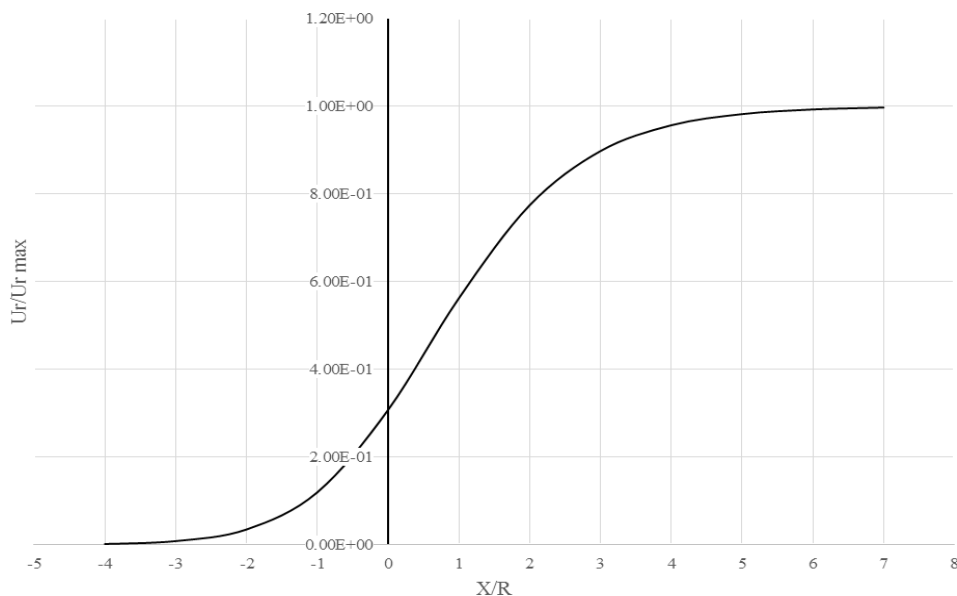
با تعیین همگرایی بر حسب فاصله تونل تا جبهه کار، می‌توان وضعیت نسبی بارها و جابجایی بدست آمده از پیشروی جبهه کار را مشخص کرد. چشم پوشی از همگرایی تونل تا لحظه نصب پوشش، نه تنها موجب برآورد نیروی زیاد وارد بر پوشش می‌شود بلکه در رفتار زمین و تعادل آن قبل از نصب سیستم نگهداری تاثیر بسزایی خواهد داشت. از این رو لازم است برای دست یابی به نتایج واقعی تر از مدل‌سازی میزان همگرایی تا قبل از نصب سیستم نگهداری منظور گردد. رفتار همگرایی تونل بر حسب فاصله از جبهه کار با استفاده از نمودار طولی و رابطه ۴-۸ قابل محاسبه است (شکل

۴-۹) [۳۲].

$$\frac{U_r}{U_{\max}} = \left[ 1 + \exp\left(-\frac{X/R}{1/110}\right) \right]^{-1/110} \quad (8-4)$$

در این رابطه،  $U_r$  مقدار جابجایی در فاصله  $X$  از جبهه کار،  $U_{\max}$  مقدار جابجایی حداکثر،  $X$  فاصله از جبهه کار تونل،  $\frac{U_r}{U_{\max}}$  نرخ همگرایی و  $R$  شعاع تونل است.

در این مدل فاصله پوشش تا جبهه کار برابر ۱ متر، قطر تونل برابر ۸ متر است که با توجه به رابطه (۸-۴) نرخ همگرایی برابر ۰/۳۶۹ محاسبه شده است. همچنین میزان حداکثر جابجایی در مدل سازی با توجه به ترخیص تنش کامل برابر با ۲/۶۴۵ محاسبه شده است که با جایگزینی در رابطه (۸-۴)، میزان جابجایی به ازای گام حفاری ۱ متر برابر ۹/۷۵ میلی متر به دست می آید.

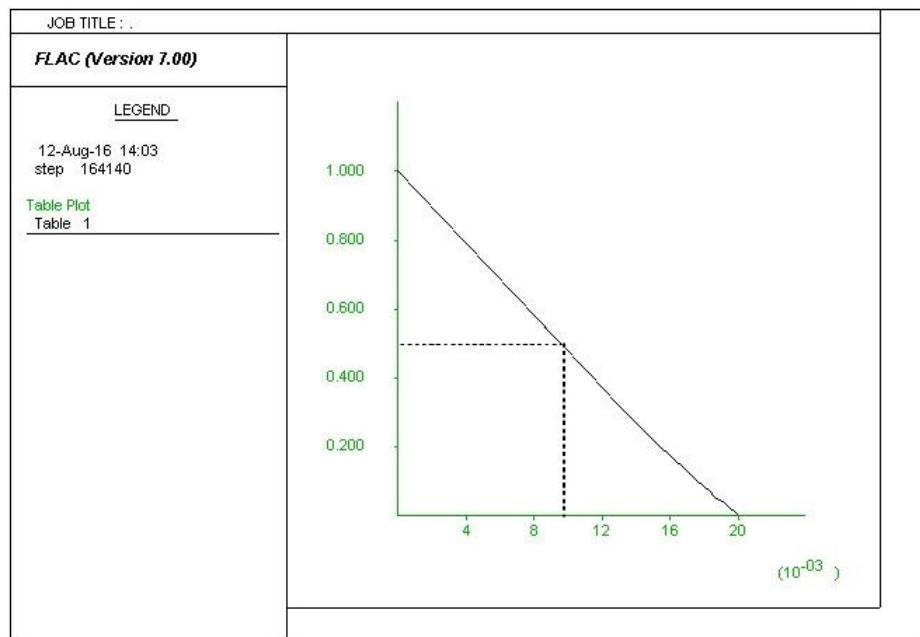


شکل ۹-۴ تغییرات نرخ همگرایی بر حسب فاصله از جبهه کار [۲۱]

#### ۴-۶-۲- ترسیم نمودار عکس العمل زمین (GRC) و تعیین مقدار ترخیص تنش

منحنی عکس العمل زمین را می توان از حل الاستو پلاستیک، در معرض تنش های تکنواخت محیطی و اعمال فشار یکنواخت داخلی بدست آورد. در تحقیق حاضر با تعریف نموداری با محور افقی

جابجایی و محور عمودی ترخیص تنش و اعمال کاهش درصدی فشار داخلی و تعیین میزان جابجایی مورد نظر نمودار عکس العمل زمین<sup>۱</sup> (GRC) با استفاده از نرم افزار FLAC ترسیم شده است (شکل ۱۰-۴).



شکل ۱۰-۴ نمودار عکس العمل زمین (GRC) ترسیم شده برای مقطع

با مشخص کردن جابجایی بر روی نمودار عکس العمل زمین (GRC) میزان ترخیص تنش مشخص می شود. در اینجا با توجه به میزان جابجایی حاصل از نمودار طولی (۹/۷۵ میلی متر) و مشخص کردن این مقدار بر روی نمودار عکس العمل زمین، میزان ترخیص تنش لازم برابر ۴۷ درصد محاسبه شده است (شکل ۱۰-۴). با اعمال ترخیص تنش بدست آمده (۴۷ درصد) به مدل، پایداری تونل قبل از نصب پوشش نگهداری مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۴-۶-۳- بررسی پایداری تونل بعد از ترخیص تنش

روش اساسی طراحی سازه‌ها نمی تواند برای تونل‌ها به کار بسته شود، زیرا تنش‌ها و کرنش‌ها در زمین به طور کامل شناخته شده نیستند. کرنش بحرانی یکی از بهترین معیارها جهت بررسی شکست

<sup>۱</sup>Ground Reaction Curve

در تونل ها است. ساکورایی در سال ۱۹۸۶ روشی برای ارزیابی پایداری زمین با توجه به کرنش بحرانی پیشنهاد کرده است که بر اساس فشار تک محوری در اطراف تونل و مدول الاستیسیته محیط بیان شده است. کرنش بحرانی با رابطه (۹-۴) تعیین می شود [۳۳] و [۳۴].

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \quad (9-4)$$

در این رابطه  $\sigma_c$  مقاومت فشاری تک محوره و  $E$  مدول الاستیسیته است.

ساکورایی و همکارانش علاوه بر انتشار روابط بین مقاومت فشاری تک محوری و کرنش بحرانی برای سنگ های مختلف، روابطی نیز بین مدول تغییر شکل پذیری سنگ های مختلف و کرنش بحرانی ارائه کردند که در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است. از مقایسه مقادیر تخمینی کرنش مجاز حاصل از مدل سازی عددی با مقادیر واقعی آن، تصمیم گیری لازم در خصوص پایداری اتخاذ خواهد شد. اگر مقدار اندازه گیری شده کرنش از کرنش بحرانی ساکورایی (متناسب با تراز هشدار خطر طراحی) کمتر باشد، تونل پایدار است. این مساله با فرض آن است که کرنش بحرانی همواره از کرنش گسیختگی کمتر باشد [۳۳] و [۳۴].

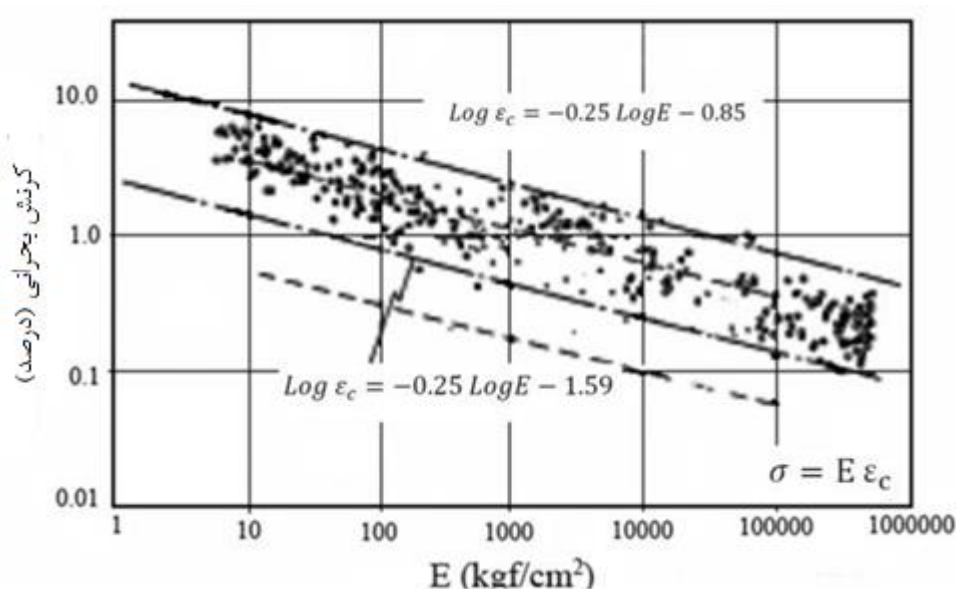
ساکورایی (۱۹۹۳) با برقراری ارتباط بین نتایج آزمایشگاهی و داده های صحرایی، رابطه بین کرنش مجاز (بحرانی) و مقاومت فشاری و مدول یانگ، سه تراز هشدار خطر ارائه داده است. روابط (۴-۱۰) تا (۴-۱۲) به ترتیب نشان دهنده تراز هشدار خطر I، II و III می باشند. برای تحلیل پایداری تونل ها تراز هشدار خطر II به عنوان مبنای طراحی پیشنهاد شده است [۳۳] و [۳۴].

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad \text{تراز هشدار خطر I} \quad (10-4)$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad \text{تراز هشدار خطر II} \quad (11-4)$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad \text{تراز هشدار خطر III} \quad (12-4)$$

در این روابط  $\varepsilon_c$  کرنش بحرانی در حالت مقاومت فشاری بر حسب درصد و  $E$  مدول تغییر شکل پذیری توده سنگ بر حسب  $\frac{kgf}{cm^2}$  می‌باشد.



شکل ۴-۱۱ رابطه بین مدول تغییر شکل پذیری و کرنش بحرانی [۳۴]

از آنجا که توده سنگ تحت تنش سه محوره قرار دارد، استفاده از ماکزیمم کرنش برشی برای ارزیابی پایداری تونل منطقی تر به نظر می‌رسد. ساکورایی و همکارانش در سال ۱۹۹۷ رابطه (۴-۱۳) را برای محاسبه کرنش برشی بحرانی ( $\gamma_c$ ) در حالت سه بعدی با استفاده از کرنش بحرانی در حالت فشار نامحصور و ضریب پواسون پیشنهاد دادند. قابل ذکر است که در طراحی مربوط به سازه‌های زیر سطحی نظیر تونل تراز هشدار II به عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود [۳۳].

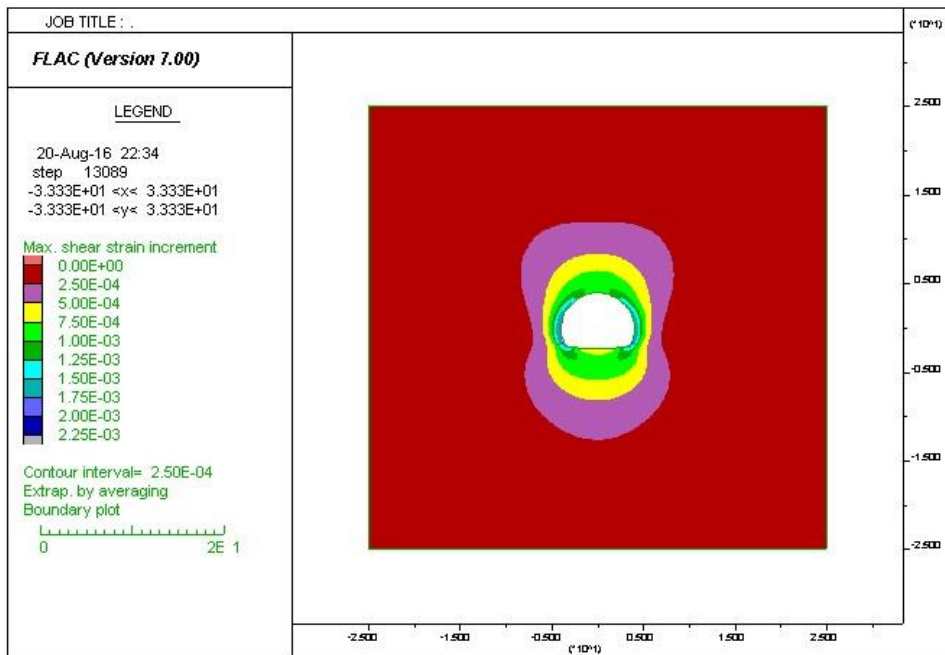
$$\gamma_c = (1 + \nu) \varepsilon_c \quad (۴-۱۳)$$

برای سنجش پایداری تونل و قرار دادن آن در یکی از ترازهای هشدار، مقادیر کرنش برشی طبق روابط (۴-۱۰) تا (۴-۱۳) در جدول (۴-۱۷) بدست آمده است.

جدول ۴-۱۷ مقادیر کرنش بحرانی محاسبه شده توسط روابط ساکورایی

تراز هشدار خطر	$\varepsilon_c$	$\gamma_c$
III	$1/10.8 e^{-2}$	$1/474 e^{-2}$
II	$4/728 e^{-3}$	$6/288 e^{-3}$
I	$2/0.17 e^{-3}$	$2/683 e^{-3}$

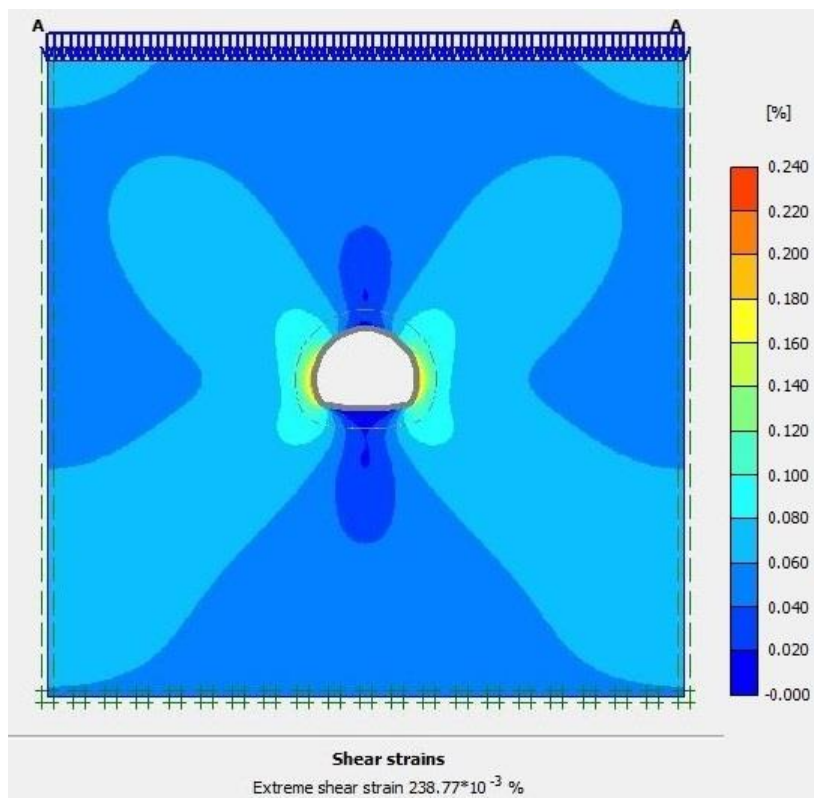
همان طور که در شکل ۴-۱۲ مشاهده شده است مقدار حداکثر کرنش برشی محاسبه شده از مدل سازی عددی در قسمت پاتاق تونل بوده و برابر  $2/471 e^{-3}$  بدست آمده است که در محدوده تراز هشدار I قرار می گیرد و تونل با این اعمال ترخیص تنش پایدار است.



شکل ۴-۱۲ کرنش برشی ایجاد شده در اطراف تونل در اثر اعمال ترخیص تنش

جهت اعتبار سنجی به همین روش با اعمال ترخیص تنش ذکر شده، وضعیت کرنش برشی در نرم افزار Plaxis نیز مطابق با شکل ۴-۱۳ به دست آمده است.





شکل ۴-۱۳ کرنش برشی ایجاد شده در اطراف تونل در اثر اعمال ترخیص تنش در Plaxis

#### ۴-۶-۷- نصب سیستم نگهداری

تخمین سیستم نگهداری مورد نیاز برای پایدارسازی تونل یکی از مسایل مهم در طراحی است. از این رو بر اساس نتایج حاصل از تحلیل پایداری لازم است برای کنترل جابجایی ها، سیستم نگهداری مناسبی طراحی شود. در این تحقیق سیستم نگهداری از نوع پوشش بتن پاشیده الیافی در ضخامت های مختلف برای تونل دسترسی سرزه مدل سازی شده است. پوشش بتن الیافی با استفاده از المان پوسته در نرم افزار عددی  $FLAC^{2D}$  مدل سازی شده است که پارامترهای ورودی مورد نیاز برای این المان عبارتست از: مدول الاستیسیته، مساحت مقطع، ممان اینرسی و ضخامت. در این تحقیق ضخامت های ۳۰، ۲۰ و ۱۰ سانتی متر از بتن الیافی به عنوان پوشش در نظر گرفته شده است که خصوصیات این پوشش ها در جدول ۴-۱۸ بیان شده است. همچنین قابل ذکر است که برای هر سه

نوع ضخامت از پوشش مقدار مدول الاستیسیته و نسبت پواسون با توجه به آزمایش‌های انجام شده به ترتیب برابر  $39/5$  GPa و  $0/2$  در نظر گرفته شده است.

جدول ۴-۱۸ پارامترهای ورودی المان پوسته برای مدل‌سازی پوشش بتن الیافی در ضخامت‌های مختلف

ردیف	ضخامت (cm)	مساحت مقطع ( $m^2$ )	ممان اینرسی ( $m^4$ )
۱	۱۰	۰/۱	$0/833 e-4$
۲	۲۰	۰/۲	$6/667 e-4$
۳	۳۰	۰/۳	$22/5 e-4$

#### ۴-۷- تحلیل پایداری پوشش بتن پاشیده الیافی

به‌طور کلی هدف از طراحی یک سازه، تامین ایمنی در برابر فروریختگی و تضمین عملکرد مناسب در زمان بهره برداری است. از این رو لازم است پایداری سیستم نگهداری اجرا شده با در نظر گرفتن ضریب ایمنی قابل قبولی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته شود. یکی از رایج‌ترین راهکارهای بررسی پایداری استفاده از نمودارهای ظرفیت باربری است.

#### ۴-۷-۱- نمودارهای ظرفیت باربری<sup>۱</sup>

یک ارایه گرافیکی مشتمل بر نیروی محوری و گشتاور خمشی توأم به صورت خطی و همراه با یک پوش شکست - که به‌طور مثال به صورت حداکثر نیروی محوری و گشتاور خمشی که در محدوده مجاز نگهداری قرار دارد تعریف شده است - نمودار اندرکنشی نیرو-گشتاور خمشی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. به‌طور مشابه ارایه نیروی محوری و نیروی برشی به صورت خطی و همراه با در نظر گرفتن پوش شکست، نمودار اندرکنشی نیروی محوری-نیروی برشی<sup>۳</sup> نامیده می‌شود. هر دو نمودار به‌طور رایج به عنوان نمودارهای ظرفیت باربری نگهداری در مهندسی سازه و طراحی بتن شناخته می‌شوند. نمودارهای باربری ابزارهای مناسبی برای طراحی پوشش‌های تونل می‌باشند؛ چنانچه به راحتی مقدار

<sup>۱</sup> Capacity Diagram

<sup>۲</sup> Thrust- Shear Force Interaction Diagram

<sup>۳</sup> Thrust- Bending Moment Interaction Diagram

کمی از عملکرد نگهداری را ارایه می‌دهد. در این تحقیق، نمودارهای باربری بر رفتار الاستیک بتن تاکید دارند و نمودارهای باربری الاستیک مورد استفاده قرار گرفته است [۳۰].

در جدول ۴-۱۹ مشخصات مکانیکی مربوط به بتن الیافی مورد استفاده در مدل سازی عددی بیان شده است:

جدول ۴-۱۹ خصوصیات مکانیکی بتن الیافی استفاده شده در مدل سازی

ردیف	مشخصه	علامت	نوع آزمایش و نمونه مورد آزمایش	سن (روز)	مقدار	واحد
۱	مقاومت فشاری	$f_c$	فشاری تک‌محوری بر روی نمونه‌های مکعبی	۷ ۲۸	۵۵/۲ ۶۰/۳	MPa
۲	مقاومت کششی	$f_{ct}$	برزیلی بر روی نمونه‌های استوانه‌ای شکل	۷ ۲۸	۲/۶ ۳	MPa
۳	مقاومت خمشی	$f_{ctk}$	خمش بر روی نمونه‌های منشوری	۷ ۲۸	۴/۳ ۴/۶	MPa
۴	مدول الاستیسیته	$E_{cm}$	آزمایش بارگذاری تک‌محوری و اندازه‌گیری کرنش‌های انجام شده	۷ ۲۸	۳۱/۶ ۳۹/۵	GPa

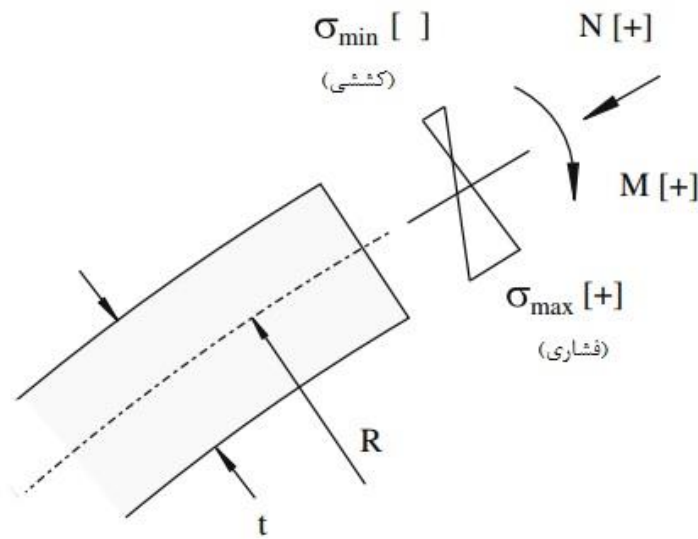
#### ۴-۷-۲- ترسیم نمودارهای اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی و بررسی

##### ظرفیت باربری

در ابتدا روش رسم نمودارهای اندرکنشی نیرو - گشتاور خمشی مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۴-۱۴ مقطعی از کمان را نمایش می‌دهد که تحت نیروی محوری  $N$  و گشتاور خمشی  $M$  قرار گرفته است و تنش‌های محوری ایجاد شده  $\sigma_{min}$  و  $\sigma_{max}$  نشان داده شده است که از رابطه ۴-۱۴ محاسبه شده است [۳۵].

$$\sigma_{min}^{max} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{I} t / 2 \quad (4-14)$$

در این رابطه  $A$  مساحت و  $I$  ممان اینرسی مقطع پوششی و  $t/2$  نصف ضخامت پوشش است.



شکل ۴-۱۴ مقطعی از پوشش بتنی با ضخامت  $t$  تحت نیروی محوری  $N$  و گشتاور خمشی  $M$  [۳۵]

اگر فرض شود که پوشش بتنی دارای حداکثر مقاومت فشاری  $\sigma_c$  و حداکثر مقاومت کششی  $\sigma_t$

است، در این صورت ضریب ایمنی در شکست فشاری یا کششی از رابطه (۴-۱۵) محاسبه می‌شود.

$$FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_{max}} = \frac{\sigma_t}{\sigma_{min}} \quad (۴-۱۵)$$

برای ایجاد رابطه ی نیروی محوری  $N$  و گشتاور خمشی  $M$  با ضریب ایمنی  $FS$  مشخصی هم در حالت

فشاری و هم در حالت کششی، می‌توان روابط (۴-۱۴) و (۴-۱۵) را درهم ترکیب کرد. به عنوان مثال

محدوده مقدار نیروی محوری  $N$  در حالت شکست فشاری به صورت رابطه (۴-۱۶) بیان می‌شود.

$$N = -\frac{|M|At}{\gamma I} + \frac{\sigma_c A}{FS} \quad (۴-۱۶)$$

به‌طور مشابه بر اساس  $\sigma_{min}$  در رابطه (۴-۱۴)، محدوده مقدار نیروی محوری  $N$  برای شکست

کششی از رابطه (۴-۱۷) محاسبه می‌شود.

$$N = \frac{|M|At}{\gamma I} + \frac{\sigma_t A}{FS} \quad (۴-۱۷)$$

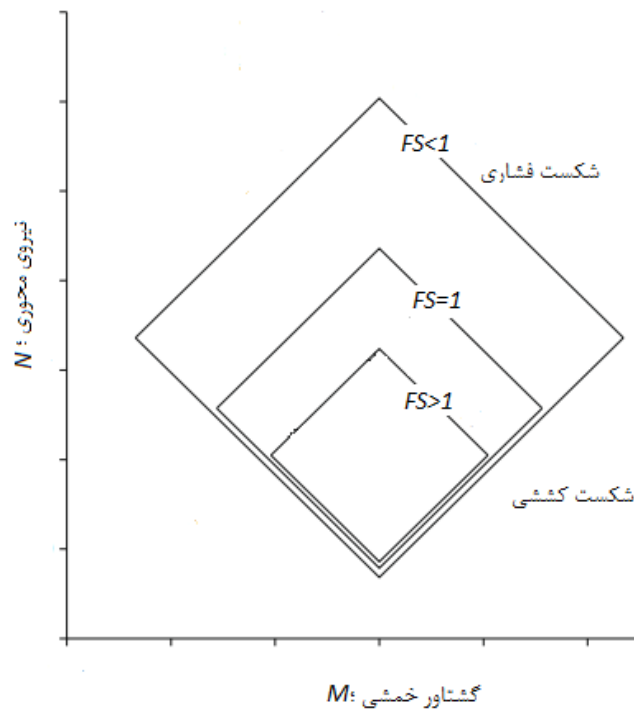
با مساوی قرار دادن رابطه های (۴-۱۶) و (۴-۱۷)، مقدار بحرانی گشتاور خمشی  $M_{cr}$  همراه با مقدار ویژه ای از ضریب ایمنی هم برای حالت شکست فشاری و هم حالت شکست کششی در یک زمان یکسان بدست می آید [۳۵].

$$M_{cr} = \pm \frac{I \sigma_c - \sigma_t}{t FS} \quad (۴-۱۸)$$

با توجه به رابطه های (۴-۱۶) تا (۴-۱۸)، نمودار اندرکنشی نیروی محوری - گشتاور خمشی قابل ترسیم است. در شکل (۴-۱۵)، محور افقی و عمودی به ترتیب بیانگر گشتاور خمشی و نیروی محوری می باشند. مرز بالا و پایین نمودار لوزی شکل به ترتیب از ترسیم روابط (۴-۱۶) و (۴-۱۷) بدست آمده است. همچنین راس سمت راست و چپ نمودار لوزی شکل از رابطه (۴-۱۸) محاسبه شده است. بنابراین می توان بیان کرد که نمودار لوزی شکل ۴-۱۵ محدوده ای متشکل از حد مقاومت کششی، فشاری و ضخامت کمانش به همراه مقدار ضریب ایمنی مشخصی است که می تواند مقدار باربری مشخصی را تعیین کند. از این رو اگر مقدار نیروی محوری و گشتاور خمشی اعمالی در محدوده داخل نمودار لوزی شکل ترسیم شده قرار گیرد، پوشش پایدار و در غیر این صورت ناپایدار است [۳۵].

در پروژه های مربوط به طراحی بتن، نمودار اندرکنشی نیروی محوری - گشتاور خمشی بر این فرض ترسیم می شود که بتن برای انواع مدهای شکست (فشار محوری، فشار محوری و خمشی، کشش محوری و غیره) حداکثر مقاومت خود را به کار می گیرد.

با در نظر گیری پوشش بتن الیافی در مدل سازی عددی، توزیع نیروهای محوری و ممان های خمشی وارد بر هریک از ضخامت ها مشاهده شده است که در شکل های ۴-۱۶ و ۴-۱۷ به ترتیب توزیع نیروهای محوری و ممان خمشی وارد بر پوشش بتن الیافی با ضخامت ۳۰ سانتی متر نشان داده شده است. همچنین مقادیر خروجی حداکثری نیروهای محوری و ممان های خمشی حاصل از مدل سازی عددی برای ضخامت های ۳۰، ۲۰ و ۱۰ سانتی متر از بتن الیافی در جدول ۴-۲۰ بیان شده است.



شکل ۴-۱۵ نمودار اندرکنشی نیروی محوری  $N$  - گشتاور خمشی  $M$  با مقادیر فرضی از  $SF$  [۳۵]

جدول ۴-۲۰ مقادیر حداکثری نیروهای محوری و ممان خمشی وارده بر بتن الیافی در مدلسازی عددی

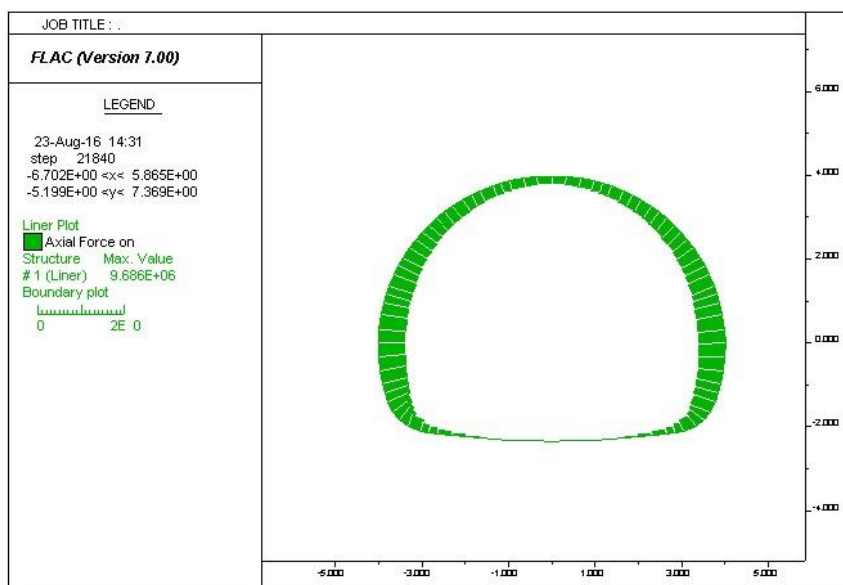
ردیف	ضخامت (cm)	مقدار حداکثر نیروی محوری ( $N$ )	مقدار حداکثر ممان خمشی ( $N$ )
۱	۱۰	۶۱۸۳۰۰۰	۱۷۷۰۸
۲	۲۰	۸۳۸۲۰۰۰	-۹۵۰۱۳
۳	۳۰	۹۶۸۶۰۰۰	-۲۲۵۹۰۰

جهت اعتبار سنجی مدلسازی انجام شده توسط نرم افزار  $FLAC^{2D}$ ، تحت همین شرایط توزیع

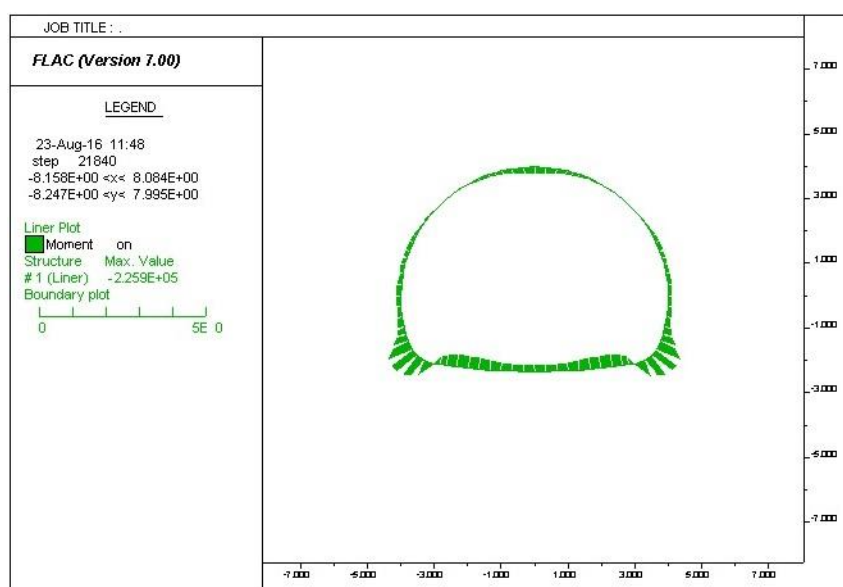
نیروی محوری و ممان خمشی وارد بر پوشش در نرم افزار Plaxis نیز در شکل ۴-۱۸ و ۴-۱۹ آورده

شده است. توزیع نیروها و ممان های وارد بر لاینینگ نشان از نزدیک بودن نتایج حاصل از هر دو نرم

افزار بوده و به عبارتی صحت مدل سازی را تضمین می کند.

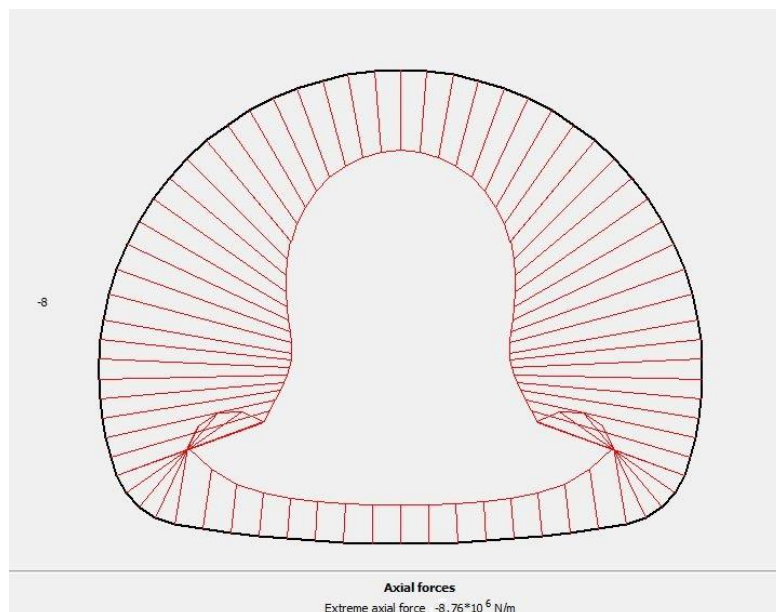


شکل ۴-۱۶ نمودار توزیع نیروهای محوری بر پوشش بتن الیافی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر

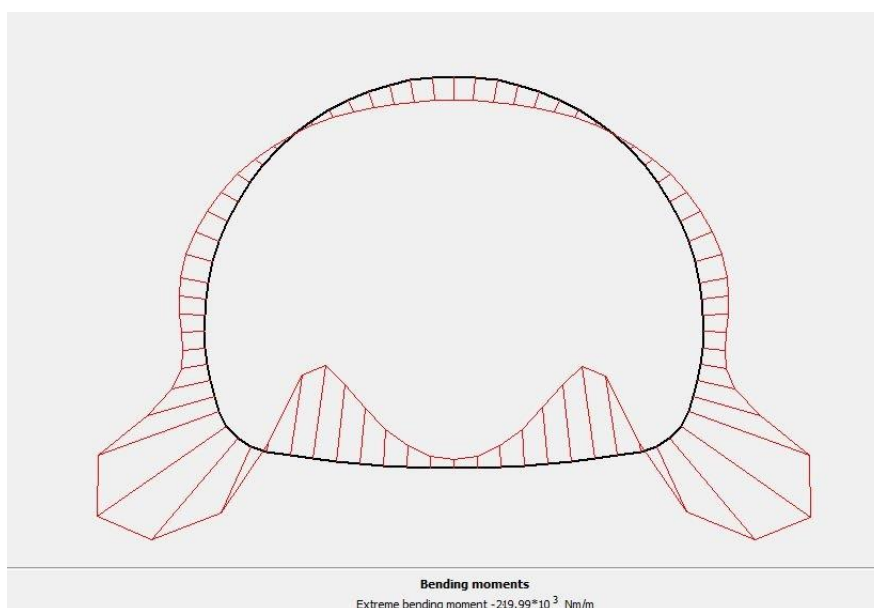


شکل ۴-۱۷ نمودار توزیع ممان های خمشی بر روی پوشش بتن الیافی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر

با توجه به روابط (۴-۱۵ تا ۴-۱۸) و حداکثر نیروی محوری و ممان های خمشی اعمال شده به پوشش بتن الیافی، نمودارهای اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی برای پوشش های بتن الیافی با ضخامت های ۳۰، ۲۰ و ۱۰ سانتی متر با بهره‌مندی از نرم‌افزار Excel به ترتیب در شکل‌های ۴-۲۰ تا ۴-۲۲ ترسیم شده است.

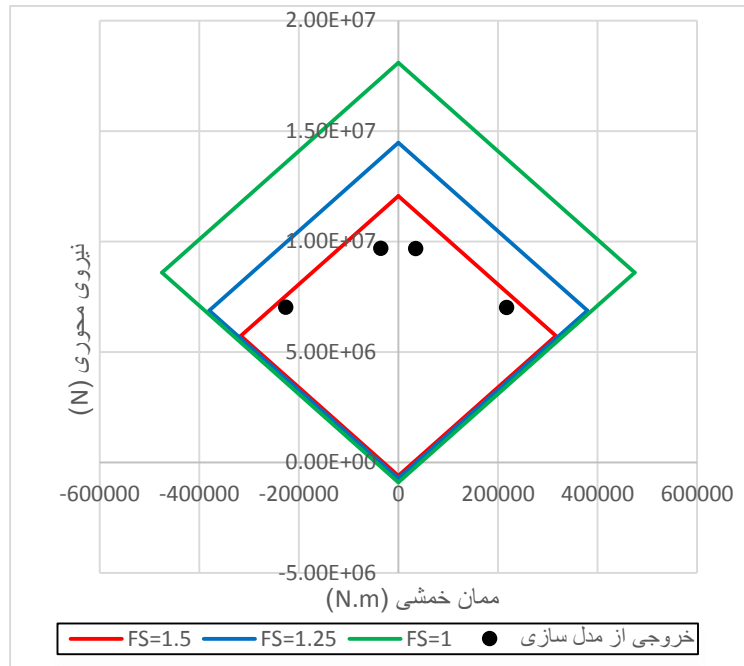


شکل ۴-۱۸ توزیع نیروی محوری بر پوشش با ضخامت ۳۰ سانتیمتر در Plaxis

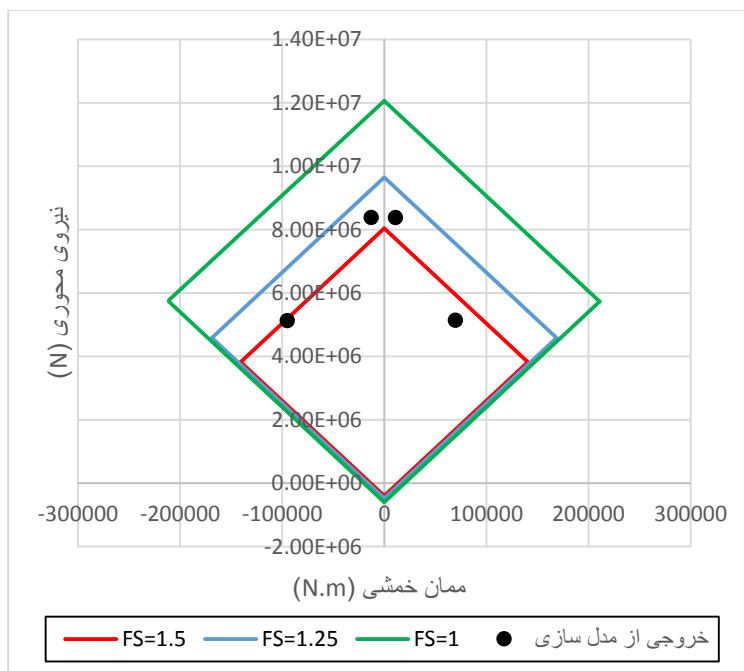


شکل ۴-۱۹ توزیع ممان خمشی بر روی پوشش با ضخامت ۳۰ سانتیمتر در Plaxis

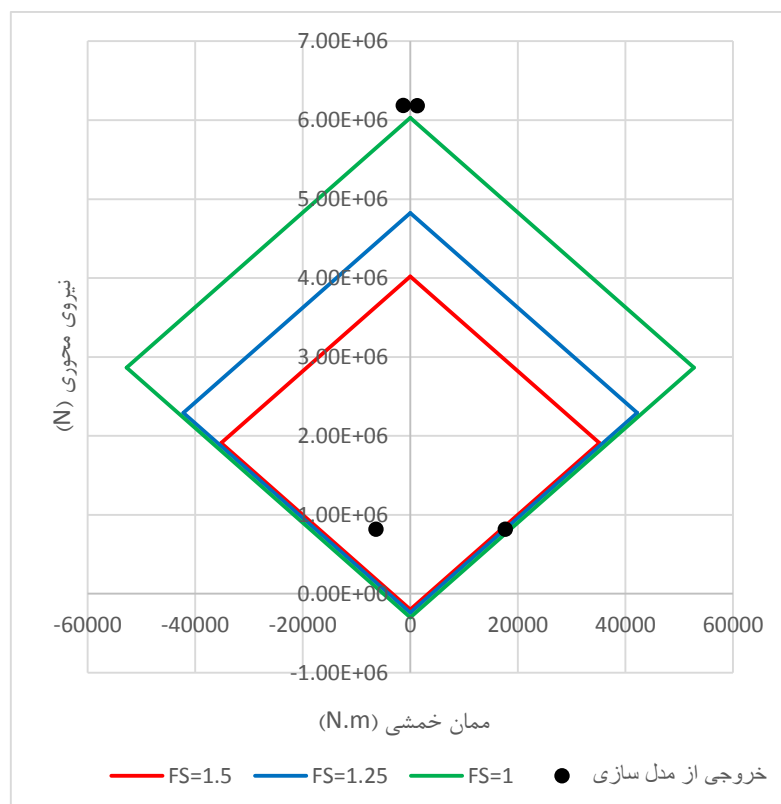




شکل ۴-۲۰ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی برای بتن پاشیده الیافی با ضخامت ۳۰ سانتی متر



شکل ۴-۲۱ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی برای بتن الیافی پاشیده با ضخامت ۲۰ سانتی متر



شکل ۴-۲۲ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی برای بتن پوشیده الیافی با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر

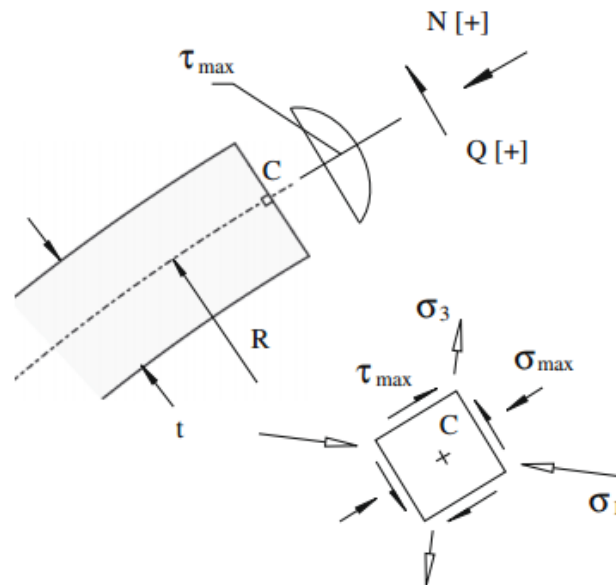
با توجه به شکل ۴-۲۰ پوشش بتن الیافی در نظر گرفته شده با ضخامت ۳۰ سانتی متر برای تونل دسترسی سرزه، با ضریب ایمنی بالای ۱/۵ پایدار می‌باشد. به عبارتی حداکثر نیروهای محوری و ممان خمشی اعمال شده به پوشش ۳۰ سانتی متری به اندازه بیش از ۱/۵ برابر کمتر از مقاومت پوشش است. همچنین با توجه به شکل ۴-۲۱ پوشش بتن الیافی در نظر گرفته شده با ضخامت ۲۰ سانتی متر برای تونل دسترسی سرزه با ضریب ایمنی کمتر از ۱/۵ و بالای ۱/۲۵ پایدار است. با توجه به شکل ۴-۲۲ پوشش بتن الیافی در نظر گرفته شده با ضخامت ۱۰ سانتی متر برای تونل دسترسی سرزه ناپایدار بوده و حداکثر نیروی محوری اعمال شده به پوشش بیشتر از مقاومت تک‌محوری بتن بوده و ناپایداری را به همراه خواهد داشت.

### ۳-۷-۴- ترسیم نمودارهای اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی و بررسی

#### ظرفیت باربری

در شکل ۲۲-۴ مقطعی از پوشش بتنی تحت تاثیر نیروی محوری  $N$  و نیروی برشی  $Q$  به همراه توزیع (سهمی) نیروی برشی (ایجاد شده در اثر نیروی برشی) نمایش داده شده است. حداکثر نیروی برشی  $\tau_{max}$  در محور خنثی اتفاق افتاده و مقدار آن از رابطه (۱۹-۴) قابل محاسبه است [۳۵].

$$\tau_{max} = \frac{3}{2} \frac{Q}{A} \quad (۱۹-۴)$$



شکل ۲۳-۴ مقطعی از پوشش بتنی تحت نیروی محوری  $N$  و نیروی برشی  $Q$  [۳۰]

نیروی محوری باعث ایجاد تنش نرمالی می‌شود که مقدار آن از رابطه (۲۰-۴) قابل محاسبه است.

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} \quad (۲۰-۴)$$

در رابطه های (۱۹-۴) و (۲۰-۴)،  $A$  مساحت مقطع پوششی است.

با توجه به اینکه وضعیت تنش در نقطه c بر روی محور خنثی پوشش با استفاده از  $\sigma_{max}$  و  $\tau_{max}$  بررسی می‌شود، مقادیر حداکثر و حداقل تنش اصلی  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  در این نقطه از رابطه (۲۱-۴) قابل محاسبه است [۳۵].

$$\sigma_{1,3} = \frac{\sigma_{max}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{max}}{2}\right)^2 + \tau_{max}^2} \quad (21-4)$$

فرض شده پوشش بتنی دارای مقاومت فشاری  $\sigma_c$  و مقاومت کششی  $\sigma_t$  است؛ بنابراین ضریب ایمنی پوشش روی محور خنثی در حالت فشاری و کششی از رابطه (۲۲-۴) محاسبه می‌شود [۳۵].

$$FS = \frac{\sigma_c}{\sigma_1} = \frac{\sigma_t}{\sigma_3} \quad (22-4)$$

با ترکیب رابطه های (۱۹-۴) و (۲۰-۴)، رابطه نیروی محوری  $N$  و نیروی برشی  $Q$  برای ضریب ایمنی  $FS$  در حالت های فشاری و کششی بدست می آید. حال با توجه به مقدار  $\sigma_1$  در رابطه (۴-۲۱) و تعریف ضریب ایمنی در معادله (۲۲-۴)، رابطه نیروی محوری  $N$  و نیروی برشی  $Q$  در حالت فشاری طبق رابطه (۲۳-۴) بیان می‌شود [۳۵].

$$N = \frac{\sigma_c A}{FS} - \frac{9}{4} \frac{Q^2 FS}{\sigma_c A} \quad (23-4)$$

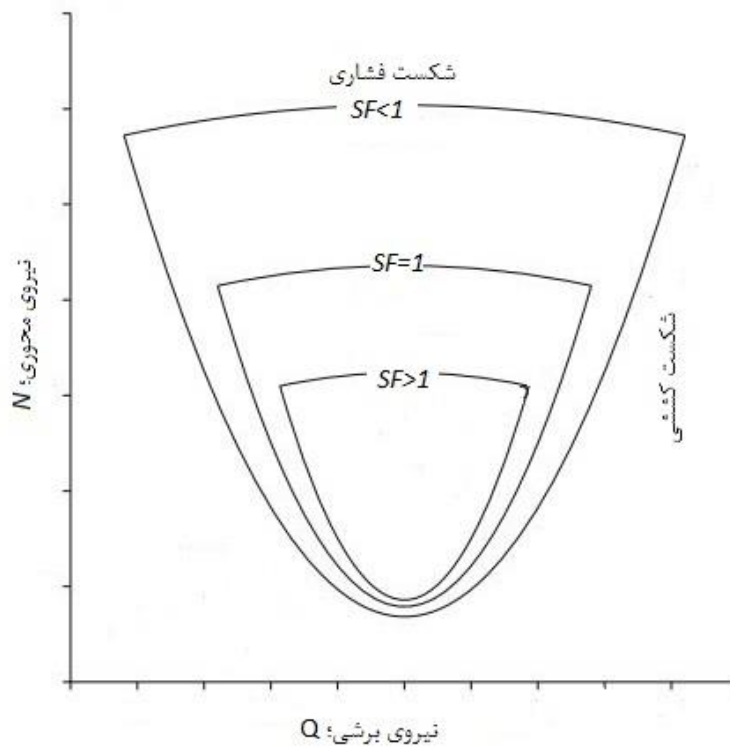
به‌طور مشابه با توجه به مقدار  $\sigma_3$  در رابطه ۴-۱۷، محدوده مجاز نیروی محوری  $N$  بر اساس نیروی برشی  $Q$  در حالت کششی طبق رابطه ۴-۲۴ بیان می‌شود [۳۵].

$$N = \frac{\sigma_t A}{FS} - \frac{9}{4} \frac{Q^2 FS}{\sigma_t A} \quad (24-4)$$

مقدار بحرانی نیروی برشی  $Q_{cr}$  بر اساس مقدار مشخصی از ضریب ایمنی  $SF$  هم برای حالت گسیختگی فشاری و هم حالت گسیختگی کششی از رابطه (۲۵-۴) محاسبه می‌شود (توجه شود  $\sigma_t$  در رابطه (۲۴-۴) مقداری منفی دارد) [۳۵].

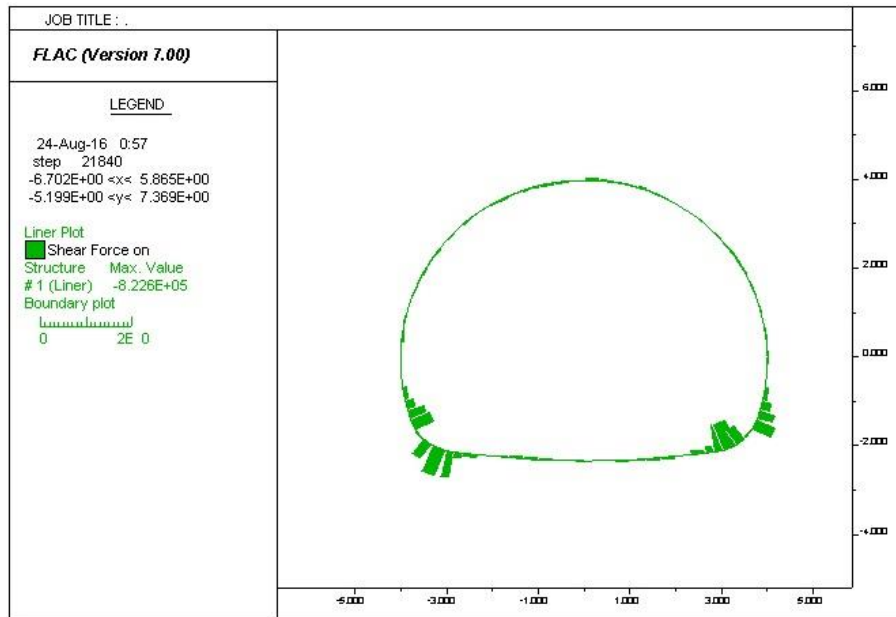
$$Q_{cr} = \pm \frac{A}{FS} \sqrt{-\frac{4}{9} \sigma_c \sigma_t} \quad (25-4)$$

حال با توجه به رابطه های (۲۳-۴) تا (۲۵-۴) نمودار اندرکنشی نیروی محوری  $N$  - نیروی برشی  $Q$  قابل ترسیم است. در شکل ۲۴-۴ محورهای افقی و عمودی به ترتیب بیانگر نیروی برشی و نیروی محوری می باشند. در این شکل مرز بسته بالا و پایین نمودار به ترتیب از رابطه های ۲۳-۴ و ۲۴-۴ استخراج می شوند. همچنین محل تلاقی قسمت بالا و پایین نمودار در سمت چپ و راست نمودار از رابطه (۲۵-۴) قابل استخراج است. بنابر این می توان بیان کرد که نمودار شکل ۲۴-۴ محدوده ای متشکل از حد مقاومت کششی، فشاری و ضخامت کمانش به همراه مقدار ضریب ایمنی مشخصی است که میتواند مقدار باربری مشخصی را تعیین کند [۲۹]. از این رو اگر مقدار نیروی محوری و نیروی برشی اعمالی در محدوده داخل نمودار ترسیم شده قرار گیرد، پوشش پایدار و در غیر این صورت ناپایدار است [۳۵].



شکل ۲۴-۴ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی با مقادیر فرضی از  $SF$  [۳۵]

در شکل ۴-۲۵ نمودار توزیع نیروی برشی بر پوشش بتن الیافی با ضخامت ۳۰ سانتی متر نشان داده شده است. با توجه به شکل ۴-۲۵ حداکثر مقدار نیروی برشی به انحنای پایین دیواره تونل وارد شده است. همچنین مقادیر حداکثری نیروهای برشی اعمال شده به بتن الیافی در ضخامت‌های ۱۰، ۲۰ و ۳۰ سانتی‌متر در جدول ۴-۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۵ نمودار توزیع نیروی برشی بر پوشش بتنی الیافی با ضخامت ۳۰ سانتی متر

همچنین توزیع نیروی برشی وارده بر پوشش توسط Plaxis در شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است.

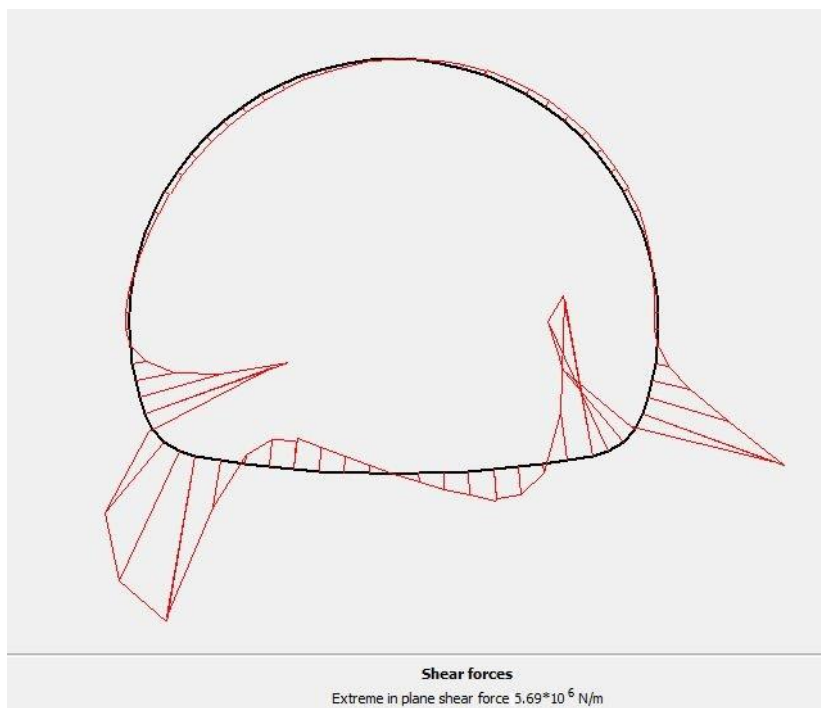
جدول ۴-۲۱ مقادیر حداکثری نیروهای محوری و ممان خمشی وارده بر بتن الیافی در مدل‌سازی عددی

ردیف	ضخامت (cm)	مقدار حداکثر نیروی برشی ( $N$ )
۱	۱۰	۱۳۹۶۰۰
۲	۲۰	-۴۴۶۷۰۰
۳	۳۰	-۸۲۲۶۰۰

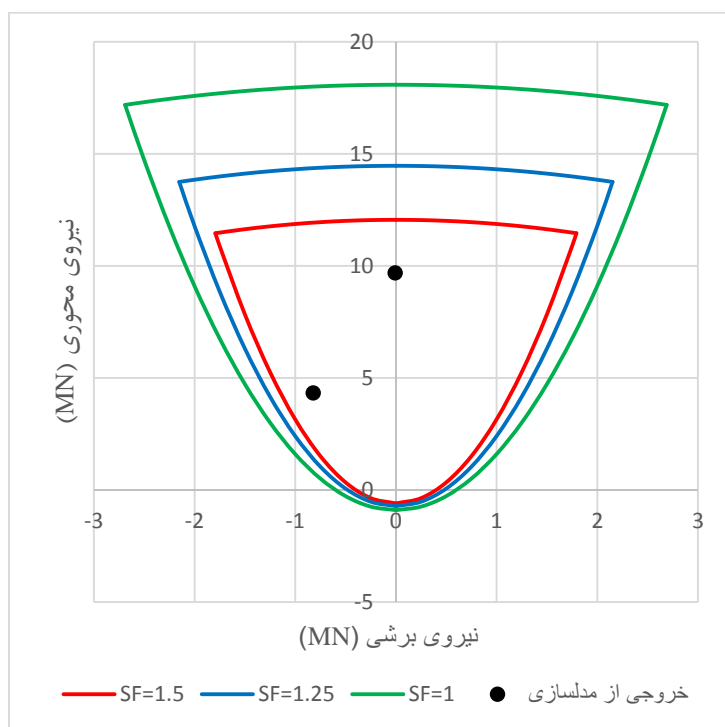
با توجه به روابط (۴-۲۳) تا (۴-۲۵) و حداکثر نیروی های محوری و برشی اعمال شده به پوشش

بتن الیافی، نمودارهای اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی برای پوشش های بتن الیافی با

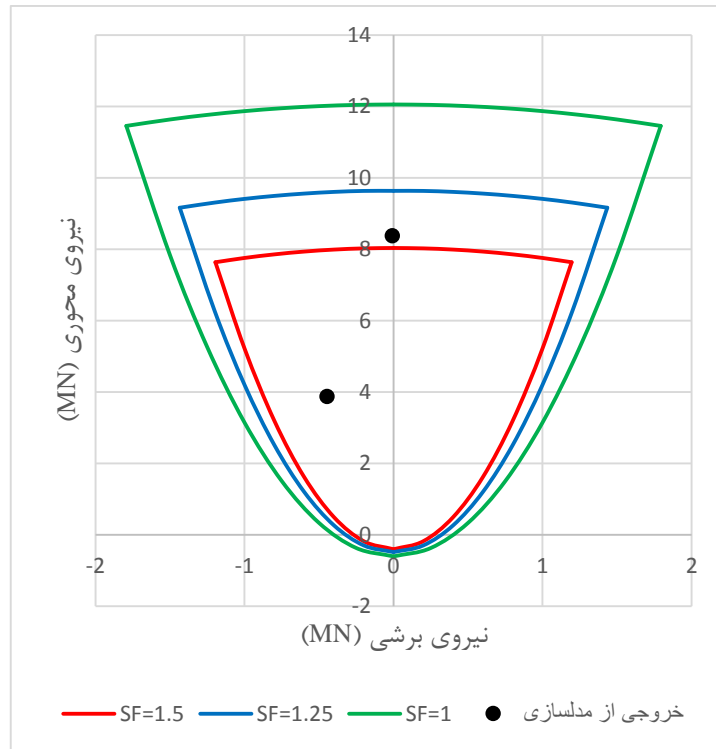
ضخامت های ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۱۰ سانتی متر به ترتیب در شکل های ۴-۲۷ تا ۴-۲۹ ترسیم شده است.



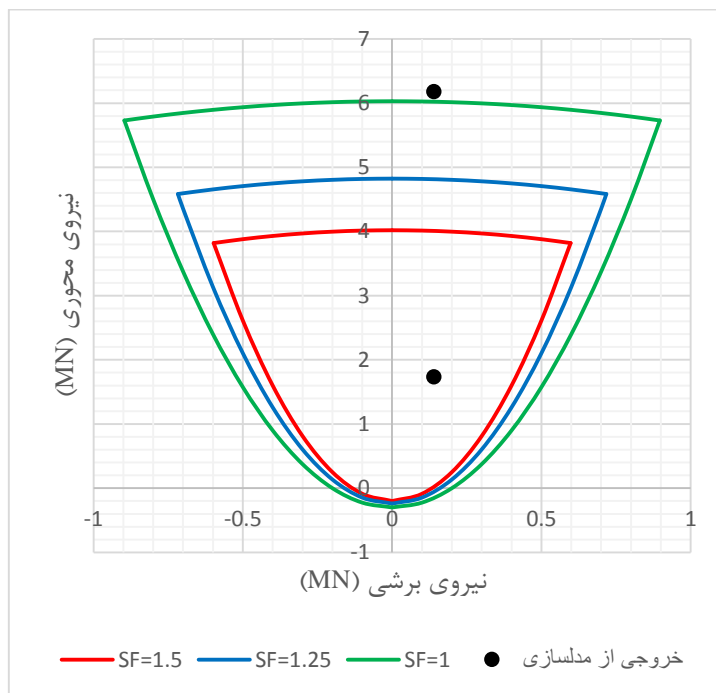
شکل ۴-۲۶ توزیع نیروی برشی بر پوشش ۳۰ سانتیمتری توسط Plaxis



شکل ۴-۲۷ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی برای بتن الیافی با ضخامت ۳۰ سانتی متر



شکل ۲۸-۴ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی برای بتن الیافی با ضخامت ۲۰ سانتی متر



شکل ۲۹-۴ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی بتن الیافی با ضخامت ۱۰ سانتی متر



با توجه به شکل ۴-۲۷ پوشش بتن الیافی در نظر گرفته شده با ضخامت ۳۰ سانتی متر برای تونل دسترسی سرزه، با ضریب ایمنی بالای ۱/۵ پایدار می‌باشد. به عبارتی حداکثر نیروهای محوری و نیروی برشی اعمال شده به پوشش ۳۰ سانتی متری به اندازه بیش از ۱/۵ برابر کمتر از مقاومت پوشش است. همچنین با توجه به شکل ۴-۲۸ پوشش بتن الیافی در نظر گرفته شده با ضخامت ۲۰ سانتی متر برای تونل دسترسی سرزه با ضریب ایمنی کمتر از ۱/۵ و بالای ۱/۲۵ پایدار است. با توجه به شکل ۴-۲۹ پوشش بتن الیافی در نظر گرفته شده با ضخامت ۱۰ سانتی متر برای تونل دسترسی سرزه ناپایدار بوده و حداکثر نیروی محوری و برشی اعمال شده به پوشش به ترتیب بیشتر از مقاومت تک‌محوری و مقاومت برشی بتن الیافی بوده که در پی آن ناپایداری پوشش را به همراه خواهد داشت.

#### ۴-۸- جمع‌بندی

در این فصل در ابتدا به معرفی و کاربرد روش های عددی در مهندسی سنگ پرداخته شده است. سپس با مدل‌سازی های انجام شده در مسیر تونل به شناسایی مقطع بحرانی و مدل‌سازی این مقطع بحرانی با نرم افزار  $FLAC^{2D}$  پرداخته شده است. در ادامه با مدل‌سازی پوشش بتن الیافی برای تونل دسترسی سرزه، به تحلیل پایداری این پوشش اشاره شده است. با توجه به ترسیم نمودار های ظرفیت باربری برای پوشش بتن الیافی در ضخامت های ۳۰، ۲۰ و ۱۰ سانتی متر مشاهده شده که پوشش ۳۰ سانتی متری از بتن الیافی قادر به تحمل نیروهای محوری، برشی و ممان های خمشی اعمال شده از محیط اطراف با ضریب ایمنی بالای ۱/۵ است؛ همچنین پوشش ۲۰ سانتی متری از بتن الیافی قادر به تحمل نیروهای محوری، برشی و ممان های خمشی اعمال شده از محیط اطراف با ضریب ۱ تا ۱/۲۵ است. پوشش ۱۰ سانتی متری از بتن الیافی به هیچ عنوان قادر به تحمل نیروهای محوری، برشی و ممان های خمشی وارده از محیط اطراف نبوده و دارای ضریب ایمنی کمتر از ۱ است.

با توجه به اینکه مقدار ضریب ایمنی شکست  $1/5$  برای پوشش در تونل‌ها در نظر گرفته می‌شود؛

بنابراین پوشش بتن الیافی با ضخامت  $30$  سانتی‌متر می‌تواند برای تونل دسترسی سرزه به کار گرفته

شده است.

## فصل پنجم

مدل سازی و تحلیل عددی توپل

دستری سرزده با پوشش بتن درجا

## ۵-۱- مقدمه

بتن‌ریزی درجا به عنوان روشی مرسوم برای پوشش در تونل‌های مدفون به کار گرفته می‌شود. در روش بتن‌ریزی درجا پس از عملیات آرماتوربندی، نصب قالب انجام می‌گیرد و سپس بتن‌ریزی انجام می‌شود. در فصل جاری همانند فصل چهارم به دلیل پیچیدگی مساله از روش عددی و نرم افزار  $FLAC^{2D}$  در تحلیل پوشش بتن‌ریزی درجا استفاده شده است. از آنجایی که بتن‌ریزی درجا به عنوان پوشش مرکب شناخته می‌شود از روش مقطع معادل، در تعیین پارامترهای بتن‌ریزی درجا استفاده شده است. در ادامه پایداری پوشش های بتن درجا با استفاده از نمودارهای ظرفیت باربری تحلیل و بررسی شده است.

## ۵-۲- مدل سازی عددی پوشش های بتنی درجا

مطابق با بخش های ۴-۵-۱ تا ۴-۵-۶، حل تعادل و حفاری تونل تا قبل از سیستم نگهداری انجام شده است. حال برای نصب سیستم نگهداری پوشش بتنی درجا از المان پوسته<sup>۱</sup> (لایندر) در نرم افزار  $FLAC^{2D}$  استفاده شده است. پارامترهای ورودی برای المان پوسته عبارتست از: مدول یانگ، سطح مقطع، ضخامت و ممان اینرسی<sup>۲</sup>. مقادیر ورودی برای پارامترهای ذکر شده در پوشش مرکب با استفاده از رویکرد مقطع معادل<sup>۳</sup> محاسبه شده است.

## ۵-۲-۱- رویکرد مقطع معادل

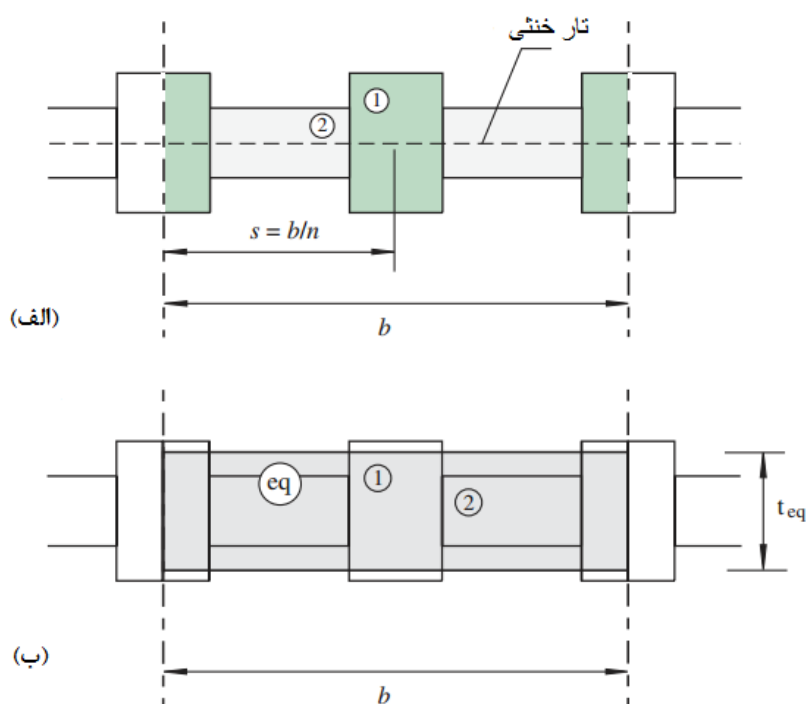
اکثر نرم افزار عددی در مدل سازی پوشش تونل، فقط یک مقدار برای هر یک از پارامترهای ورودی المان پوشش می‌گیرند که نرم افزار  $FLAC$  نیز از این قضیه مستثنی نیست. از این رو برای به دست آوردن چهار پارامتر ممان اینرسی، مدول یانگ، سطح مقطع و ضخامت المان پوسته از معادلات حاکم در رویکرد "مقطع معادل" استفاده می‌شود. رفتار لایه نگهدارنده تونل که مقطع آن متشکل از دو ماده

<sup>۱</sup> Liner

<sup>۲</sup> Equivalent Section Approach

<sup>۳</sup> Moment of Inertia

مختلف است (به عنوان مثال شاتکریت و قاب مشبک) بر اساس تئوری ارتجاعی پوسته‌ها و رفتار تیرهای منحنی به شکل ۱-۵ خواهد بود. این شکل نشان‌دهنده ترکیب دو ماده مختلف برای استفاده از این روش است. این مقطع نشان‌دهنده لایه نگهدارنده به عرض  $b$ ، شامل  $n$  واحد از ماده "۱" و  $n$  واحد از ماده "۲" می‌باشد. هر یک از واحدهای "۱" و "۲" با تعاریفی برای ضرایب فشار به ترتیب  $D_1$  و  $D_2$  و ضرایب انعطاف پذیری به ترتیب  $K_1$  و  $K_2$  نشان داده شده‌اند. در به دست آوردن این روابط از فرض تقارن نسبت به محور مشترک (محور خنثی مقطع) استفاده شده است [۳۵].



شکل ۱-۵ (الف) نمایش شماتیک یک مقطع از لایه نگهدارنده شامل مواد مختلف ۱ و ۲، (ب) مقطع معادل برای لایه مرکب (کامپوزیتی) [۳۵].

ضرایب مقادیر فشاری و انعطاف‌پذیری در حالت کرنش صفحه‌ای با رابطه‌های (۱-۵) و (۲-۵) محاسبه می‌شود.

$$D = \frac{EA}{1 - \nu^2} \quad (1-5)$$

$$K = \frac{EI}{1 - \nu^2} \quad (2-5)$$

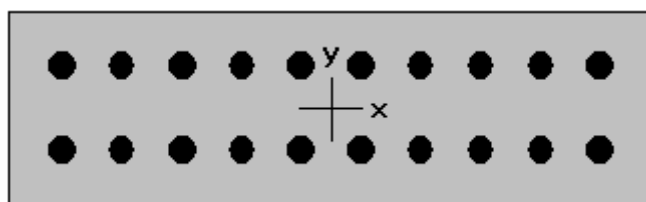
در این روابط  $E$  مدول الاستیسیته،  $A$  مساحت سطح مقطع،  $I$  ممان اینرسی مقطع،  $\nu$  ضریب پواسون است.

در واقع شکل ۱۵-۵ (ب) مقطع معادلی از شکل ۱۵-۵ (الف) را نشان داده است که دارای ضخامت معادل  $t_{eq}$  و عرض  $b$  است. مقدار ضخامت معادل و مدول الاستیسیته معادل از روابط (۳-۵) و (۴-۵) قابل محاسبه است.

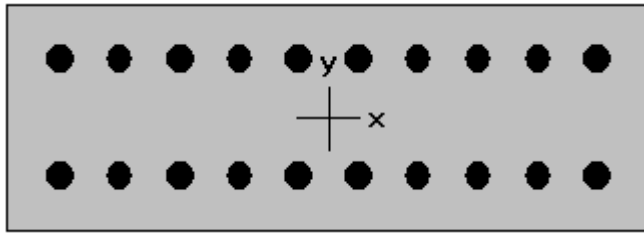
$$t_{eq} = \sqrt{12 \frac{K_1 + K_2}{D_1 + D_2}} \quad (۳-۵)$$

$$E_{eq} = \sqrt{12 \frac{K_1 + K_2}{D_1 + D_2}} \quad (۴-۵)$$

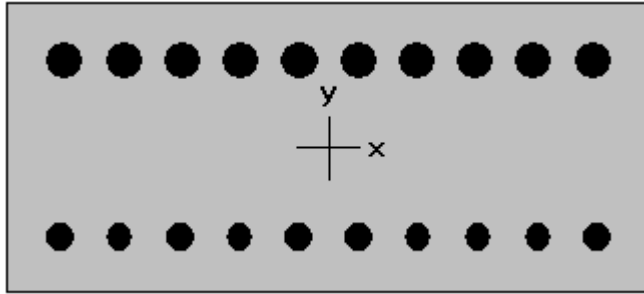
در شکل های ۲-۵ تا ۴-۵ به ترتیب مقطع هایی از پوشش بتن نهایی در نظر گرفته شده، در سه ضخامت متفاوت نشان داده شده است. قابل ذکر است که خصوصیات مقاومتی، ضخامت و قطر و آرایش میلگردها بنا به نظر مشاور در نظر گرفته شده است.



شکل ۲-۵ مقطع در نظر گرفته برای پوشش بتن درجا با ضخامت ۳۰ سانتی متر



شکل ۳-۵ پوشش در نظر گرفته برای پوشش بتن درجا با ضخامت ۳۵ سانتی متر



شکل ۴-۵ پوشش در نظر گرفته شده برای پوشش بتن درجا با ضخامت ۴۵ سانتی متر

مشخصات مصالح پوشش های در نظر گرفته شده در شکل های ۲-۵ تا ۴-۵ در جدول ۱-۵ بیان شده است. در پوشش ۳۰ سانتیمتری از بتن درجا ۲۰ عدد آرماتور شماره ۱۲ با فواصل ۱۰ سانتی متر از هم با چگالی ۶۱ کیلوگرم در متر مکعب بکار برده شده است. در پوشش ۳۵ سانتیمتری از بتن درجا ۲۰ عدد آرماتور شماره ۱۴ با فواصل ۱۰ سانتی متر از هم با چگالی ۶۹ کیلوگرم در متر مکعب بکار برده شده است. همچنین در پوشش ۴۵ سانتی متری دو ردیف آرماتور که در بخش داخلی ۱۰ عدد آرماتور ۱۸ و در بخش بیرونی ۱۰ عدد آرماتور ۱۶ با چگالی ۶۴ کیلوگرم در متر مکعب به کار برده شده است. مشخصات این پوشش ها با توجه به رویکرد مقطع معادل در جدول های ۲-۵ تا ۴-۵ بیان شده است. پوشش های در نظر گرفته شده در شکل های ۲-۵ تا ۴-۵ به عنوان پوشش نهایی برای تونل دسترسی سرزه مدل سازی شده و پایداری آن ها تحلیل و مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۵-۱ مشخصات مصالح در نظر گرفته شده برای پوشش های بتنی

مشخصه	علامت	مقدار	واحد
مقاومت اسمی بتن	$f_{ck}$	۵۰	$MN/m^2$
مقاومت کششی بتن	$f_{ct}$	۳/۵	$MN/m^2$
وزن مخصوص بتن	$Y_c$	۲۳۰۰	$kg/m^3$
مدول الاستیسیته بتن	$E_c$	۳/۵ e ۵	$kg/cm^2$
مدول الاستیسیته فولاد	$E_s$	۲e۶	$kg/cm^2$
مقاومت تسلیم فولاد	$f_y$	۴۰۰۰	$kg/cm^2$

جدول ۵-۲ مقادیر پارامترهای بدست آمده برای پوشش بتنی درجا با ضخامت ۳۰ سانتی متر با استفاده از رویکرد

مقطع معادل

پارامتر	علامت	مقدار	واحد
مساحت سطح مقطع	A	۰/۲۹	$m^2$
ممان اینرسی	I	۰/۰۰۲۰۳۲	$m^4$
ضخامت مقطع معادل	$t_{eq}$	۰/۲۹	m
مدول یانگ مقطع معادل	$E_{eq}$	۴۰/۹۲	GPa
مدول پواسون	$\nu$	۰/۲	-

جدول ۵-۳ مقادیر پارامترهای بدست آمده برای پوشش بتنی درجا با ضخامت ۳۵ سانتی متر با استفاده از رویکرد

مقطع معادل

پارامتر	علامت	مقدار	واحد
مساحت سطح مقطع	A	۰/۳۴	$m^2$
ممان اینرسی	I	۰/۰۰۳۲۷۵	$m^4$
ضخامت مقطع معادل	$t_{eq}$	۰/۳۴	m
مدول یانگ مقطع معادل	$E_{eq}$	۴۰/۰۱	GPa
مدول پواسون	$\nu$	۰/۲	-



جدول ۴-۵ مقادیر پارامترهای بدست آمده برای پوشش بتنی درجا با ضخامت ۴۵ سانتی متر با استفاده از رویکرد

مقطع معادل

پارامتر	علامت	مقدار	واحد
مساحت سطح مقطع	A	۰/۴۴	$m^2$
ممان اینرسی	I	۰/۰۰۷۰۹۹	$m^4$
ضخامت مقطع معادل	$t_{eq}$	۰/۴۴	m
مدول یانگ مقطع معادل	$E_{eq}$	۳۹/۳	GPa
مدول پواسون	$\nu$	۰/۲	-

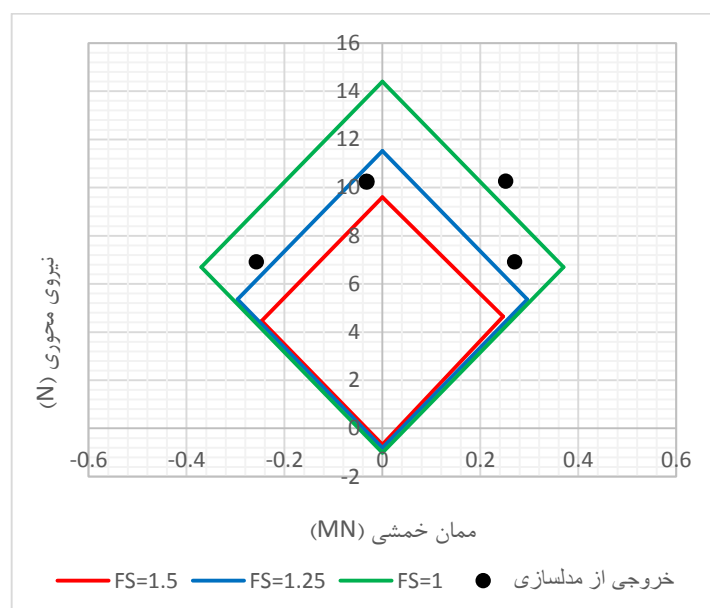
### ۵-۳- تحلیل پایداری پوشش بتن ریزی درجا

برای تحلیل پوشش بتن ریزی درجا، مشابه پوشش بتن الیافی از نمودارهای ظرفیت باربری استفاده شده است. با توجه به فصل قبل نمودارهای اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی و اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی برای پوشش بتن ریزی درجا ترسیم و حداکثر نیروها و ممان خمشی وارد شده به این پوشش از نرم افزار  $FLAC^{2D}$  استخراج شده است. مقادیر حداکثری نیروی محوری، ممان خمشی و نیروی برشی اعمال شده به پوشش بتن ریزی درجا با ضخامت‌های ۳۰، ۳۵ و ۴۵ سانتی متر حاصل از مدلسازی عددی در جدول ۵-۵ نشان داده شده است. از این رو با توجه به روابط (۴-۱۲) تا (۴-۱۴) (فصل چهارم) نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی برای پوشش های بتنی درجای در نظر گرفته شده با ضریب ایمنی های ۱/۵، ۱/۲۵ و ۱ در شکل های ۵-۵ تا ۵-۷ ترسیم شده است.

جدول ۵-۵ مقادیر حداکثری نیروی محوری، ممان خمشی و نیروی برشی وارده بر پوشش بتن ریزی درجا حاصل از

مدلسازی عددی

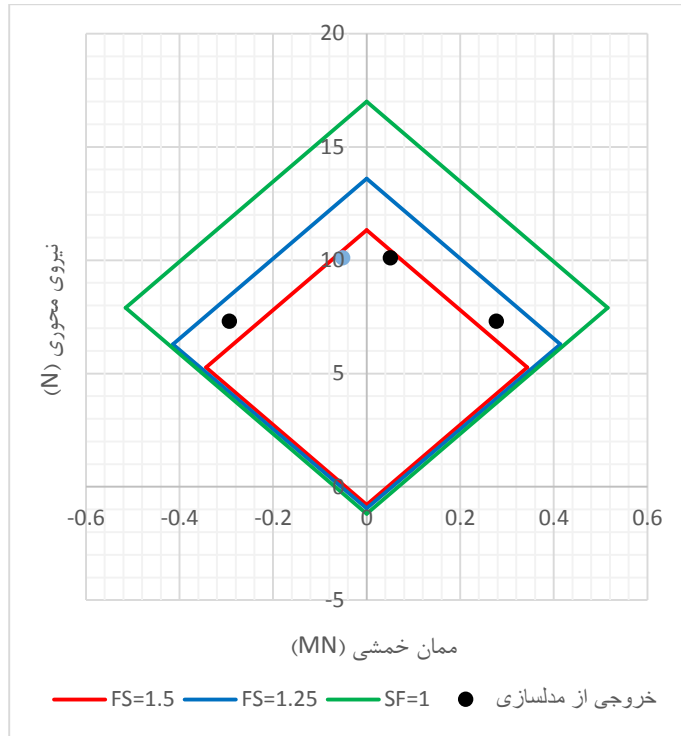
ردیف	ضخامت (cm)	مقدار حداکثر نیروی محوری (N)	مقدار حداکثر ممان خمشی (N)	مقدار حداکثر نیروی برشی (N)
۱	۳۰	۱۰۲۷۰۰۰۰	۲۶۹۶۱۰	-۸۰۰۸۰۰
۲	۳۵	۱۰۱۱۰۰۰۰	-۲۹۳۵۰۰	-۹۹۰۹۰۰
۳	۴۵	۱۰۸۳۰۰۰۰	-۴۷۰۰۲۰	-۱۳۹۲۰۰۰



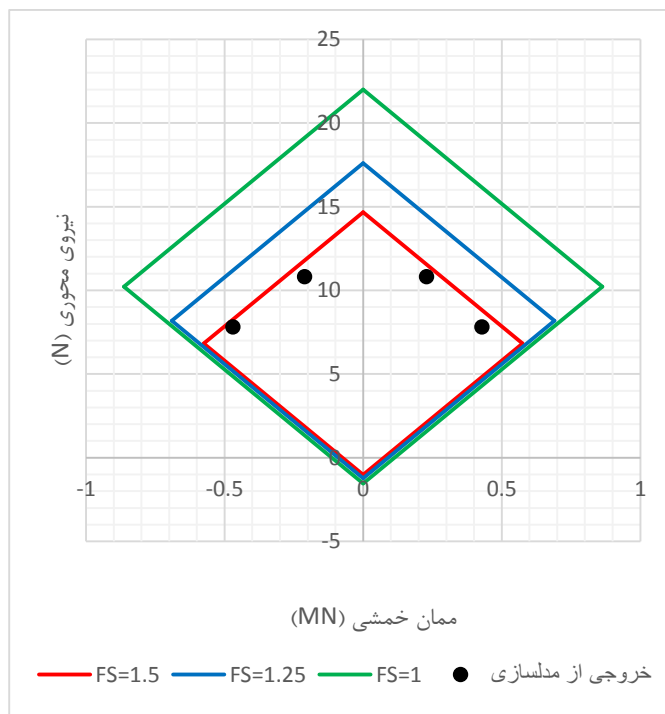
شکل ۵-۵ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی مربوط به بتن ریزی درجا با ضخامت ۳۰ سانتی متر

با توجه به شکل ۵-۵ پوشش بتن ریزی در نظر گرفته شده با ضخامت ۳۰ سانتی متر برای تونل دسترسی سرزه ناپایدار بوده و حداکثر ممان خمشی اعمال شده به پوشش بیشتر از حد تحمل ممان خمشی بتن بوده و ناپایداری را به همراه خواهد داشت. همچنین با توجه به شکل ۵-۶ پوشش بتن درجای در نظر گرفته شده با ضخامت ۳۵ سانتی متر برای تونل دسترسی سرزه با ضریب ایمنی کمتر از ۱/۵ و بالای ۱/۲۵ پایدار است. با توجه به شکل ۵-۷ پوشش بتن درجای در نظر گرفته شده با ضخامت ۴۵ سانتی متر برای تونل دسترسی سرزه، با ضریب ایمنی بالای ۱/۵ پایدار می باشد. به عبارتی

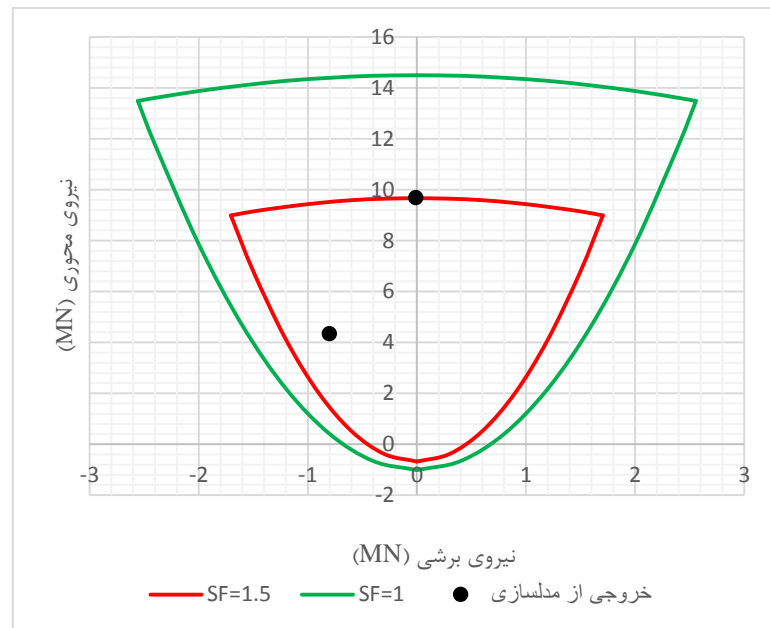
حداکثر نیروهای محوری و ممان خمشی اعمال شده به پوشش ۴۵ سانتی متری به اندازه بیش از ۱/۵ برابر کمتر از مقاومت پوشش است.



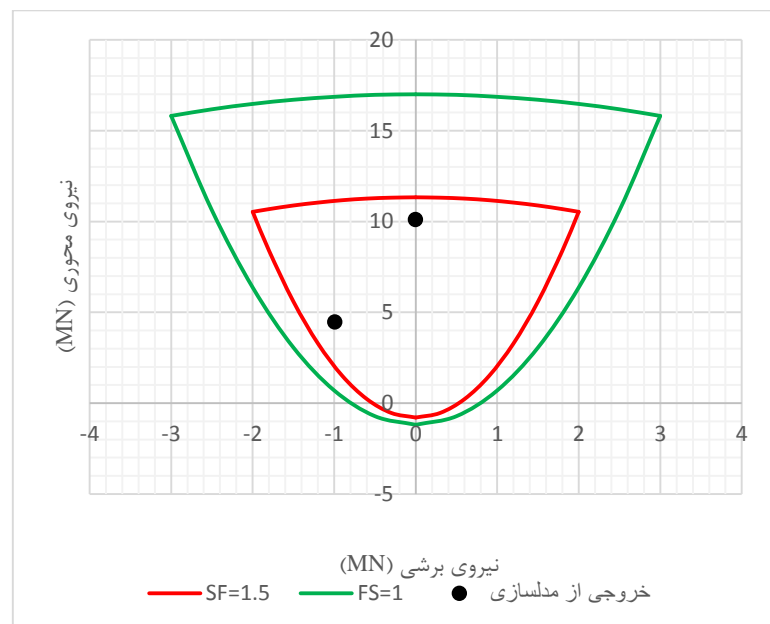
شکل ۵-۶ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی مربوط به بتن ریزی درجا با ضخامت ۳۵



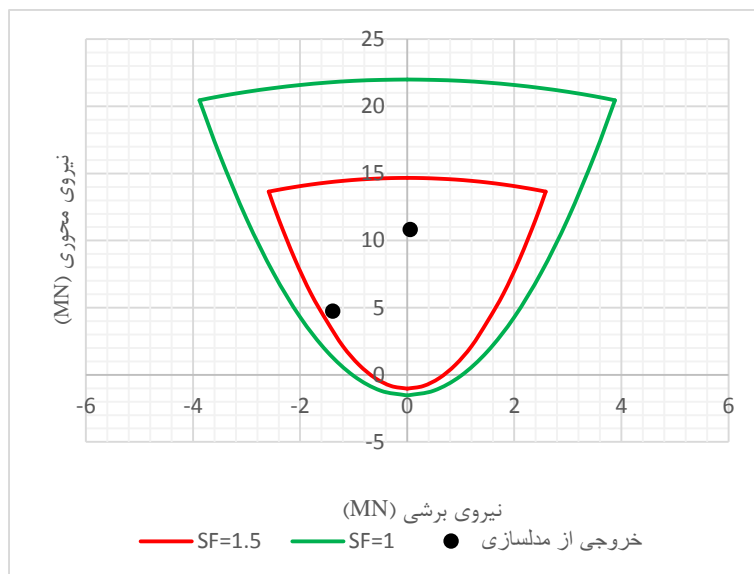
شکل ۷-۵ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - ممان خمشی مربوط به بتن‌ریزی درجا با ضخامت ۴۵ سانتی متر همچنین با توجه به روابط (۱۹-۴) تا (۲۱-۴) (فصل چهارم)، نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی برای ضخامت‌های در نظر گرفته شده از بتن درجا در شکل ۸-۵ تا ۱۰-۵ ترسیم و نیروهای خروجی از مدل‌سازی نیز مشخص شده است.



شکل ۸-۵ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی مربوط به پوشش بتنی درجا با ضخامت ۳۰ سانتی متر



شکل ۹-۵ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی مربوط به پوشش بتنی درجا با ضخامت ۳۵ سانتی متر



شکل ۵-۱۰ نمودار اندرکنشی نیروی محوری - نیروی برشی مربوط به پوشش بتنی درجا با ضخامت ۴۵ سانتی متر با توجه به شکل ۵-۸ پوشش بتن ریزی درجای در نظر گرفته شده با ضخامت ۳۰ سانتی متر برای تونل دسترسی سرزه با ضریب ایمنی ۱/۵ تقریباً ناپایدار بوده و حداکثر نیروی برشی اعمال شده به پوشش کمی بیشتر از حد تحمل نیروی برشی بتن بوده و ناپایداری را به همراه خواهد داشت. همچنین با توجه به شکل ۵-۹ پوشش بتن درجای در نظر گرفته شده با ضخامت ۳۵ سانتی متر برای تونل دسترسی سرزه با ضریب ایمنی بالای ۱/۵ پایدار است. با توجه به شکل ۵-۱۰ پوشش بتن درجای در نظر گرفته شده با ضخامت ۴۵ سانتی متر برای تونل دسترسی سرزه، با ضریب ایمنی بالای ۱/۵ پایدار است.

#### ۴-۵ - جمع بندی

در این فصل به مدل سازی پوشش بتن ریزی درجا مشابه با بتن پاشی الیافی برای تونل سرزه پرداخته شده است. در روند مدل سازی انجام شده سه نوع بتن ریزی درجای مسلح به آرماتور با ضخامت های ۴۵، ۳۵ و ۳۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. با توجه به مدل سازی های انجام شده و نمودارهای ظرفیت باربری ترسیم شده، هر یک از پوشش ها به طور مجزا تحلیل پایداری شده است. با

توجه به نتایج به دست آمده پوشش بتن‌ریزی درجا در ضخامت ۴۵ سانتی متر و مسلح به آرماتور

شماره ۱۸ پایداری تونل مذکور را تامین می نماید.

## فصل ششم

مقایسه فنی و هزینه ای پوشش پاشیده

بتن الیافی و پوشش بتن ریزی درجا

## ۶-۱- مقدمه

با توجه به گسترش نیازهای بشری به فضا و حفریات زیرزمینی، توجه به طراحی و احداث این زیرساخت‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از اصلی‌ترین و شاید اساسی‌ترین این طراحی‌ها، بررسی‌های فنی اقتصادی طرح است. از این رو لازم است چالش‌های رقابتی بین طرح‌های مختلف بررسی شود و طرح برتر برای اجرا عملی شود.

با توجه به مزایا و محدودیت‌های ذکر شده برای هریک از سیستم‌های نگهداری پوشش بتن پاشیده الیافی و بتن‌ریزی درجا، در این فصل به بررسی فنی اقتصادی این دو طرح در سیستم تونل‌سازی کشور پرداخته شده است.

## ۶-۲- ملاحظات فنی

معیارهای مورد بررسی در ملاحظات فنی عبارتند از: طول عمر و مقاومت در برابر عوامل محیطی، طراحی، تجهیزات مورد استفاده و نیروی انسانی.

### ۶-۲-۱- طول عمر و مقاومت در برابر عوامل محیطی

از آنجا که الیاف فولادی در جسم بتن به صورت سه بعدی و به بیانی دیگر در بعدهای مختلف پراکنده شده است، در صورت تشکیل یک ریز ترک، الیاف در جهات مختلف اتصالاتی را به وجود می‌آورد و از گسترش ترک جلوگیری می‌کند. همچنین در قیاس با بتن مسلح شده با آرماتور، الیاف به‌طور کامل در بتن ادغام شده و در برابر سایش، تورق و هوازدهی مقاومت بالاتری از خود نشان می‌دهد [۷]. از این رو بتن پاشیده الیافی نسبت به بتن‌ریزی درجا از طول عمر بیشتری برخوردار است.

### ۶-۲-۲- طراحی

با توجه به اینکه در مبحث طراحی بتن درجا، تئوری و راهکارهایی جهت تعیین حدود مقاومتی بتن وجود دارد از این رو به انجام آزمایش‌های کمتری برای تعیین پارامترهای مقاومتی است. در صورتی



که در مبحث مربوط به طراحی بتن ییافی، لازم است برای تعیین پارامترهای مقاومتی بتن ییافی آزمون‌هایی تهیه و آزمایش‌هایی بر روی این آزمون‌ها انجام شود. از این رو اگر بتن ییافی مورد استفاده در طراحی از قبل مورد آزمایش‌های مقاومتی قرار نگرفته باشد لازم است برای تعیین محدوده مقاومتی مورد بررسی قرار گیرد. از طرفی دیگر با توجه به این که بتن ییافی داده‌ای همگن محسوب می‌شود در طراحی‌ها پارامترهای بدست آمده از آزمایش‌های به‌طور مستقیم در فرایند دخیل می‌شود. در صورتی که در بتن مسلح به آرماتور (بتن‌ریزی درجا) برای همگن‌سازی در مدل‌سازی عددی راه‌کارهایی برای معادل‌سازی انجام می‌شود.

#### ۴-۲-۶- تجهیزات مورد نیاز

به‌طور خلاصه تجهیزات مورد نیاز برای اجرای پوشش بتن‌ریزی درجا و پوشش بتن پاشیده ییافی با توجه به کارهای اجرا شده و اجرایی فعلی در تونل‌های انحراف آب سد پارسیان و ایستگاه توحید خط ۷ به ترتیب به صورت جداول ۱-۶ و ۲-۶ برآورد شده است.

جدول ۱-۶ تجهیزات مورد نیاز برای اجرای یک پوشش بتن‌ریزی درجا

ردیف	شرح	واحد	مقدار
۱	دوربین نقشه‌برداری	ست	۱
۲	خم آرماتور	دستگاه	۱
۳	برش آرماتور	دستگاه	۱
۴	جرثقیل ۵ تن	دستگاه	۱
۵	پمپ بتن (به همراه لوله و اتصالات)	ست	۱
۶	تراک میکسر	دستگاه	۱
۷	بچینگ پلانت	دستگاه	۱
۸	قالب هیدرولیک	دستگاه	۱
۹	قالب (تخته قالب بندی چوبی و گوه)	مترمربع	-
۱۰	اره عمود بر	دستگاه	۱
۱۱	لودر	دستگاه ساعت	۱

همان‌طور که در جداول ۶-۱ و ۶-۲ ملاحظه می‌شود، تجهیزات مورد نیاز برای اجرای پوشش بتن ریزی درجا در مقایسه با اجرای پوشش بتن الیافی بسیار بیشتر بوده و در ارتباط با آن هزینه‌های اولیه، زمان و نیاز به زیر ساخت‌ها در روش بتن ریزی درجا در مقایسه با بتن پاشیده الیافی بسیار زیاد است.

جدول ۶-۲ تجهیزات مورد نیاز برای اجرای بتن پاشیده الیافی

ردیف	شرح	واحد	مقدار
۱	دستگاه بتن پاش (به همراه لوله و اتصالات)	دستگاه	۱
۲	کمپرسور	دستگاه	۱
۳	بالابر (خرک)	دستگاه	۱

#### ۶-۲-۵- منابع انسانی

با توجه به اینکه هریک از تجهیزات مورد استفاده نیاز به تعدادی نیروی انسانی دارد، از این رو در جداول ۶-۳ و ۶-۴ به ترتیب نیروهای انسانی مورد نیاز در اجرای بتن‌ریزی درجا و پوشش بتن پاشیده الیافی بیان شده است.

جدول ۶-۳ منابع انسانی مورد نیاز در اجرای بتن‌ریزی درجا

ردیف	شرح	واحد	مقدار
۱	نقشه‌بردار	نفر ساعت	۲
۲	کمک نقشه‌بردار	نفر ساعت	۲
۳	آرماتوربند	نفر	۵
۴	خم برش‌کار	نفر ساعت	۱۰
۵	راننده جرثقیل	نفر ساعت	۴
۶	قالب بند ماهر	نفر	۲
۷	کارگر قالب بند	نفر	۲
۸	کارگر بتن‌ریزی	نفر	۳
۹	کارگر ساده	نفر	۲
۱۰	اپراتور پمپ بتن	نفر	۱
۱۱	راننده تراک میکسر	نفر	۴
۱۲	اپراتور بچینگ پلانت	نفر	۲
۱۳	مجموع	نفر	۳۹

جدول ۴-۶ منابع انسانی مورد نیاز برای اجرای بتن پاشیده الیافی

ردیف	شرح	واحد	مقدار
۱	اپراتور نازل	نفر ساعت	۱
۲	کارگر ساده	نفر ساعت	۴
۳	مجموع	نفر ساعت	۵

چنانچه در جداول ۳-۶ و ۴-۶ بیان شده است با حذف عملیات آرماتور بندی و قالب بندی، منابع انسانی مورد نیاز برای اجرای بتن پاشیده الیافی بسیار کمتر از منابع انسانی مورد نیاز برای اجرای بتن ریزی درجا است. بدیهی است اجرای بتن الیافی از این رو که از درصد مکانیزاسیون بالاتری برخوردار است نیاز به نیروی انسانی کمتری دارد.

### ۳-۶- عوامل محیط زیستی

با توجه به تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از ضایعات فلزی حاصل از کارگاه‌های جوشکاری و تراشکاری به عنوان الیاف فلزی در بتن الیافی، می‌توان عنوان کرد که استفاده از بتن الیافی به عنوان بازیافت ضایعات فلزی، نقش مهمی را ایفا کند. علیرغم اینکه امروز در دنیا، انواع بسیار متنوعی از الیاف در بتن به کار برده می‌شود، در ایران هنوز الیاف فولادی مناسبی برای تهیه بتن الیافی معرفی نشده است [۳۶].

در مقابل بتن ریزی در جای یکپارچه با تولید ضایعات فلزی حاصل از آرماتور (حدود ۵ درصد) ممکن است باعث آلودگی طبیعت می‌شود.

### ۴-۶- زمان اجرا

با توجه به حذف سیکل آرماتوربندی و قالب بندی، زمان اجرای پوشش بتن پاشیده الیافی نسبت به زمان اجرای پوشش بتن ریزی درجا به‌طور چشمگیری کاهش پیدا می‌کند. در جداول ۵-۶ و ۶-۶ زمان

اجرای بتن‌ریزی درجا و بتن پاشیده الیافی به ازای یک متر پیشروی در مسیر تونل نشان داده شده است.

جدول ۵-۶ زمان اجرای پوشش بتن‌ریزی درجا به ازای یک متر پیشروی در مسیر تونل

ردیف	شرح	واحد	مقدار
۱	آرماتوربندی کف	ساعت	۱
۲	رگلاژ کف، تمیزکاری و اجرای بتن مگر	ساعت	۳
۳	قالب بندی (سربندی) کف	دقیقه	۴۰
۴	بتن‌ریزی کف	دقیقه	۸۰
۵	زمان گیرش کف	دقیقه	۸۰
۶	بازکردن قالب کف	دقیقه	۱۵
۷	آرماتور بندی سقف	ساعت	۳
۸	استقرار قالب و سربندی قالب سقف و دیواره	ساعت	۱
۹	بتن‌ریزی سقف و دیواره	ساعت	۲
۱۰	زمان گیرش	ساعت	۳
۱۱	مجموع	ساعت	۱۷

جدول ۶-۶ زمان اجرای پوشش بتن پاشیده الیافی به ازای یک متر پیشروی در مسیر تونل

ردیف	شرح	واحد	هر سیکل	تعداد سیکل	مقدار
۱	بتن پاشی	دقیقه	۲۰	۳	۶۰
۲	فاصله زمانی بین سیکل های بتن پاشی	ساعت	۴	۲	۸
۳	مجموع	ساعت			۹

همان‌طور که در جداول ۵-۶ و ۶-۶ مشاهده شده است به ازای یک متر پیشروی در مسیر تونل، زمان اجرای بتن پاشیده الیافی در حدود ۸ ساعت نسبت به بتن‌ریزی درجا سریع‌تر انجام می‌شود. قابل ملاحظه است که این اختلاف زمانی اجرا مربوط به حذف مرحله آرماتوربندی و قالب بندی است.

## ۶-۵- هزینه اجرایی

بهای واحد تهیه مصالح و هزینه‌های مربوط به عملیات اجرایی بتن ریزی درجا با توجه به فهرست بهای راه، راه آهن و باند فرودگاه سال ۱۳۹۵ تهیه شده است. همچنین بهای واحد تهیه مصالح با توجه به فهرست بهای راه، راه آهن و باند فرودگاه و هزینه‌های مربوط به عملیات اجرایی بتن پاشیده الیافی با توجه به عملیات در حال اجرا در ایستگاه توحید خط ۷ تعیین شده است. با توجه به ضخامت ۴۵ سانتی‌متری در نظر گرفته شده برای بتن ریزی درجا و قطر ۸ متری تونل، به ازای یک متر پیشروی در مسیر تونل، میزان بتن ریزی درجا با تسلیح ۶۴ کیلوگرم فولاد در متر مکعب برابر ۵/۵ مترمکعب برآورد شده است.

هزینه عملیات اجرایی مربوط به بتن‌ریزی درجا بر اساس فهرست بهای راه، راه آهن و باند فرودگاه مربوط به سال ۹۵ محاسبه شده است.

جدول ۶-۷ هزینه اجرایی برآورد شده به ازای یک متر پوشش بتن‌ریزی درجا

ردیف	عنوان	واحد	بهای واحد (ریال)	مقدار	جمع (ریال)
۱	تهیه مصالح، ساخت بتن با شن و ماسه طبیعی یا شکسته با ۴۰۰ کیلوگرم سیمان در متر مکعب بتن	متر مکعب	۹۸۵۵۰۰	۵/۵	۵۴۲۰۲۵۰
۲	تهیه، بریدن، خم کردن و کار گذاشتن میلگرد آجدار از نوع AIII با قطر ۱۸ میلی‌متر (اضافه بهای ۱۵۴۰ ریال به ازای هر کیلوگرم در زیر سطح تراز آب)	کیلوگرم	۱۶۸۴۰	۲۴۹	۴۱۹۳۱۶۰
۳	تهیه وسایل و قالب بندی پوشش با ارتفاع بیش از ۲ متر (۱/۵ درصد اضافه بها به دلیل قالب بندی در زمین آبدار)	متر مربع	۵۶۳۸۳۲	۵/۵	۳۱۰۱۰۷۶
۴	هزینه نیروهای انسانی (۲۰ درصد اضافه بها)	نفر	۷۲۰۰۰۰		۲۸۰۸۰۰۰۰
۵	هزینه های متفرقه (روشنایی، برق و ...)	-	-		۲۰۳۹۷۲۴
۶	مجموع				۴۲۸۳۴۲۱۰

همچنین با توجه به ضخامت ۳۰ سانتی متری در نظر گرفته شده برای بتن الیافی پاشیده و قطر ۸ متری تونل، میزان بتن الیافی پاشیده به ازای یک متر پیشروی در مسیر تونل، میزان بتن الیافی با درصد تسلیح ۳۰ کیلوگرم الیاف در متر مکعب بتن برابر ۳/۷ متر مکعب برآورد شده است. در مبحث مربوط به هزینه اجرایی بتن الیافی پاشیده مقدار هزینه‌ها برای تهیه مصالح از فهرست بها و با توجه به عدم وجود فهرست بها برای عملیات اجرایی بتن پاشی، از ارقام ذکر شده در قراردادهای اجرایی کشور استفاده شده است. در این برآورد از جدول هزینه‌های اجرایی شرکت فیراد ساپرا در ایستگاه توحید خط ۷ استفاده شده است.

جدول ۶-۸ هزینه اجرایی برآورد شده به ازای یک متر پوشش بتن پاشیده الیافی

ردیف	عنوان	واحد	بهای واحد (ریال)	مقدار	جمع (ریال)
۱	تهیه مصالح، ساخت بتن با شن و ماسه طبیعی یا شکسته با ۴۰۰ کیلوگرم سیمان در متر مکعب بتن	متر مکعب	۹۸۵۵۰۰	۳/۷	۳۶۴۶۳۵۰
۲	الیاف فولادی	کیلوگرم	۵۵۰۰۰	۱۱۱	۶۱۰۵۰۰۰
۳	هزینه اجاره دستگاه شاتکریت	روز	۲۰۰۰۰۰۰	۱	۲۰۰۰۰۰۰
۴	هزینه اجاره کمپرسور	شیفت - ماه	۲۰۰۰۰۰۰	۰/۰۴	۲۳۰۰۰۰۰
۵	هزینه نیروهای انسانی (۲۰ درصد اضافه بها)	نفر	۷۲۰۰۰۰	۵	۳۸۷۰۰۰۰
۶	هزینه‌های متفرقه (روشنایی، برق و ...)	-	-		۸۹۶۰۶۷
۷	مجموع				۱۸۸۱۷۴۱۷

با توجه به جداول ۶-۷ و ۶-۸ ملاحظه می شود که با حذف عملیات مربوط به آرماتوربندی و قالب بندی و در پی آن کاهش نیروهای انسانی و تسریع در زمان اجرا، هزینه اجرایی مربوط به بتن پاشیده الیافی در مقایسه با بتن ریزی درجا به طور چشمگیری کاهش پیدا کرده است. به طوری که هزینه اجرایی بتن پاشیده الیافی به ازای یک متر پیشروی در مسیر تونل تقریباً برابر ۴۴ درصد هزینه اجرایی بتن ریزی درجا برآورد شده است.

## ۶-۵- جمع بندی

در این فصل، به مقایسه فنی اقتصادی جایگزینی پوشش بتنی درجا با پوشش پاشیده بتن ییافی پرداخته شده است. در ابتدا به قیاس ملاحظات فنی انجام شده نظیر محیط زیست، طول عمر و مقاومت در برابر عوامل بیرونی، طراحی، تجهیزات مورد نیاز اجرایی و منابع انسانی پرداخته شده است. حاصل این بررسی ها نشان داده است که بتن پاشیده ییافی از لحاظ ملاحظات فنی برتری چشمگیری نسبت به استفاده از بتن ریزی درجا دارا می باشد به طوری که به منابع انسانی و تجهیزات کمتری برای اجرا نیازمند است و در مقابل طول عمر و مقاومت بیشتری در برابر عوامل بیرونی خواهد داشت.

همچنین بتن پاشیده ییافی و بتن ریزی درجا به ازای یک متر پیشروی در طول مسیر از لحاظ زمان اجرا و هزینه اجرایی مورد بررسی قرار گرفته اند. با توجه محاسبات و بررسی های انجام شده نشان داده شده که زمان اجرای بتن پاشیده ییافی برای تونل سرزه تقریباً برابر نصف زمان اجرایی بتن ریزی درجا برای همین تونل است. همچنین هزینه اجرایی این پروژه با روش بتن پاشیده ییافی تقریباً برابر با ۴۴ درصد هزینه اجرایی با بتن ریزی درجا است.





فصل ہفتم

نتیجہ گیری و پیشہ داری

## ۷-۱- نتیجه گیری

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در انجام این تحقیق می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- با اضافه کردن الیاف فولادی قلاب‌دار به بتن به میزان ۳۰ کیلوگرم در متر مکعب، مقاومت فشاری بتن افزایش ناچیزی داشته است (حدود ۱۰ درصد). در صورتی که مقاومت کششی و خمشی ۲۸ روزه بتن به ترتیب به میزان ۹۰ و ۸۵ درصد افزایش داشته است. همچنین اضافه کردن الیاف فولادی تاثیر بسیار ناچیزی بر مدول الاستیسیته بتن داشته است.

۲- با توجه به مدل‌سازی‌های انجام شده از مقطع تونل در سازندهای مختلف در مسیر تونل، با عنایت به حداکثر جابجایی‌های انجام شده در زمان حفر کامل، مشخص شده است که مقطع بحرانی مربوط به محدوده ۲۱۳۷ متر از طول تونل در سازند Ngs است. از این رو در این پایان‌نامه، مدل‌سازی‌های انجام گرفته مربوط به این مقطع بحرانی است.

۳- با مدل‌سازی پوشش بتن الیافی برای تونل دسترسی سرزه، به تحلیل پایداری این پوشش در ضخامت‌های مختلف اشاره شده است. با توجه به ترسیم نمودارهای ظرفیت باربری برای پوشش بتن الیافی در ضخامت‌های ۳۰، ۲۰ و ۱۰ سانتی‌متر مشاهده شده که پوشش ۳۰ سانتی‌متری از بتن الیافی قادر به تحمل نیروهای محوری، برشی و ممان‌های خمشی اعمال شده از محیط اطراف با ضریب ایمنی بالای ۱/۵ است. همچنین پوشش ۲۰ سانتی‌متری از بتن الیافی قادر به تحمل نیروهای محوری، برشی و ممان‌های خمشی اعمال شده از محیط اطراف با ضریب ۱ تا ۱/۲۵ است. پوشش ۱۰ سانتی‌متری از بتن الیافی به هیچ عنوان قادر به تحمل نیروهای محوری، برشی و ممان‌های خمشی وارده از محیط اطراف نبوده و دارای ضریب ایمنی کمتر از ۱ است.

۴- در روند مدل‌سازی انجام شده برای پوشش بتی درجا، سه نوع پوشش مسلح به آرماتور با ضخامت‌های ۴۵، ۳۵ و ۳۰ سانتی‌متر با پیشنهاد مشاور در نظر گرفته شده است. با توجه به مدل‌سازی‌های انجام شده و نمودارهای ظرفیت باربری ترسیم شده، هر یک از پوشش‌ها به‌طور مجزا

تحلیل پایداری شده است. با توجه به نتایج به دست آمده پوشش بتن ریزی درجا در ضخامت ۴۵ سانتی متر ضریب ایمنی بالای ۱/۵ پایداری تونل مذکور را تامین می نماید. ضخامت های ۳۰ و ۳۵ از همین پوشش دارای ضریب ایمنی کمتر از ۱/۵ بوده و برای پوشش تونل نامناسب است.

۵- با توجه به بررسی های فنی اقتصادی انجام شده، بتن پاشیده الیافی از لحاظ ملاحظات فنی برتری چشمگیری نسبت به استفاده از بتن ریزی درجا برخوردار است به طوری که به تجهیزات کمتری برای اجرا نیازمند است و در مقابل نیز، طول عمر و مقاومت بیشتری در برابر عوامل بیرونی خواهد داشت.

۶- با توجه محاسبات و بررسی های انجام شده نشان داده شده که زمان اجرای بتن پاشیده الیافی برای تونل سرزده تقریباً برابر نصف زمان اجرایی بتن ریزی درجا برای همین تونل است. همچنین هزینه اجرایی این پروژه با روش بتن پاشیده الیافی تقریباً برابر با ۴۴ درصد هزینه اجرایی با بتن ریزی درجا است.

## ۲-۷- پیشنهادها

- ۱- با بکارگیری ابزاربندی مناسب و رفتارنگاری در این طرح می توان به بررسی و ارزیابی نتایج حاصل از این تحقیق با کمک نتایج ابزاردقیق پرداخت.
- ۲- با توجه به این که در این طرح جهت ترسیم و مدل سازی پوشش های بتنی از رفتار الاستیک و با روش مقطع معادل استفاده شده است. از این رو پیشنهاد می شود با توجه به رفتار پلاستیک بتن الیافی، در ترسیم نمودارهای ظرفیت باربری از مدل پلاستیک مناسب استفاده شود.
- ۳- این طرح تنها از لحاظ استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است و پیشنهاد می شود برای بررسی دقیق تر، رفتار دینامیکی و تحلیل دینامیکی سازه نیز مورد بررسی قرار گیرد.



منابع و مراجع

[۱] موسسه‌ی مهندسين مشاور ساحل، (۱۳۹۴)، گزارش زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل دسترسی سرزه.

[2] [http://www.krrw.ir/SC.php?type=component\\_sections&id=118&sid=601](http://www.krrw.ir/SC.php?type=component_sections&id=118&sid=601)

[۳] طاحونی، ش.، (۱۳۸۳)، طراحی ساختمان‌های بتن مسلح، تهران: انتشارات دانشگاه تهران، چاپ هفتم.

[۴] کیوانی، ع.، (۱۳۶۹)، اصول و تکنولوژی بتن مسلح به الیاف فولادی، انتشارات رودکی، چاپ اول.

[5] Hrynyk, T. D., & Vecchio, F. J. (2014). *Behavior of steel fiber-reinforced concrete slabs under impact load*. ACI Structural Journal, 111(5), 1213.

[6] Bekaert, (2008), *Guidance for the Design of steel-fibre-reinforced concrete*, British Concrete Society, pp 109.

[7] Laranjeira, F., Grünwald, S., Walraven, J., Blom, C., Molins, C., & Aguado, A. (2011). *Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete*. Materials and structures, 44(6), 1093-1111.

[8] Jeng, F., Lin, M. L., & Yuan, S. C. (2002). *Performance of toughness indices for steel fiber reinforced shotcrete*. Tunnelling and underground space technology, 17(1), 69-82.

[9] Leung, C. K., Lai, R., & Lee, A. Y. (2005). *Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition*. Cement and Concrete Research, 35(4), 788-795.

[10] Mashimo, H., Isago, N., Kitani, T., & Endou, T. (2006). *Effect of fiber reinforced concrete on shrinkage crack of tunnel lining*. Tunnelling and Underground Space Technology, 21(3), 382-383.

[۱۱] زمانیان، م.، صحرانورد، ح.، (۱۳۸۵)، استفاده از بتن الیافی در سیستم پوشش تک پوسته‌ای تونل‌ها، کنفرانس ملی مقاوم سازی و بهسازی ایران یادبود زلزله بم، تهران.

[12] Chiaia, B., Fantilli, A. P., & Vallini, P. (2009). *Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings*. *Engineering Structures*, 31(7), 1600-1606.

[13] Safi, M., Nasiri, E., Farjadmand, M. & Sahranavard, S.A. (2011). *Composite Macro-synthetic Fiber and Steel Reinforced Shotcrete for Final Lining*. First Asian and 9<sup>th</sup> Iranian Tunnelling symposium, Tehran, Iran.

[14] Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (2000). *Support of underground excavations in hard rock*. CRC Press.

[15] Palmström, A. (2009). *Combining the RMR, Q, and RMI classification systems*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(4), 491-492.

[16] Marinos, P., & Hoek, E. (2000). *GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation*. In *ISRM International Symposium*. International Society for Rock Mechanics.

[17] Hoek, E., & Diederichs, M. S. (2006). *Empirical estimation of rock mass modulus*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2), 203-215.

[۱۸] شرکت سایبر، (۱۳۹۳)، گزارش آزمایش‌های انجام شده بر روی بتن مسلح به الیاف فولادی زنجان، شماره گزارش: ۹۳۰۹۸۵۳

[19] Standard, B. (1881). *Testing Concrete-Part 116: Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes*. *BS, 116*, 1983.

[20] Standard, A. S. T. M. (1984). *Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens*. In *Annual Book of ASTM Standards 04.02*. American Society for Testing and Materials Philadelphia.

[21] ASTM, C. (1999). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

[۲۲] حسینی س.، (۱۳۹۳)، بررسی تأثیر حفر تونل خط هفت متروی تهران بر پایداری تونل ابوزر در محل تقاطع غیر هم سطح دو تونل با استفاده از روش‌های عددی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[23] Jing, L. (2003). *A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modelling for rock mechanics and rock engineering*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 40(3), 283-353.

[۲۴] عبدالهی م.، (۱۳۹۳)، تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل حلزونی دسترسی به تاج سد بختیاری، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[25] Stille, H., & Palmström, A. (2008). *Ground behaviour and rock mass composition in underground excavations*. Tunnelling and Underground Space Technology, 23(1), 46-64.

[26] Zhou, P. (2014). *The Use of the Continuity Factor as a Tool to Represent Representative Elementary Volume in Rock Engineering Design*. Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology (KTH) in Sweden.

[۲۷] کرمی، م. ابره، ب.، (۱۳۹۱)، آموزش کاربردی نرم‌افزار *FLAC 3D version 4* (جهت استفاده مهندسين مکانیک سنگ، معدن، عمران و زمین‌شناسی مهندسی). اصفهان: جهاد دانشگاهی.

[۲۸] میکاییل ر.، (۱۳۸۶)، تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل راه آهن کوهین محور قزوین - رشت، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

[29] Itasca Consulting Group Inc. (2011). *FLAC Fast Lagrangian Analysis of Continu. Version 7, User's Manual*.

[30]

[https://www.rocsience.com/documents/hoek/corner/11\\_Insitu\\_and\\_induced\\_stresses](https://www.rocsience.com/documents/hoek/corner/11_Insitu_and_induced_stresses).

[31] Hudson J.A. (2005). *Engineering Properties of Rocks*. Vol 4, Lexington MA, USA, pp. 290.



[32] Carranza-Torres, C., & Fairhurst, C. (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, 15(2), 187-213.

[33] Sakurai, S. (1997). *Lessons learned from field measurements in tunnelling*. Tunnelling and underground space technology, 12(4), 453-460.

[34] Sakurai, S. (1981). *Direct strain evaluation technique in construction of underground opening*. In The 22nd US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association.

[35] Carranza-Torres, C., & Diederichs, M. (2009). *Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets*. Tunnelling and Underground Space Technology, 24(5), 506-532.

[۳۶] حدادی، ح.، پاچناری، ز.، (۱۳۹۴)، *ارزیابی و مقایسه فنی و اقتصادی کاربرد الیاف فولادی بازیافتی و صنعتی برمشخصات بتن با مقاومت بالا*، کنفرانس بین‌المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی، تهران.

[۳۷] سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، (۱۳۹۵)، *فهرست بهای واحد پایه رشته راه، راه آهن و باند فرودگاه*، شماره ۹۴/۴۴۸۹۹۲.

[۳۸] شرکت فیراد ساپرا، (۱۳۹۵)، *گزارش بتن پاشی ایستگاه مترو توحید - خط ۷*.

**Abstract:**

Generally, in constructing underground spaces especially tunnels, maintaining them is of high significance. Concrete is one of the most used materials in maintaining underground spaces due to its features such as flexibility, plasticity, cheapness and convenient transportation. In spite of this, reinforcing concrete is essential because of its low tensile strength. One of the ways to reinforce concrete is using steel fibers in it. In this thesis we have conducted feasibility study of using fiber sprayed concrete as SARZEH tunnel lining and is compared to the traditional method of in situ concrete. Based on the performed modeling in various thicknesses with Flac <sup>2D</sup> software, it is recognized that fiber sprayed concrete with thickness of 30 cm is able to provide the maintenance of the SARZEH tunnel. Moreover, due to economic and technical considerations, the fiber sprayed concrete has significant superiorities to the in situ concrete, since it requires less human resource and equipment for implementation. In contrast, it has more durability and resistance against external factors. According to the performed calculations, it is shown that duration of implementing fiber sprayed concrete for SARZEH tunnel is almost as half of the implementation time of the in situ concrete. In addition, the cost of maintaining this project with fiber sprayed concrete is almost as 44 percent of the implementing cost of in situ concrete.

**Keyword:** SARZEH Tunnel, Fiber Sprayed Concrete, In Situ Concrete, Numerical Modelling, Stability Analysis, Economic and Technical Considerations.



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics Engineering**  
**MSc Thesis in Rock Mechanics of Mining Engineering**

**Feasibility study on use of sprayed concrete as final lining**  
**(Case study: Sarzeh Tunnel)**

**By: Amin Dehghani**

**Supervisor:**

**Dr seyed Mohammad Esmail Jalali**

**Advisor:**

**Eng M. Mohammad Nejad**

**September 2016**