

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفزیک

گروه مکانیک سنگ

**ارزیابی رفتار مکانیکی پوشش بتنی تونل‌های مکانیزه تمام مقطع با استفاده از**

**روش عددی – مطالعه موردی: تونل انتقال آب چمشیر**

**جلال کرمی**

**اساتید راهنما:**

**دکتر سید محمد اسماعیل جلالی**

**دکتر سید رحمان ترابی**

**استاد مشاور:**

**مهندس محمد خسرو تاش**

**مهندس فرنوش باسلیقه**

**پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد**

**زمستان ۹۲**



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفزیک

گروه مکانیک

### پایان نامه کارشناسی ارشد آقای جلال کرمی

تحت عنوان: ارزیابی رفتار مکانیکی پوشش بتنی تونل‌های مکانیزه تمام مقطع با استفاده از روش عددی - مطالعه

موردی: تونل انتقال آب چمشیر

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد  
مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقدیم بہ ہمہ خوبان

## تقدیر و تشکر

حمد و سپاس بی‌پایان خداوند بلند مرتبه را که به من توفیق تحصیل و کسب علم عنایت نمود. اینک، که به مدد الطاف بی‌کران الهی، مقطعی از دوران تحصیل به پایان می‌رسد بر خود لازم می‌دانم از تمامی کسانی که مرا در این امر یاری دادند تشکر و قدردانی نمایم. از اساتید راهنمای عزیز جناب آقای دکتر سیدمحمد اسماعیل جلالی و آقای دکتر سید رحمان ترابی کمال تشکر و امتنان را دارم. همچنین از اساتید مشاور جناب آقای مهندس محمد خسرو تاش و آقای مهندس فرنوش باسلیقه نهایت سپاسگزاری را دارم.

از دوستان عزیزم آقایان مهندس علی بنکدار، مهندس محمد یزدانی و مهندس حامد عجم‌زاده نیز که در انجام این پژوهش مرا یاری نمودند، صمیمانه سپاسگزارم.

## تعهد نامه

اینجانب **جلال کرمی** 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 تحت عنوان: **ارزیابی**

رفتار مکانیکی پوشش بتنی تونل‌های مکانیزه تمام مقطع با استفاده از روش عددی - مطالعه موردی: تونل

انتقال آب چمشیر تحت راهنمایی آقایان دکتر سید محمد اسماعیل جلالی و دکتر سید رحمان ترابی

متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه 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

طراحی و اجرای سامانه نگهداری، از مهمترین مسایل در احداث تونل‌ها با توجه به طبیعت و

حساسیت آن‌ها است. طراحی نگهداری از مهمترین مراحل احداث فضاهای زیرزمینی است. تطابق

مناسب سامانه نگهداری به کار رفته در تونل با شرایط محیطی می‌تواند عملکرد این سامانه را افزایش دهد. یکی از روش‌های متداول برای حفر تونل، حفاری به‌وسیله ماشین‌های تمام مقطع است. یکی از مزیت‌های این روش، اجرای سامانه نگهداری دایم تونل به صورت همزمان با حفاری با استفاده از قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت) است. از آنجاکه استفاده از این قطعات پیش‌ساخته در سامانه نگهداری تونل نقش به‌سزایی را ایفا می‌کند، در نتیجه این امر مستلزم انتخاب صحیح و تحلیل بهینه سگمنت‌ها و نوع اتصال بین این سگمنت‌ها است. مطالعات صورت گرفته در زمینه تحلیل عددی رفتار پوشش تونل‌های حفاری مکانیزه تمام‌مقطع، نشان می‌دهد که اکثر پژوهشگران از مدل‌های ساده‌شده-ای استفاده کرده‌اند. از جمله مهمترین ساده‌سازی‌هایی که در این مدل‌ها استفاده شده‌است، مدل‌سازی حلقه‌ها بدون در نظر گرفتن مرز بین آن‌ها است و در اکثر موارد نیز هر حلقه به‌صورت پیوسته و بدون سگمنت‌های جداگانه مدل‌سازی شده‌است. مسلماً این مفروضات خطای زیادی در نتایج بدست‌آمده ایجاد خواهد کرد.

در این تحقیق مدل‌سازی رفتار سامانه نگهداری تونل انتقال آب چمشیر در حالت حلقه پیوسته در مقایسه با حلقه سگمنتی توسط نرم‌افزار اجزا مجزای 3DEC، صورت گرفته‌است. این نرم افزار توانایی مدل کردن محیط در حالت سه‌بعدی با در نظر گرفتن ویژگی‌های توده‌سنگ را دارد که نسبت به بررسی‌های انجام شده با مدل‌های تیر و فنر که زمین را به‌وسیله فنرهای مدل می‌کنند، واقعی‌تر است. در آنالیز نتایج بدست آمده از مدل‌سازی، افزایش میزان جابجایی‌ها در حالت سگمنتی نسبت به حلقه پیوسته نتیجه شده‌است، که بیانگر خوشبینانه بودن مدل‌سازی‌های صورت گرفته در حالت پیوسته است. همچنین مقدار تنش‌ها در حالت کلی در نگهداری سگمنتی نسبت به پیوسته کمتر بوده به جز در نواحی اتصالی که به دلیل ایجاد تمرکز تنش در این نواحی است و این تمرکز تنش و چرخش در محل اتصالات سبب آسیب‌دیدگی بتن در این نواحی شده‌است. بنابراین در نظر گرفتن اتصالات در نگهداری سگمنتی برای دستیابی به نتیجه‌ای واقعی‌تر در طراحی‌ها، امری ضروری است.

کلمات کلیدی: نگهداری سگمنتی، تاثیر اتصالات، روش عددی، تونل انتقال آب چمشیر

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: کلیات
۲	۱-۱- مقدمه



۳	۲-۱- پیشینه و ضرورت انجام تحقیق
۴	۳-۱- اهداف تحقیق
۴	۴-۱- بررسی فصول پایان نامه
۵	<b>فصل دوم: کلیاتی در مورد نگهداری سگمنتی</b>
۶	۱-۲- مقدمه
۶	۲-۲- ماشین حفاری تمام مقطع
۷	۱-۲-۲- انتخاب ماشین حفار
۸	۳-۲- بررسی سامانه نگهداری
۸	۱-۳-۲- انواع نگهداری‌ها در حالت حفاری تمام مقطع
۸	۱-۱-۳-۲- نگهداری‌های لوله‌ای
۸	۲-۱-۳-۲- نگهداری بتنی برجا
۹	۳-۱-۳-۲- نگهداری سگمنتی
۱۳	۴-۲- بررسی نگهداری بتنی سگمنتی
۱۴	۱-۴-۲- تاریخچه کاربرد پوشش‌های سگمنتی
۱۵	۲-۴-۲- طبقه‌بندی انواع سامانه پوشش‌های سگمنتی
۱۷	۳-۴-۲- نصب و پایدارسازی سگمنت
۱۷	۴-۴-۲- پارامترهای طراحی پوشش سگمنتی
۲۰	۵-۴-۲- اتصالات
۲۰	۱-۵-۴-۲- اتصالات بولتی
۲۲	۲-۵-۴-۲- اتصالات داوولی
۲۳	۶-۴-۲- تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی
۲۵	۷-۴-۲- آب‌بندی پوشش‌های سگمنتی

۲۶	۸-۴-۲- میزان رواداری هندسی .....
۲۸	۹-۴-۲- فرآیند تشکیل حلقه‌های بتنی پوشش تونل .....
۳۰	۵-۲- انواع آسیب‌های وارده به سگمنت‌های بتنی و دلایل ایجاد آنها .....
۳۰	۱-۵-۲- آسیب سگمنت .....
۳۱	۱-۱-۵-۲- طبقه‌بندی آسیب‌های سگمنت در طول ساخت .....
۳۲	۲-۱-۵-۲- آسیب‌های سگمنت پس از اجرا .....
۳۳	۶-۲- خلاصه فصل .....
۳۵	<b>فصل سوم: فرآیند طراحی نگهداری سگمنتی .....</b>
۳۶	۱-۳- مقدمه .....
۳۷	۲-۳- شرایط بارگذاری .....
۴۱	۱-۲-۳- بار مرده .....
۴۱	۲-۲-۳- بار جک‌های پیشران .....
۴۲	۳-۲-۳- بار ناشی از تزریق .....
۴۳	۴-۲-۳- بار ناشی از انبار کردن سگمنت‌ها .....
۴۴	۵-۲-۳- بار ناشی از نصب سگمنت‌ها .....
۴۴	۶-۲-۳- بار ناشی از وزن قطار .....
۴۴	۷-۲-۳- سایر نیروهای وارد بر سگمنت .....
۴۵	۳-۳- طراحی سگمنت .....
۴۶	۱-۳-۳- فرآیند طراحی .....
۴۸	۲-۳-۳- روندنمای طراحی بهینه .....
۴۹	۴-۳- اندرکنش تیر .....
۵۰	۵-۳- مدل طراحی سازه‌ای .....

۵۰	..... ۳-۵-۱- روش حل معادلات استاتیکی
۵۲	..... ۳-۵-۱- مدل پیوسته
۵۳	..... ۳-۵-۲- مدل مویرود
۵۴	..... ۳-۵-۳- مدل شولز- دودک
۵۶	..... ۳-۵-۴- مدل تیر- فنر
۶۱	..... ۳-۶-۶- بررسی اتصالات نگهداری سگمندی
۶۱	..... ۳-۶-۱- اتصالات سگمندی
۶۳	..... ۳-۶-۲- اتصالات حلقه‌ای
۶۴	..... ۳-۶-۳- رفتار اتصالات سگمندی
۶۷	..... ۳-۶-۴- رفتار اتصالات حلقه‌ای
۶۸	..... ۳-۷- خلاصه فصل
۷۱	..... فصل چهارم: زمین‌شناسی تونل انتقال آب چمشیر
۷۲	..... ۴-۱- مقدمه
۷۲	..... ۴-۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترس
۷۳	..... ۴-۳- زمین‌شناسی عمومی منطقه
۷۴	..... ۴-۴- زمین‌ریخت‌شناسی
۷۵	..... ۴-۵- چینه‌شناسی
۷۵	..... ۴-۵-۱- سازند آغا‌جاری
۷۵	..... ۴-۵-۲- سازند بختیاری
۷۶	..... ۴-۵-۳- رسوبات دامنه‌ای و واریزه‌ای
۷۷	..... ۴-۶- زمین‌ساخت
۷۷	..... ۴-۷- حفاری‌های اکتشافی مسیر تونل انتقال آب

۷۸	۸-۴- هیدروژئولوژی مسیر تونل انتقال
۷۸	۹-۴- ناپیوستگی ها
۸۰	۱۰-۴- طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ، ارزیابی پایداری
۸۰	۱-۱۰-۴- مقدمه
۸۱	۲-۱۰-۴- انواع طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ
۸۱	۳-۱۰-۴- واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل انتقال
۸۲	۴-۱۰-۴- واحد زمین‌شناسی کنگلومرایبی (CST)
۸۲	۵-۱۰-۴- واحد زمین‌شناسی ماسه‌سنگی (SST)
۸۲	۶-۱۰-۴- واحد زمین‌شناسی مارنی- گل‌سنگی (MMT)
۸۲	۱۱-۴- انتخاب روش حفاری تونل
۸۴	۱۲-۴- سامانه نگهداری تونل
۸۶	۱۳-۴- خلاصه فصل
۸۷	<b>فصل پنجم: مدل‌سازی عددی</b>
۸۸	۱-۵- مقدمه
۸۸	۲-۵- مدل‌های عددی
۸۹	۱-۲-۵- روش المان محدود
۸۹	۲-۲-۵- روش تفاضلات محدود
۸۹	۳-۲-۵- روش اجزای مرزی
۸۹	۴-۲-۵- روش اجزا مجزا
۹۰	۵-۲-۵- روش‌های ترکیبی
۹۰	۳-۵- انتخاب روش عددی مناسب
۹۱	۴-۵- معرفی نرم افزار 3DEC

۹۲	۱-۴-۵- پارامترهای مورد نیاز نرم افزار 3DEC
۹۲	۲-۴-۵- مدل های ساختاری در نرم افزار 3DEC
۹۵	۳-۴-۵- خواص درزه در 3DEC
۹۶	۵-۵- مراحل مدل سازی در نرم افزار 3DEC
۹۶	۱-۵-۵- ایجاد هندسه کلی مدل
۹۷	۲-۵-۵- تعریف خواص و مدل مشخصه رفتاری بلوک ها
۹۸	۳-۵-۵- شرایط مرزی و ذاتی
۹۹	۶-۵- تحلیل تونل بدون سامانه نگهداری
۱۰۰	۷-۵- بررسی پایداری تونل بدون نگهداری براساس کرنش ساکورایی
۱۰۱	۸-۵- تحلیل تونل با حلقه پیوسته
۱۰۴	۹-۵- تحلیل تونل با پوشش سگمندی (در نظر گرفتن اتصالات)
۱۰۶	۱-۹-۵- خواص ماده و اتصالات
۱۰۸	۱۰-۵- مقایسه رفتار سامانه نگهداری در حالت پیوسته و سگمندی
۱۰۸	۱۱-۵- مقایسه نتایج جابجایی ها در حالت حلقه پیوسته و سگمندی
۱۰۹	۱-۱۱-۵- بررسی جابجایی قائم در حالت حلقه پیوسته و سگمندی
۱۱۱	۲-۱۱-۵- بررسی جابجایی شعاعی و محوری در حالت حلقه پیوسته و سگمندی
۱۱۲	۱۲-۵- مقایسه مقدار تنش های ایجاد شده در حالت حلقه پیوسته و سگمندی
۱۱۴	۱۳-۵- خلاصه فصل
۱۱۵	<b>فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهاد</b>
۱۱۶	۱-۶- جمع بندی و نتیجه گیری
۱۱۸	فهرست منابع
۱۲۳	پیوست ها

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۳۷	شکل ۱-۳- روندنمای طراحی نگهداری سگمنتی
۳۹	شکل ۲-۳- فرآیند حفاری توسط ماشین حفار

- شکل ۳-۳- بارهایی که در طراحی مورد استفاده است. ۴۰.....
- شکل ۳-۴- نمادهای به کار رفته برای نیروی محوری، گشتاور خمشی و نیروی برشی ۴۰.....
- شکل ۳-۵- صفحه پخش کننده نیروی جکها و ترک خوردگی در سطح بتن در محل جکها ۴۱.....
- شکل ۳-۷- نیروی بوجود آمده در اثر انبار کردن سگمنت ۴۳.....
- شکل ۳-۸- گسترش وزن قطار ۴۵.....
- شکل ۳-۹- روش طراحی سگمنت به وسیله کنترل محاسبات ۴۷.....
- شکل ۳-۱۰- رابطه شماتیک بین قسمت‌های مختلف تونل زنی سپری ۴۸.....
- شکل ۳-۱۱- روندنمای طراحی سگمنت ۴۹.....
- شکل ۳-۱۲- تغییر شکل پوشش و مدل ساده اندرکنش تیر ۵۰.....
- شکل ۳-۱۳- شکل شماتیک از مدل پیوسته و مدل رینگ صفحه‌ای ۴۹.....
- شکل ۳-۱۴- مدل‌های بارگذاری قابل قبول برای روش بارگذاری مستقیم ۵۱.....
- شکل ۳-۱۵- تصویر شماتیک مدل پیوسته ۵۳.....
- شکل ۳-۱۶- نگهداری زمین توسط فنر در عمق‌های مختلف ۵۶.....
- شکل ۳-۱۷- بارهای وارد بر یک پی و فنرهای نشان دهنده زمین ۵۶.....
- شکل ۳-۱۸- مدل فنرهای الاستیک وینکلر ۵۷.....
- شکل ۳-۱۹- مدلی از روش تیر- فنر پوشش تونل تحت بارگذاری ۵۷.....
- شکل ۳-۲۰- نمایی از مولفه شعاعی و مماسی فنرها در مدل تیر- فنر ۵۸.....
- شکل ۳-۲۱- نمایی از مدل تیر- فنر برای دو حلقه پوشش سگمنتی ۵۸.....
- شکل ۳-۲۲- انواع مختلف اتصالات سگمنتی ۶۲.....
- شکل ۳-۲۳- رهاشدگی نوار آب‌بند از محل اتصالات (پروژه قمرود، ایران) ۶۳.....
- شکل ۳-۲۴- استفاده از مواد ضربه‌گیر در اتصالات نگهداری سگمنتی ۶۴.....
- شکل ۳-۲۵- گسترش تنش در اثر تغییر شکل‌های متفاوت اتصالات ۶۵.....

- شکل ۳-۲۶- مدل المان محدود از اتصالات سگمندی ..... ۶۷
- شکل ۴-۱- نقشه راهنمای راه‌های ارتباطی منطقه مورد مطالعه ..... ۷۳
- شکل ۴-۲- نمودار فراوانی ناپیوستگی‌ها، میانگین شیب و جهت شیب آن‌ها در مسیر تونل ..... ۷۹
- شکل ۵-۱- هندسه سه‌بعدی تونل انتقال آب سد چمشیر ..... ۹۷
- شکل ۵-۲- تاریخچه جابجایی در راستای قائم در نقطه (۰، ۲/۵، ۰) واقع در سقف تونل ..... ۹۹
- شکل ۵-۳- مقطع عمودی از گوه ایجاد شده در سقف تونل، نمایش بردارهای جابجایی ..... ۹۹
- شکل ۵-۴- سطوح هشدار خطر در پایداری فضاهاى زیرزمینی ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۵- هندسه پوشش تونل انتقال آب سد چمشیر با حلقه پیوسته در نرم افزار 3DEC ..... ۱۰۲
- شکل ۵-۶- تاریخچه نیروهای نامتعادل در حالت پوشش پیوسته ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۷- تاریخچه‌ی جابجایی در راستای y در نقطه (۰، ۲/۵، ۰) ، گوه پس از ۸ میلی‌متر جابجایی پایدار شده است. .... ۱۰۴
- شکل ۵-۸- هندسه پوشش تونل انتقال آب سد چمشیر با در نظر گرفتن اتصالات سگمندی و حلقه‌ای در نرم‌افزار 3DEC ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۹- تاریخچه نیروهای نامتعادل در حالت پوشش سگمندی ..... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۰- تاریخچه‌ی جابجایی در راستای y در نقطه (۰، ۲/۵، ۰) ، گوه پس از ۱۶ میلی‌متر جابجایی پایدار شده است. .... ۱۰۷
- شکل ۵-۱۱- هندسه سه بعدی تونل انتقال آب سد چمشیر ..... ۱۰۸
- شکل ۵-۱۲- محل اتصالات و مسیر انتخاب شده برای بررسی نتایج در حلقه دوم در حالت حلقه سگمندی ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۳- مقایسه جابجایی قائم (در راستای y) در حالت پیوسته و سگمندی بر محیط تونل ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۴- مقایسه جابجایی قائم (در راستای y) در حالت پیوسته و سگمندی ..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۵- مقایسه جابجایی شعاعی (در راستای x) در حالت پیوسته و سگمندی بر محیط تونل. ۱۱۱



شکل ۵-۱۶- مقایسه جابجای محوری (در راستای Z) در حالت پیوسته و سگمنتی بر محیط تونل. ۱۱۱

شکل ۵-۱۷- مقایسه تنش اصلی حداکثر در حالت پیوسته و حلقه سگمنتی ..... ۱۱۲

شکل ۵-۱۸- مقایسه حداکثر تنش برشی در حالت پیوسته و حلقه سگمنتی ..... ۱۱۳

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۱۵	جدول ۲-۱- سامانه‌های چیدمان سگمنت ..... ۱۵
۱۹	جدول ۲-۲- انواع اصلی درزها در سگمنت ..... ۱۹
۲۷	جدول ۲-۳- حداکثر خطای مجاز در ساخت قسمت‌های مختلف سگمنت ..... ۲۷

- جدول ۳-۱- انواع بارهای وارد بر پوشش نگهداری ..... ۳۸
- جدول ۴-۱- موقعیت و مشخصات گمانه‌های حفاری شده در مسیر تونل انتقال ..... ۷۷
- جدول ۴-۲- خصوصیات ناپیوستگی‌های لایه‌های ماسه‌سنگی ابتدای مسیر تونل انتقال ..... ۸۰
- جدول ۴-۳- مشخصات مقاومتی سه واحد زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل چمشیر ..... ۸۵
- جدول ۴-۴- سامانه نگهداری موقت و دائمی پیشنهادی برای تونل ..... ۸۵
- جدول ۵-۱- مدل‌های ساختاری بلوکی در 3DEC ..... ۹۳
- جدول ۵-۲- مدل‌های ساختاری درزه در 3DEC ..... ۹۴
- جدول ۵-۳- خواص فیزیکی و مکانیکی توده‌سنگ ..... ۹۷
- جدول ۵-۴- خصوصیات ناپیوستگی‌های منطقه ..... ۹۸
- جدول ۵-۵- مشخصات بتن مورد استفاده در تونل انتقال آب سد چمشیر برای مدل‌سازی در حالت حلقه پیوسته ..... ۱۰۲
- جدول ۵-۶- خصوصیات سامانه نگهداری سگمنتی مورد استفاده در تونل انتقال آب چمشیر ..... ۱۰۵

## فصل اول

### کلیات

## ۱-۱- مقدمه

طراحی و اجرای سامانه نگهداری، از مهمترین مسایل در احداث تونل‌ها با توجه به طبیعت و حساسیت آن‌ها است. تطابق مناسب سامانه نگهداری به کار رفته در تونل با شرایط محیطی می‌تواند عملکرد این سامانه را افزایش دهد. حفر تونل، وضعیت اولیه تنش در زمین را دستخوش تغییرات کرده و در اطراف تونل تمرکز تنش ایجاد می‌کند. در صورت کمتر بودن مقاومت سنگ در قیاس با تنش اعمال شده، تغییر شکل‌ها در سنگ افزایش یافته که نتیجه آن تخریب تونل خواهد بود. در این‌گونه موارد به کارگیری روش‌های ویژه حفاری و وسایل نگهداری مناسب و نصب به موقع سامانه‌های نگهداری موجبات پایداری تونل را فراهم خواهد نمود. یکی از روش‌هایی که برای حفر تونل متداول شده، حفاری با کمک ماشین‌های تمام‌مقطع است. در این زمینه تحقیقات زیادی انجام شده است، برخی از این تحقیقات نشان می‌دهد، در بسیاری از حفاری‌های زیرزمینی از این روش به عنوان بهترین روش حفاری استفاده شده است (Azadi, et al., 2010). یکی از این مزیت‌ها اجرای سامانه نگهداری دایم تونل به صورت همزمان با حفاری با استفاده از قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت) است. به‌طور کلی نگهداری تونل با استفاده از بتن با دو روش مختلف انجام می‌گیرد؛ یک روش با قالب‌بندی مقطع تونل و بتن‌ریزی درجا و دیگری استفاده از قطعات بتنی پیش‌ساخته یا سگمنت‌ها است. از آنجاکه استفاده از قطعات پیش‌ساخته در سامانه نگهداری تونل نقش بسزایی را ایفا می‌کند در نتیجه این امر مستلزم انتخاب صحیح و تحلیل بهینه سگمنت‌ها و نوع اتصال بین آن‌ها است (Ramoni, 2010).

با توجه به مطالعات صورت گرفته در زمینه تحلیل عددی رفتار پوشش تونل‌های حفاری مکانیزه تمام‌مقطع، به منظور سهولت کار، اکثر پژوهشگران از مدل‌های ساده‌شده‌ای استفاده کرده‌اند. از جمله مهمترین ساده‌سازی‌هایی که در این مدل‌ها استفاده می‌شود، مدل‌سازی حلقه‌ها بدون در نظر گرفتن اتصال بین آن‌ها است و در اکثر موارد نیز هر حلقه به صورت پیوسته و بدون سگمنت‌های جداگانه مدل‌سازی می‌شود. مسلماً این مفروضات خطای زیادی در نتایج بدست آمده ایجاد خواهد -

کرد. اتصالات موجود بین سگمنت‌های یک حلقه، اتصالات سگمنتی نامیده می‌شود و اتصالات موجود بین دو حلقه اتصالات حلقه‌ای نامیده می‌شود. در بعضی موارد برای متصل کردن سگمنت‌ها به یکدیگر و اطمینان از اندرکنش کامل آن‌ها، از یکسری بولت برای اتصال سگمنت‌ها به یکدیگر در جهت شعاعی و محوری استفاده می‌شود. همه سگمنت‌ها در یک حلقه به‌جز سگمنت کلید، دارای ابعاد یکسانی هستند. سگمنت کلید معمولاً کوچکتر از سایر سگمنت‌ها بوده و آخرین سگمنت نصب شده در هر حلقه است.

در این تحقیق به بررسی و مقایسه رفتار پوشش تونل‌های حفاری مکانیزه تمام‌مقطع (حفر-شده با TBM)، پرداخته می‌شود. بدین منظور حلقه‌ها به‌صورت جداگانه و هر حلقه نیز به دلیل وجود نواحی اتصالی سگمنت‌ها به صورت ناپیوسته مدل‌سازی شده است.

## ۱-۲- پیشینه و ضرورت انجام تحقیق

از جمله مطالعاتی که در مورد سامانه‌های نگهداری سگمنتی انجام شده است، می‌توان به بررسی ظرفیت باربری سگمنت کلید توسط ژانگ و کوزومی (Zhang & Kozami, 2007)، تخمین رفتار سامانه نگهداری سگمنتی توسط هفنی و همکاران (Hefny, et al., 2006)، بررسی سامانه‌های نگهداری سگمنتی به‌صورت یک حلقه هم‌ارز توسط مویروود (Muirwood, 1975)، تخمین فشار تزریق بر روی سامانه نگهداری سگمنتی توسط دینگ و همکاران (Ding, et al., 2004)، و بررسی تاثیر اتصالات بر روی گشتاور خمشی توسط تیچاوراسینکان (Teachavorsinkan, 2010)، اشاره کرد. مدل‌سازی سامانه نگهداری سگمنتی به صورت سه‌بعدی فقط توسط تعداد محدودی از محققین از جمله کلارپر (Klapper, 2006)، چن و مو (Chen & Mo, 2008) و آرنایو (Arnau, 2012) انجام شده است. مدل‌های تئوری مختلفی نیز برای توصیف رفتار اتصالات با استفاده از نتایج راه‌حل‌های عددی و تحلیلی ارائه شده‌است. از آن‌جمله می‌توان به روابط ارائه شده توسط جانسن و گلدول<sup>۱</sup> اشاره کرد

---

<sup>۱</sup> Janssen & Gladwell

(Luttikholt, 2007)، این مدل‌ها رفتار گشتاور- چرخش اتصالات سگمنتی را مورد بررسی قرار داده- اند. اتصالات موجود در بین سگمنت‌ها، بر روی رفتار و الگوی واقعی تنش تاثیر خواهند گذاشت و در تعیین نیروها و رفتار سگمنت نقش مهمی را ایفا می‌کنند. بنابراین در نظر گرفتن اتصالات در طراحی امری مهم و ضروری است (Luttikholt, 2007).

### ۱-۳- اهداف تحقیق

هدف نهایی این تحقیق، بررسی رفتار سامانه نگهداری در حالت نگهداری به شکل پوسته استوانه‌ای در مقایسه با مدل‌سازی پوشش، به صورت حلقه سگمنتی (در نظر گرفتن اتصالات)، با استفاده از روش عددی در حالت سه بعدی است.

### ۱-۴- ساختار پایان نامه

در این گزارش در فصل دوم کلیاتی در مورد نگهداری سگمنتی و تعاریف اولیه و آسیب‌های وارد بر آن‌ها بیان شده است. در فصل سوم فرآیند طراحی سگمنت بر اساس بارهای موجود و وارد بر قطعات بتنی پیش‌ساخته و همچنین روش‌های موجود برای دستیابی به این طراحی و همچنین رفتار اتصالات حلقه‌ای و سگمنتی با روش‌های موجود و تاثیر آن‌ها در افزایش گشتاور و ایجاد تمرکز تنش در این نواحی آمده است. در فصل چهارم زمین‌شناسی منطقه و روش‌های حفاری و آرایه سامانه نگهداری مناسب آمده است. در فصل پنجم این تحقیق مدل‌سازی عددی و مقایسه رفتار پوشش بحث شده است. فصل ششم نیز شامل نتیجه‌گیری و آرایه پیشنهادات برای تحقیقات تکمیلی است.

## فصل دوم

کلیاتی در مورد نگهداری سگمنتی

## ۲-۱- مقدمه

طی قرن‌های متوالی مردم از سازه‌های زیرزمینی برای محافظت در برابر گرما، سرما، باران و برف و نیز حفاظت در مقابل حملات دشمنان استفاده می‌کردند. به‌عنوان مثال، خانه‌های حفاری شده در سنگ در شمال اسپانیا، آفریقا، خاورمیانه، چین و اروپای شرقی از این موارد هستند. در مرکز ترکیه، مسیحی‌ها در قرون ۱۰ و ۱۱ یک شهر زیرزمینی را برای محافظت در مقابل حمله‌های مسلمانان بنا کرده بودند (Toan, 2006). در اطراف اسکو در آذربایجان شرقی (دهکده کندوان)، خانه‌هایی در داخل سنگ ساخته شده که ساکنان آنجا برای مقابله از حملات متجاوزان در آن با کلیه احشام زندگی می‌کردند و هنوز هم بسیاری از مردم در بعضی از خانه‌ها ساکن هستند. از قرن هفدهم برای امنیت بیشتر اتاق‌ها و صومعه‌های زیرزمینی، با استفاده از راهروهایی به یکدیگر وصل می‌شدند که این سامانه راهرویی، برای سال‌های زیادی در جنگ جهانی اول مورد استفاده قرار می‌گرفت (Toan, 2006).

## ۲-۲- ماشین حفاری تمام مقطع<sup>۱</sup>

ماشین‌های حفاری تمام مقطع (TBM) مجموعه‌ای از تجهیزات بسیار پیچیده هستند که برای حفاری تونل با همدیگر ترکیب شده‌اند و شامل کله‌حفار<sup>۲</sup> همراه با ابزار برش و جام مواد برش یافته<sup>۳</sup>، سیستم تامین‌کننده نیرو، دستگاه چرخاننده کله‌حفار، وسایل پیشران، سامانه مهاربندی برای فرآیند تونل‌زنی، تجهیزات نصب نگهداری، سپر<sup>۴</sup> برای محافظت از کارگرها و یک سامانه هدایت‌کننده است (Toan, 2006). در شکل ۱-۲ تصویر شماتیک از مراحل حفاری و نصب پوشش تونل توسط این ماشین‌ها نشان داده شده است.

---

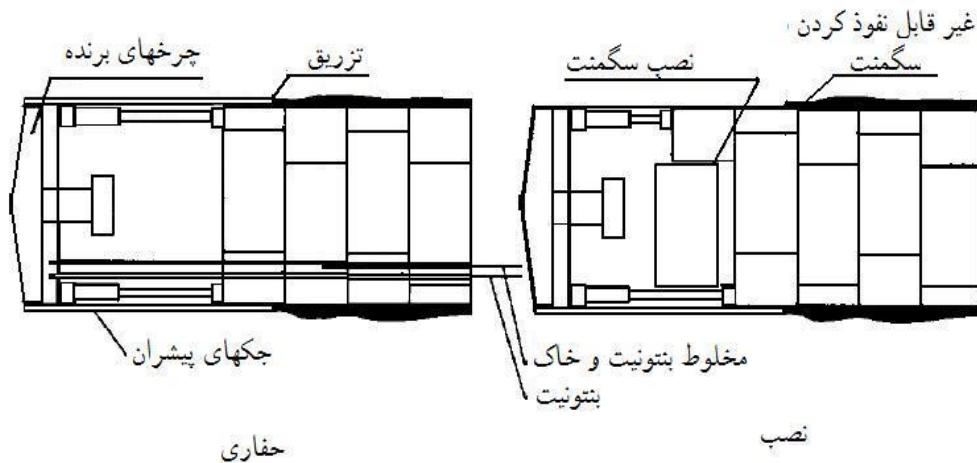
<sup>۱</sup> Tunnel Boring Machine

<sup>۲</sup> Cutter head

<sup>۳</sup> Muck buckets

<sup>۴</sup> Shield





شکل ۲-۱- تصویر شماتیک از عملیات ماشین حفر تونل (Wall, 1999)

## ۱-۲-۲- انتخاب ماشین حفار

برای تونل کاری می توان از انواع مختلف TBM بسته به شرایط زمین شناسی استفاده کرد. در زمین های سست باید فشاری به جبهه کار اعمال شود، تا از حرکت زمین و نشست آن جلوگیری شود. لذا شرایط زمین و اندازه تونل، نوع TBM را مشخص می کند. شرایط زمین شناسی که بر روی انتخاب TBM تاثیر می گذارند عبارتند از:

اندازه دانه، کانی های تشکیل دهنده، روباره، ناهمگنی زمین (از قبیل زمین های چند لایه و زمین های هوازده)، سطح آب زیرزمینی و فشار آن پارامترهای کلیدی که یک TBM دارد عبارتست از :

قطر سپر، وزن ماشین، حداکثر گشتاور (که برای چرخش کله حفار تحت نیروی پیشروی حداکثر نیاز است)، نیروی نگهدارنده، میزان نفوذ، قطر ابزار برنده، تعداد برنده ها بر روی کله حفار و نیرو به ازای هر برنده (Toan, 2006).

## ۲-۳- بررسی سامانه نگهداری

سامانه نگهداری سازه‌ای است که برای اطمینان از پایداری تونل در مقابل نیروهایی که از طرف زمین و آب به آن وارد می‌شود، ساخته می‌شود. نگهداری تونل‌ها عمدتاً شامل نگهداری اولیه و ثانویه است. در تونلی که با TBM حفر می‌شود، نگهداری در حالت کلی، شامل یک حلقه است، که از قطعات پیش ساخته بتنی (سگمنت) ساخته شده است، ولی در بعضی موارد به صورت درجا نیز ساخته می‌شود (Toan, 2006).

### ۲-۳-۱- انواع نگهداری‌ها در حالت حفاری تمام مقطع

انواع نگهداری‌هایی که در حالت تمام مقطع مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارتند از:

نگهداری لوله‌ای (لوله‌رانی)

نگهداری درجا

نگهداری سگمنتی

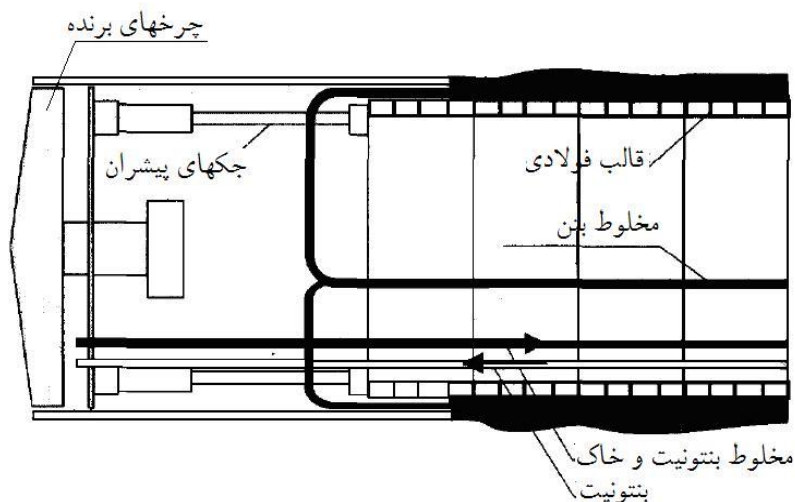
### ۲-۳-۱-۱- نگهداری‌های لوله‌ای

نگهداری‌های لوله‌ای به صورت پیش ساخته است و به عنوان نگهداری نهایی عمدتاً در شفت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. وقتی که از ماشین حفار استفاده شود، استفاده از این نوع نگهداری زیاد معمول نیست.

### ۲-۳-۱-۲- نگهداری بتنی برجا

در نگهداری بتنی برجا، بتن تحت فشار در فضای بین قالب‌بندی اولیه و سنگ اطراف در دنباله ماشین سپر تزریق می‌شود (شکل ۲-۲). در طول این فرآیند، بتن به طور پیوسته به صورت یک مخلوط با خاصیت پلاستیکی بالا از لوله خارج شده و مورد استفاده قرار می‌گیرد. جک‌های پیشران با تکیه بر قالب‌بندی اولیه، ماشین را به سمت جلو فشار می‌دهند و این انتقال انرژی در اثر اصطکاک،

باعث سخت شدن بتن می‌شود. قالب اولیه از نظر شکل شبیه به نگهداری سگمندی است با این تفاوت که از فولاد ساخته می‌شوند، زیرا بصورت پی‌درپی مورد استفاده قرار می‌گیرند یعنی در صورتی که بتن در انتها به اندازه کافی سخت شده باشد، قطعات فولادی در مقطع جلویی مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از معایب این روش این است که تقویت بتن در این روش با استفاده از میلگردها کار خیلی دشواری است (Toan, 2006).



شکل ۲-۲- تصویر شماتیک از یک نگهداری بتنی قالب‌بندی شده (Wall, 1999)

### ۲-۳-۱-۳- نگهداری سگمندی

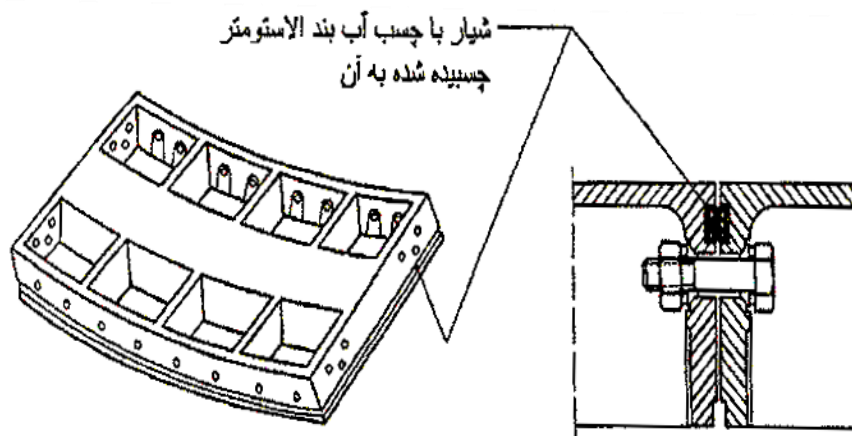
برای مدت زمان طولانی، چدن (امروزه بیشتر آهن گرافیتی شکل‌پذیر) رایج‌ترین مصالح مورد استفاده پوشش تونل را تشکیل می‌داد. از دهه ۱۹۵۰ بود که بتن و بتن تقویت‌شده ارزانتر جای آن را گرفت. هرچند که امروزه قطعات فولادی سبک که با دست قابل نصب هستند، هنوز هم برای تونل‌های کوچک مقطع مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به منظور جلوگیری از صدمه دیدن بتن و درزگیرها نباید نیروی زیادی بر محل اتصالات دایروی پوشش وارد شود. همچنین اگر قرار باشد، تونل در مقابل فشارهای داخلی و خارجی آب‌بندی شود و یا قسمت داخلی تونل بسیار صاف و یکنواخت باشد، پوشش تونل با استفاده از قطعات پیش‌ساخته، به یک پوشش ثانویه نیاز دارد.

امروزه قطعات بتنی تقویت شده رایج ترین ابزار پوشش به حساب می آیند. با توسعه و ساخت قطعات پیش ساخته استاندارد، تغییرات ساختاری آن ها بسیار محدودتر شده است. تجهیز محل اتصالات قطعات پیش ساخته با اجزا درزگیری و ثابت کننده حلقه بیشتر اصلاح شده و سامانه های نصب حلقه دقیق تر شده است. استفاده از جک های پیشران برای تامین پایداری قطعات پیش ساخته بعد از نصب آن ها به منظور توزیع و انتقال نیروهای برگشتی ضروری است (عجم زاده، ۱۳۸۹). در ادامه انواع نگهداری سگمندی و ویژگی های آن ها آورده شده است.

### الف - قطعات پیش ساخته چدنی

قطعات پیش ساخته چدنی از جمله نگهداری های سگمندی محسوب می شوند که به خاطر شیوه جدید قالب گیری در خلا، روش پرهزینه ساخت چدن از رده خارج شده است. به جای استفاده از شیار درزگیری شده<sup>۱</sup> در لبه داخلی قطعات پیش ساخته، استفاده از آب بندهای انعطاف پذیر که به شیار چسبانده می شود، مرسوم شده است. پیچ های دور تا دور قطعات پیش ساخته سبب اتصال محکم آن به قطعات پیش ساخته مجاور می شود (شکل ۲-۳). همچنین پروفیل لبه قطعات پیش ساخته که برای قالب گیری مناسب است، با شکل های مناسب تری جایگزین شده است (Koyama, 2003).

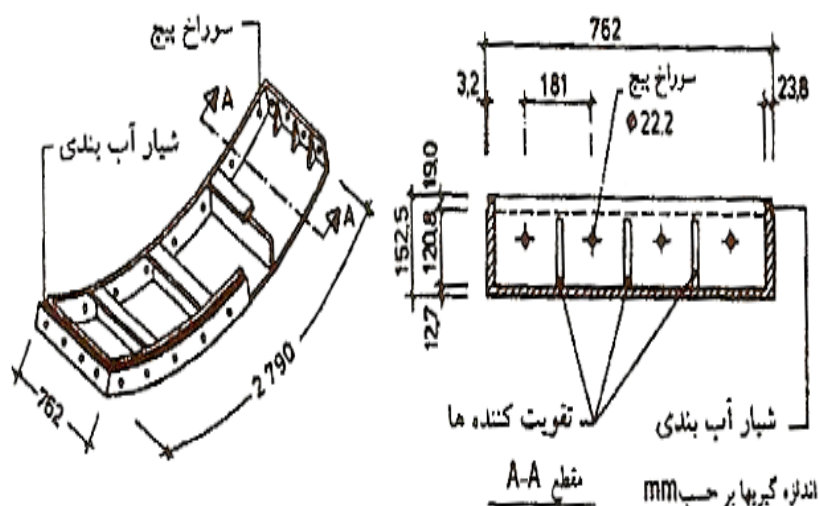


شکل ۲-۳- قطعه پیش ساخته چدنی با آب بندی (Chen, 2007)

<sup>1</sup> Caulking groove

## ب- قطعات پیش‌ساخته فولادی

قطعات پیش‌ساخته فولادی جوش داده شده، امکان تغییرات بیشتری را نسبت به سایر قطعات پیش‌ساخته فراهم می‌سازد. اما این نوع قطعات پیش‌ساخته به خاطر هزینه زیاد تولید، امروزه به کار گرفته نمی‌شود. یک نمونه از این قطعات پیش‌ساخته در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴- قطعه پیش‌ساخته فولادی (Chen, 2007)

استفاده از پرکننده‌های بتنی با ساختار مناسبی همچون کامپوزیت، سطح بیرونی صاف ایجاد می‌کند که برای آب‌بندی و درزگیری پوشش و یا جبران کمبود وزن این قطعات پیش‌ساخته لازم است. با توسعه روش‌های جدید کم هزینه‌تر پوشش‌های تونل، قطعات پیش‌ساخته چدنی و فولادی تنها در مواردی با شرایط خاص از جمله وجود بارهای متقارن و یا قوس‌هایی با شعاع کوچک با توجه به کیفیت آن‌ها به کار گرفته می‌شود.

## پ - نگهداری بتنی سگمنتی

نگهداری بتنی سگمنتی به سرعت در انتهای سپر قابل نصب بوده و یک فرآیند تقریباً پیوسته در تونل‌زنی را فراهم می‌کند. همچنین از هرگونه رخنمون سنگی در تاج و دیواره‌های تونل اجتناب می‌شود. مزیت‌هایی که برای این نوع نگهداری می‌توان ذکر کرد عبارتند از:

- دارای کیفیت خیلی بالایی است.
- وقتی که حلقه از دنباله سپر خارج می‌شود دارای مقاومت نهایی بوده و توانایی تحمل بار آن زیاد است.
- نشت از نگهداری به آسانی قابل تشخیص بوده و کار تعمیر آن بر حسب نوع مورد، امکان‌پذیر است (Gruebl, 2012).

کنترل کیفیت نگهداری سگمنتی خیلی آسان است زیرا در محیط خارج از تونل و با استفاده از استانداردهای مشخصی ساخته می‌شود. مشکل عمده نگهداری سگمنتی هزینه مواد مورد استفاده در ساخت آن است. البته این هزینه می‌تواند از طریق نصب سریع و عدم تاخیر در تونل‌کاری جبران شود.

## ت - نگهداری بتنی با الیاف فولادی

اگر خصوصیات ساختاری مورد نیاز نگهداری با به‌کارگیری الیاف فولادی تامین شود، ساخت و نصب آرماتورهای تقویت‌شده ممکن است کنار گذاشته شوند. استفاده از بتن تقویت شده توسط الیاف<sup>۱</sup> در ساخت نگهداری سگمنتی دارای مزایای زیر است:

- ✓ بتن مسلح با الیاف فولادی یک ماده با دوام بالا است.
- ✓ اندازه ترک‌ها در این نوع بتن کم است (ماندگاری بالا است).
- ✓ مقاومت بالایی را در مقابل بارهای ضربه‌ای دارد (که این بارها ممکن است در حین انتقال و نصب

<sup>۱</sup> Steel Fiber Reinforced Concrete(SFRC)

سگمنت‌ها ایجاد شود).

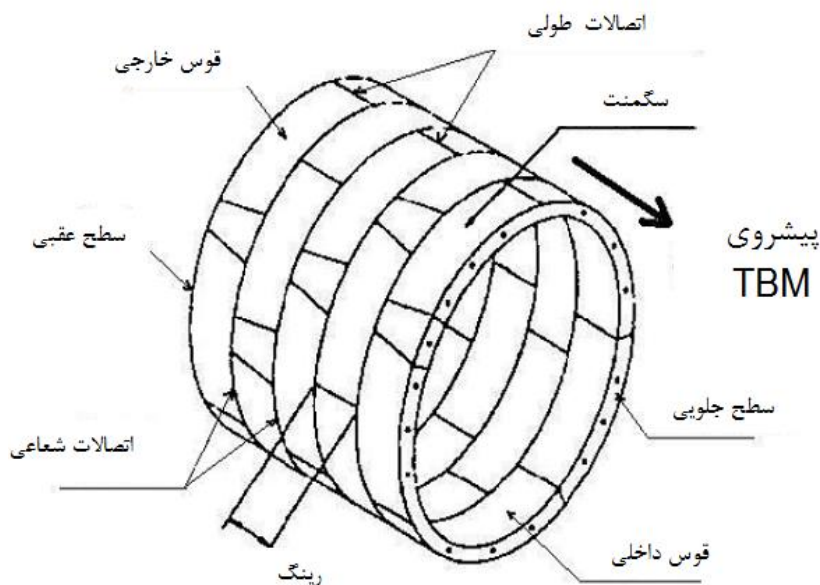
✓ امکان جداسازی بتن از روی قالب

✓ صنعتی شدن فرآیند تولید و استفاده کمتر از آرماتور

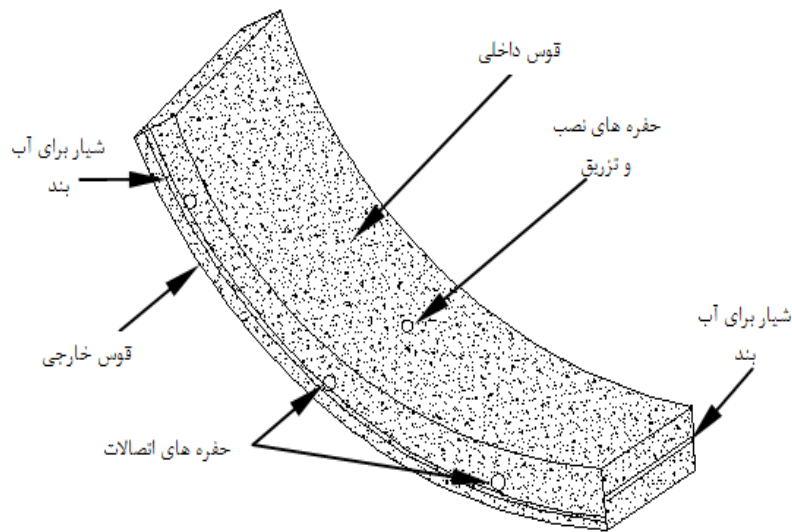
به هر حال باید عملکرد نگهداری‌های ساخته شده با استفاده از این مواد تحت بارهایی که از زمان ساخت تا مراحل بهره‌برداری به آن وارد می‌شود، مورد بررسی قرار گیرد. این نوع بتن‌ها دارای ظرفیت باربری بیشتری هستند. لذا یک نگهداری بهینه باید شامل آرماتور و الیاف باشد؛ تا ترک‌های خمشی و خردشدگی در آن اتفاق نیفتد.

## ۴-۲- بررسی نگهداری بتنی سگمنتی

در نگهداری بتنی سگمنتی، که تمرکز اصلی در این تحقیق بر روی آن است، حلقه بتنی با استفاده از تعدادی سگمنت که در داخل سپر به هم وصل می‌شوند، ساخته می‌شود. در شکل‌های ۲-۵ و ۲-۶ قسمت‌های مختلف یک نگهداری سگمنتی نشان داده شده است.



شکل ۲-۵- اصطلاحات و نام‌گذاری نگهداری سگمنتی (Toan, 2006)



شکل ۲-۶- اصطلاحات و نام‌گذاری سگمنت‌ها (Toan, 2006)

## ۲-۴-۱- تاریخچه کاربرد پوشش‌های سگمنتی

پوشش‌های سگمنتی اولیه آجرهای ساده‌ای بودند که با کیفیت و دقت بالایی ساخته و نصب می‌شدند به طوری که قادر بودند تکیه‌گاه کاملی را بلافاصله پس از حفاری تونل ایجاد نمایند. این سامانه‌ی سازه‌ای متشکل از مجموعه‌ی المان‌های بدون اتصال اما تحت فشار بود که مبنای آن‌را باربری قوس تشکیل داده و قادر به تحمل خمش نبود. بعدها چنین سامانه‌ای در سال ۱۸۶۹ در متروی زیرزمینی لندن اما با قطعات چدنی به‌کار گرفته شد (Koyama, 2003). شکل درزها (محل اتصال قطعات) به نوعی انتخاب شده بود که به انتقال بار بین قطعات از طریق بخش مرکزی آن‌ها کمک می‌کرد. قطعات چدنی یاد شده برخلاف قطعات آجری اولیه که کوچک بوده و زمان ساخت را افزایش می‌داد، بزرگتر انتخاب شده و به‌صورت ناپیوسته به یکدیگر متصل و پوشش نهایی را تشکیل می‌دادند. کاربرد پوشش سگمنتی به شکل امروزی، طوری که بتواند بار رانش TBM را نیز تحمل کند اولین بار در سال ۱۹۶۱ در تونل انتقال آبی در آلمان و بعد از آن در متروی زیرزمینی برلین در سال ۱۹۶۵ به‌کار گرفته شد. در سال‌های اخیر دو نوع اصلی از پوشش سگمنتی کاربرد گسترده‌ای داشته است. نوع اول که با استفاده از نوار آب‌بند، آب‌بندی می‌شود و به‌طور عمده برای تونل‌های مترو

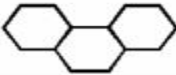


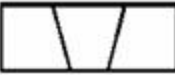


ساخته شده در زمین‌های نرم با عمق سربار و طول کم مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوع دیگر برای تونل‌های طویل انتقال آب که در سنگ ساخته می‌شوند و پس از نصب با روش خاصی آب‌بند می‌شوند، به کار برده می‌شود. در سال ۱۹۷۲ دستگاه TBM با سپر دوگانه توسط کارلو گرندوری توسعه داده شد، به نحوی که این سامانه می‌توانست همراه و یا بدون وجود پوشش نگهداری تونل، کار کند و در عین حال همزمان با عملیات حفاری سگمنت‌گذاری نماید. با توسعه سامانه یاد شده و به منظور بالا بردن سرعت اجرای تونل‌های انتقال آب، سامانه پوشش سگمنتی شش وجهی یا لانه زنبوری با موفقیت در پروژه‌های بسیاری مورد استفاده قرار گرفت.

## ۲-۴-۲- طبقه‌بندی انواع سامانه پوشش‌های سگمنتی

به‌طور کلی سگمنت‌های بتنی به اشکال مختلفی در پروژه‌های تونل‌سازی استفاده می‌شوند که انواع مستطیلی، دوزنقه‌ای، متوازی‌اضلاع (لوزی‌شکل) و شش‌ضلعی را شامل می‌شوند. هر یک از این اشکال مزایا و معایب خاص خود را داشته و بسته به شرایط پروژه ممکن است هر یک از گزینه‌ها انتخاب شوند. در جدول ۱-۲ انواع سگمنت‌ها از نظر شکل هندسی و دیگر مشخصات مرتبط نشان داده شده است.

جدول ۱-۲- سامانه‌های چیدمان سگمنت (فرخ، ۱۳۸۶)

سامانه شش ضلعی	سامانه لوزی‌شکل	سامانه دوزنقه‌ای	سامانه متعارف مستطیلی (با کلید)	هندسه سگمنت
				هندسه
پیوسته	حلقه به حلقه - ناپیوسته	حلقه به حلقه - ناپیوسته	حلقه به حلقه - ناپیوسته	مراحل نصب
ندارد	دارد	ندارد	دارد	سگمنت کلید
نیازمند المان‌های خاص نیست - بازشدگی درزهای پیرامونی محدود می‌گردد.	نیاز به سگمنت‌های خاص یا دوزنقه‌ای (سامانه حلقه جهانی)	نیاز به سگمنت‌های خاص یا دوزنقه‌ای (سامانه حلقه جهانی)	نیاز به سگمنت‌های خاص یا دوزنقه‌ای (سامانه حلقه جهانی)	اجرای قوس و اصلاح مسیر
درز باز یا درزگیری شده	درزهای باز یا گسکت	درزهای باز یا گسکت	درزهای باز یا گسکت	آب‌بندی درز

معمولاً در پروژه‌هایی که بحث دوام و مقاومت در برابر آتش‌سوزی مطرح است، از پوشش دو پوسته‌ای که متشکل از سگمنت و بتن‌ریزی درجا است استفاده می‌شود، اما استفاده از سامانه دو پوسته‌ای خیلی متعارف نیست.

بعضی از سگمنت‌ها، تحت حفاظت سپر انتهایی TBM نصب می‌شود. در این شرایط از نقطه نظر آب‌بندی، در محل درزه‌ها از نوار آب‌بند استفاده می‌شود و اتصال میان قطعات سگمنت از طریق بولت ارتباطی که باعث بهم فشردن قطعات سگمنت در راستای طول تونل می‌شود، برقرار می‌گردد. این نحوه اتصال سبب می‌شود که نوار آب‌بند تحت فشار قرار گیرد. برای دستیابی به آب‌بندی کامل تونل، اجرای دقیق فرآیند حفاری تونل و ساخت و نصب سگمنت از الزامات این سامانه است. از طرفی برای ایجاد اندرکنش مناسب میان سنگ و پوشش بتنی، پشت سگمنت با ملات انعطاف‌پذیری که رفتار پلاستیک (شن نخودی) دارد پر می‌شود.

گاهی سگمنت‌ها بدون استفاده از بولت‌های ارتباطی نصب می‌شوند، به طوری که در ساده‌ترین حالت از پین‌های راهنما برای نصب صحیح سگمنت‌ها در راستای طولی استفاده می‌شود. در این روش برای پایدارسازی پوشش سگمنتی، پشت سگمنت کف با ملات و پشت سگمنت‌های پیرامونی تزریق می‌شوند. از همان ابتدا، شن نخودی با ایجاد انعطاف‌پذیری لازم، سختی مناسب در محل نشیمن را تامین نموده و نحوه قرارگیری سگمنت‌ها نسبت به یکدیگر را تنظیم می‌نماید. ضخامتی که به‌طور معمول با این مصالح پر می‌شود، بین ۱۰ تا ۱۵ سانتی‌متر است. نقش شن نخودی در ایجاد باربری در راستای طولی تونل ناچیز است، اما در مقطع عرضی و به‌ویژه برای بارسنگ ناگهانی، به‌واسطه وجود شن نخودی، پوشش سگمنتی می‌تواند به‌راحتی با تغییر شکل الاستیک کوچکی به باربری کامل خود دست یابد. در گام بعد، با در نظر گرفتن رفتار بلند مدت بار و آب‌بندی، حفره‌های باقی‌مانده با تزریق در توده‌سنگ یا با درزگیری شیارها پر می‌شوند.

## ۲-۴-۳ - نصب و پایدارسازی سگمنت

همانگونه که پیش تر توضیح داده شد، سگمنت‌ها تحت حفاظت سپر انتهایی به شکل دایروی نصب و توسط جک‌های کمکی TBM در موقعیت خود ثابت نگه‌داشته می‌شوند. در اولین گام بعد از نصب، فاصله خالی زیر سگمنت کف که به وسیله صفحات بتنی تکیه‌گاهی ایجاد شده است، با ملات پر می‌شود. این مساله علاوه بر ایجاد بستری برای قرارگیری سگمنت کف، باعث خروج آب از زیر سگمنت نیز می‌شود. در گام بعد فاصله خالی شعاعی پشت سگمنت‌های دیواره، سقف و توده سنگ به وسیله شن نخودی پر می‌شود.

پس از قرار گرفتن شن نخودی در پشت سگمنت، سامانه سازه‌ای تکمیل شده و پایداری حلقه سگمنت به لحاظ شکل و همچنین باربری کامل سازه‌ای آن تامین می‌گردد. تا زمانی که سامانه پوشش باز انعطاف پذیر مدنظر بوده و جریان آب بداخل تونل مجاز باشد، خود شن نخودی به تنهایی پایداری دراز مدت تونل را تامین خواهد کرد، در غیر این صورت برای محافظت سنگ در برابر جریان آب و یا به منظور آب بندی تونل، تزریق دوغاب الزامی خواهد بود.

در پروژه‌های اجرایی برای دسترسی به اهداف یادشده، استفاده از دوغاب سیمان با نسبت آب به سیمان w/c بین ۰/۸ تا ۱ به همراه بنتونیت با نسبت ۱ تا ۲ درصد وزنی سیمان نتایج مورد قبولی را نشان داده است.

## ۲-۴-۴ - پارامترهای طراحی پوشش سگمنتی

در طرح اولیه سگمنت در ابتدا باید پارامترهای زیر را مشخص نمود و سپس متناسب با شرایط طرح مقادیر آنها انتخاب گردد:

الف) پارامترهای هندسی سگمنت شامل:

- عرض سگمنت

- طول سگمنت

- ضخامت سگمنت

ب) سامانه درزهای سگمنت شامل:

- درز طولی

- درز پیرامونی

### الف - پارامترهای هندسی سگمنت

عرض سگمنت با توجه به شرایط هندسی ماشین حفاری، مناسب بودن وزن سگمنت از نظر حمل و محدودیت‌های اجرا انتخاب می‌شود. به‌طور معمول می‌توان تا قطر ۱۰ متر، عرض سگمنت را از رابطه زیر محاسبه کرد (فرخ، ۱۳۸۶، اسماعیلی و زمانی، ۱۳۸۳).

$$B = 0.093 D + 0.87 \quad (1-2)$$

در این رابطه  $D$ ، قطر حفاری و  $B$ ، عرض سگمنت بر حسب متر است.

برای انتخاب طول سگمنت باید به مواردی از قبیل شرایط هندسی ماشین حفاری، عرض سگمنت (از نظر قابل حمل شدن سگمنت)، آرماتور سگمنت که تابع متناسب با توان دوم طول سگمنت است، مراحل نصب (تعداد سگمنت در هر حلقه) توجه داشت. از نظر اجرایی طول هر قطعه سگمنت به ۶ متر محدود می‌شود.

ضخامت سگمنت تابع مواردی از قبیل: الزامات سامانه (آب‌بندی، یک پوسته یا دو پوسته بودن پوشش و ...)، سامانه TBM (نیروی فشاری اعمال شده از دستگاه بر حلقه بتنی) است. به‌طور معمول و بسته به نوع پوشش بتنی این ضخامت در محدوده ۲۰ تا ۳۵ سانتی‌متر و در حالت خاص تا ۶۰ سانتی‌متر می‌رسد.

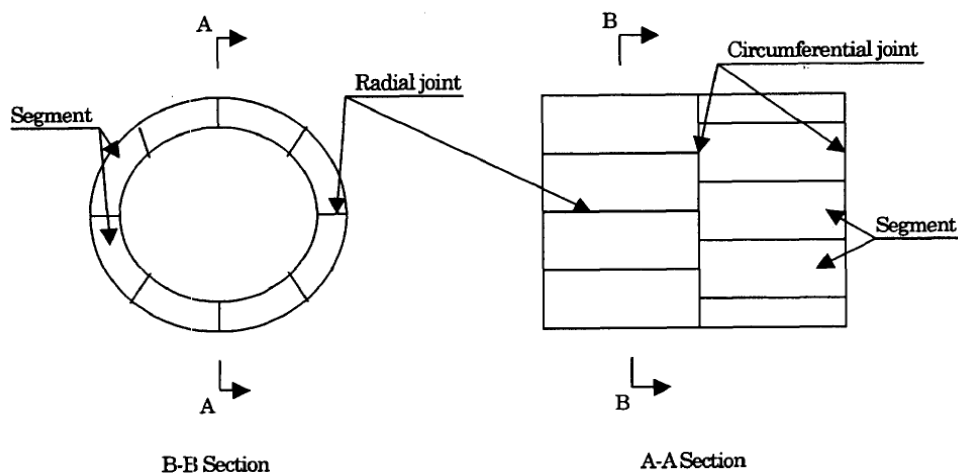
### ب - سامانه درزهای پوشش سگمنتی

پوشش دائم با استفاده از سگمنت دارای دو دسته درز است، سامانه درزهای طولی (شعاعی)

و سامانه درزهای پیرامونی (شکل ۲-۷). برای هر یک از انواع درز الزامات خاصی در زمینه آببندی و طرح سازه‌ای نیاز است. در جدول ۲-۲ انواع اصلی درز در پوشش سگمنتی ارائه شده است.

جدول ۲-۲- انواع اصلی درزها در سگمنت (فرخ، ۱۳۸۶)

معایب	مزایا	کاربردهای اصلی	نوع درز
خطر صدمه دیدن لبه‌ها	سادگی	برای درزهایی که دارای بارگذاری پیرامونی کمی بوده و آببندی نمی‌شوند	درز مسطح با تماس کلی 
اعمال بار بصورت نقطه‌ای در دوران کم	انتقال بار در ناحیه میانی	برای درزهای پیرامونی آببندی شده و درزهای شعاعی	درز مسطح با تماس جزئی 
نیاز به آرمانتور کششی برای جلوگیری از ترک ناشی از شکاف خوردگی	انتقال بار در ناحیه میانی و بطور همزمان امکان دوران (بیضی‌شدگی) و لغزش	برای درزهای شعاعی با بارگذاری بالا (محدب/مقعر یا مقعر/محدب)	درز محدب 
ایجاد خسارات و اعمال بار بصورت نقطه‌ای در صورت نصب غیر دقیق	افزایش پایداری سیستم	برای درزهای پیرامونی (آببند شده) و درزهای شعاعی	درز خود تنظیم شونده 



شکل ۲-۷- سامانه درزهای طولی و درزهای پیرامونی (ITA, 2000)

## ۲-۴-۵- اتصالات

وظایف اصلی اتصال قطعات را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود (Maidl, et al., 2011):

- برآورده نمودن دقت نصب و جلوگیری از بیرون زدگی قطعات و بازشدگی در درزهای پوشش
- حفظ نیروهای فشاری اعمال شده به نوارهای آب‌بند خصوصاً در نزدیکی دهانه‌های خروجی تونل.
- برآورده نمودن پایداری قطعات حتی در مواقعی که جک‌های حرکتی ماشین حفاری تونل، نیرویی به قطعات اعمال نمی‌کنند.
- ثابت نمودن قطعات در موقعیت خود

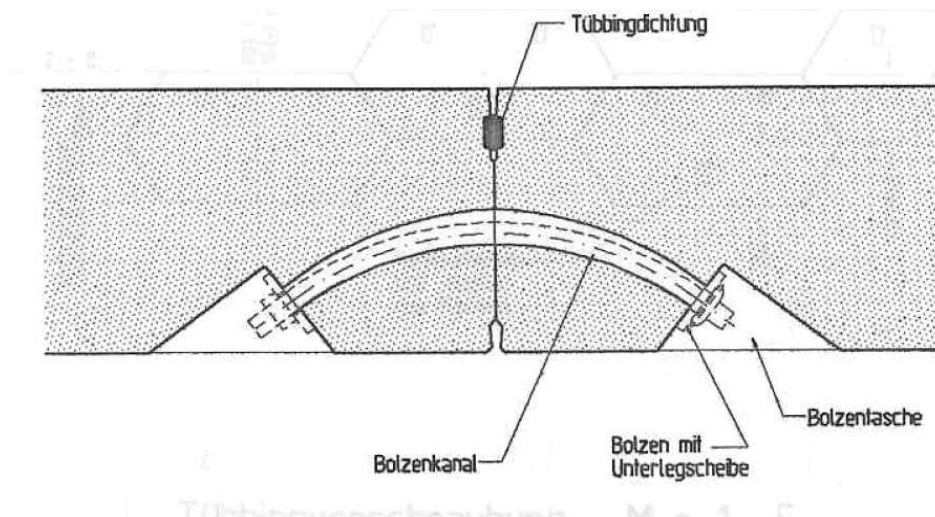
انواع اتصالات را می‌توان شامل این موارد دانست:

## ۲-۴-۵-۱- اتصالات بولتی

از این نوع اتصالات به‌طور برجسته برای سامانه‌های نگهداری آب‌بند استفاده می‌شود. بولت‌ها از درون حفرات ایجاد شده در سمت داخلی پوشش در موقعیت خود جاگذاری می‌گردند. اتصالات بولتی خود به چند دسته اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

### الف- بولت‌های منحنی شکل

این بولت‌ها به‌طور معمول از وسط ضخامت قطعات عبور می‌کنند. این بولت‌ها به دو سوراخ که در دو طرف درزهای مابین دو قطعه و بر روی سطح داخلی قطعات ایجاد می‌شود، نیاز دارند و پس از نصب با پیچ محکم می‌گردند. با این طرح از بولت، حجم سوراخ‌ها به‌طور قابل ملاحظه‌ای کم می‌شود. در شکل ۲-۸ نحوه قرارگیری بولت‌های منحنی شکل نشان داده شده است.



شکل ۸-۲- بولت‌های منحنی شکل (Gruebl, 2009)

### ب- بولت‌های مستقیم

این بولت‌ها نیز به دو سوراخ که در دو طرف درزهای مابین دو قطعه و بر روی سطح داخلی قطعات ایجاد می‌شود، نیاز دارند. این حفره‌ها، باید به اندازه کافی برای جا دادن بولت‌ها بزرگ باشند. این بولت‌ها از طریق حفرات ایجاد شده در سمت داخلی پوشش نصب می‌شوند (Maidl, et al., 2011).

### پ- بولت‌های مایل

این نوع بولت‌ها از مرکز ضخامت قطعات عبور می‌کنند. نصب این بولت‌ها مانند بولت‌های منحنی شکل است. هزینه کم و کاربرد سریع از جمله مزایای این نوع بولت است. در شکل ۹-۲ نحوه قرارگیری بولت‌های مایل نشان داده شده است.



شکل ۲-۹- بولت‌های مایل (Gruebl, 2009)

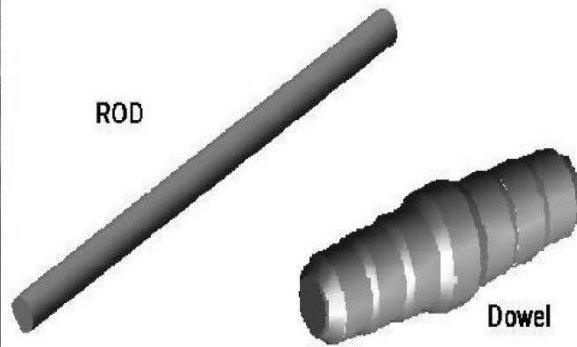
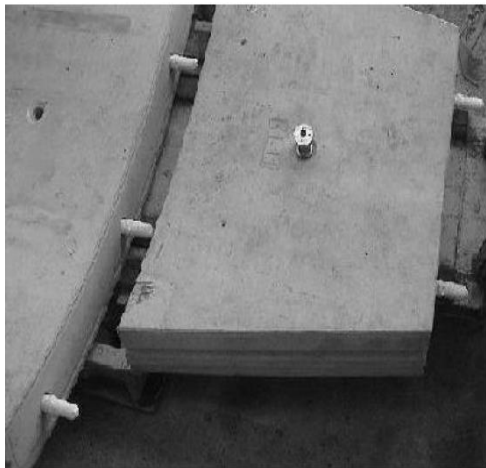
#### ۲-۵-۴-۲- اتصالات داولی<sup>۱</sup>

داول‌ها در ضخامت میان قطعه‌های بتنی قرار می‌گیرند. غالب داول‌ها از پلاستیک ساخته شده‌اند اما در برخی از آن‌ها علاوه بر پلاستیک از ترکیبات دیگری به منظور افزایش ظرفیت باربری یا اهداف دیگر استفاده شده است. مدل اولیه داول‌ها به نام کانکس<sup>۲</sup> بود که فرم ساده و ارزان آن از چوب ساخته شده بود. داول‌های نوع کانکس از یک نوع مواد پلاستیکی سخت و تعدادی حلقه‌ی الاستیک که بر روی بدنه‌ی اصلی قرار می‌گیرد، ساخته شده‌اند. کار این حلقه‌ها ثابت نمودن داول در موقعیت خود است. هنگامی که داول به درون حفره مربوطه فشار داده می‌شود، حلقه‌های الاستیک عمل می‌کنند و به جدار حفره نیرو وارد می‌کنند. ظرفیت کششی داول‌ها بسته به سطح نیروی اصطکاکی بین داول و جدار حفره است. داول‌های با ظرفیت کششی کم برای تونل‌های با قطر کم استفاده می‌گردند (Maidl, et al., 2011). در شکل ۲-۱۰ اتصالات داولی مورد استفاده در پوشش سگمنتی متروی شیراز نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> dowel

<sup>۲</sup> conex





شکل ۲-۱۰- اتصالات داوولی مورد استفاده در متروی شیراز (شرکت بامراه، ۱۳۸۴)

## ۲-۴-۶- تولید قطعات پیش ساخته بتنی

به طور کلی تولید قطعات پیش ساخته بتنی با دو نوع دستگاه انجام می شود:

- دستگاه های گردان
- دستگاه های ثابت

در دستگاه های گردان، قالبها، بالای یکسری چرخ هستند، یا این که بر روی یکسری سکوهای متحرک نصب شده اند و به وسیله ی تجهیزات هیدرولیکی بر روی ریلها حرکت می کنند. پس از آن که هر یک از عملیات فرآیند تولید کامل می گردد، تمام قالبهای موجود بر روی خط تولید به صورت همزمان حرکت داده می شوند. هریک از عملیات فرآیند تولید در یک مکان ثابت و تمامی عملیات سیکل تولیدی در یک مدت زمان مشابه بر روی قالبهای مختلف صورت می گیرد. سکوهای دو سره که توسط موتور چرخ دنده ای هیدرولیکی حرکت می کند، امکان انتقال در یک مسیر برگردان را به قالبها می دهند. در ایستگاه قالب گیری، یک قالب لرزش کننده که مجهز به سامانه بالابر، ویبراتورهای مناسب و سامانه های نگهدارنده ی ضد لرزش هستند، کار لرزش قالب را در حین عملیات قالب گیری بتن انجام می دهند. در موقعیت مشابه، یک محفظه متحرک عرضی و پوشش های مفصل-داری که متصل به زمین هستند، قرار دارد. تامین بتن، در ایستگاه قالب گیری معمولاً توسط یک

نقاله‌ی مناسب که محفظه را به ایستگاه مرکزی ساخت بتن متصل می‌کند، انجام می‌شود. گاهی اوقات ایستگاه مرکزی ساخت بتن مستقیماً بالای محفظه قرار دارد. مساله مهم برای یک دستگاه گردان، سیکل زمانی تولید است (Guglielmetti, et al., 2007).

دستگاه‌های ثابت قالب‌هایی دارند که به زمین متصل می‌شوند و تمامی عملیات جابه‌جایی و انتقال و جاگذاری مواد بر روی هریک از قالب‌ها توسط سامانه‌های معمول از قبیل جرثقیل‌ها، میکسرها و غیره صورت می‌گیرد. از این سامانه معمولاً برای تولید پایین و همچنین برای حالتی که عمل‌آوری با بخار مدنظر نباشد، استفاده می‌گردد.

ارزیابی کیفیت مخلوط بتن و روش تولید تحت یکسری آزمایش قرار می‌گیرد. در این ارتباط می‌توان یکسری نمونه تهیه کرد و سپس این نمونه‌ها را تحت یکسری آزمایش قرار داد که بنا بر توصیه کمیته زیر ساخت آلمان<sup>۱</sup> دمای یک نمونه باید به طور پیوسته در حین فرآیند گیرش بتن اندازه‌گیری و ثبت شود. همچنین در این ارتباط می‌توان قطعات آزمایشی را در یکسری قالب‌های مناسب و تحت شرایط پیشنهاد شده، قبل از شروع تولید مورد بررسی قرار داد. در این مورد، عملکرد سامانه لرزاننده در ارتباط با تشکیل خلل و فرج سطح بتن را می‌توان مورد آزمایش قرار داد. همچنین لازم است مقاومت اولیه بتن توسط وسایل غیر مخرب تعیین گردد.

در طول عملیات ساخت قطعات، آزمایش جورشدگی به منظور حصول اطمینان از جفت و جور شدن قطعات، با انتخاب اتفاقی تعدادی از قطعات پیش‌ساخته و ایجاد یک حلقه آزمایشی از قطعات امکان جورشدگی آن‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهند. در شکل ۲-۱۱ نمونه‌ای از آزمایش جورشدگی بر روی سگمنت‌های تونل پروژه انتقال آب قمرود در ایران، نشان داده شده است.

---

<sup>۱</sup> DAUB



شکل ۲-۱۱- نمایش از حلقه آزمایشی قطعات (پروژه قمرود، ایران)

همچنین به منظور ارزیابی کیفیت بتن مورد استفاده در ساخت قطعات پیش‌ساخته، به طور مرتب نمونه‌هایی از بتن مورد استفاده اخذ و طبق استانداردها مورد آزمایش قرار می‌گیرند. علاوه بر این، به منظور حصول اطمینان از مقاومت بتن تحت عمل‌آوری تسریع شده و نگهداری قطعات در شرایط کارگاهی، آزمایشات تعیین مقاومت نمونه‌های کرگیری شده انجام می‌گیرد.

#### ۲-۴-۷- آب‌بندی پوشش‌های سگمندی

برای آب‌بندی قطعات بتنی پیش‌ساخته معمولاً موارد زیر در نظر گرفته می‌شود:

آب‌بندی خود سگمندی‌ها در مواردی که مساله آب‌بندی از اهمیت زیادی برخوردار باشد که در این صورت تمهیدات زیر در نظر گرفته می‌شود (Guglielmetti, et al., 2007):

- ✓ افزایش چگالی بتن
- ✓ کنترل ترک‌های مرتبط با تنش‌های اعمال شده دائمی یا موقت
- ✓ کنترل نقص‌های ساختاری مرتبط با شیارهای نوار آب‌بند
- ✓ استفاده از نوار آب‌بند

در تونل‌هایی که زیر تراز آب زیرزمینی قرار دارند، استفاده از یک یا دو نوار آب‌بند لازم است. در حالت به‌کارگیری یک نوار آب‌بند، در صورت زیاد بودن نشت آب، می‌بایست از بندکشی نیز استفاده نمود. در شکل ۲-۱۲ استفاده از نوارهای آب‌بند و چگونگی نصب آن‌ها در پروژه قمرود (در ایران) آمده است.

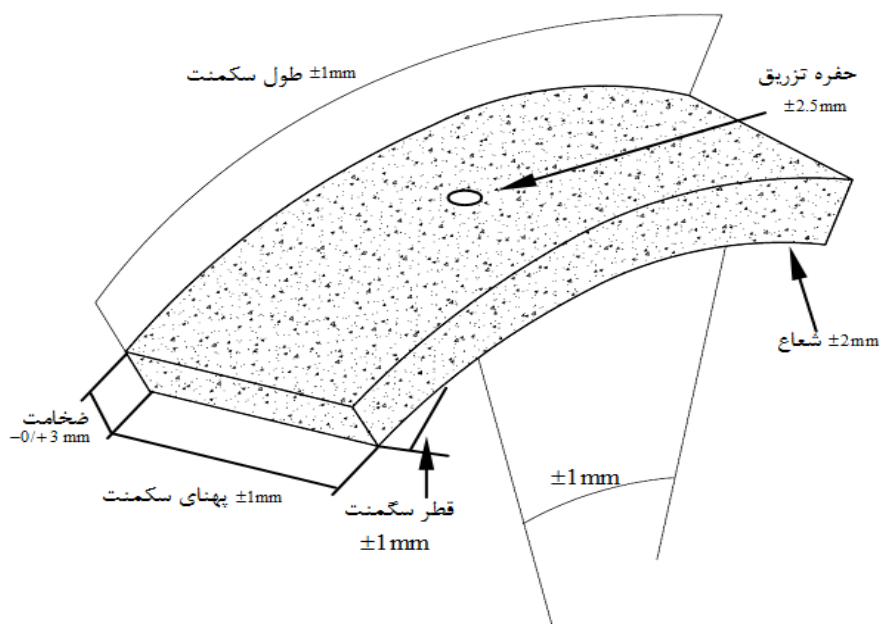


شکل ۲-۱۲- استفاده از نوارهای آب‌بند و چگونگی نصب آن‌ها (پروژه قمرود، ایران)

## ۲-۴-۸- میزان رواداری<sup>۱</sup> هندسی

با توجه به اهمیت اتصال دقیق سگمنت‌ها در یک حلقه بتنی، بازه رواداری مجاز این قطعات از حدود ۰/۱ تا ۳ میلی‌متر، بسته به قسمت‌های ویژه هر سگمنت، تعریف می‌شود. بنابراین اندازه‌گیری به طور غیرمستقیم بر روی قالب‌های به‌کار رفته برای ساختن سگمنت‌ها انجام می‌گیرد. حداکثر خطایی که در ساخت قسمت‌های مختلف یک سگمنت مجاز است. در شکل ۲-۱۳ و جدول ۲-۳ نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Tolerance



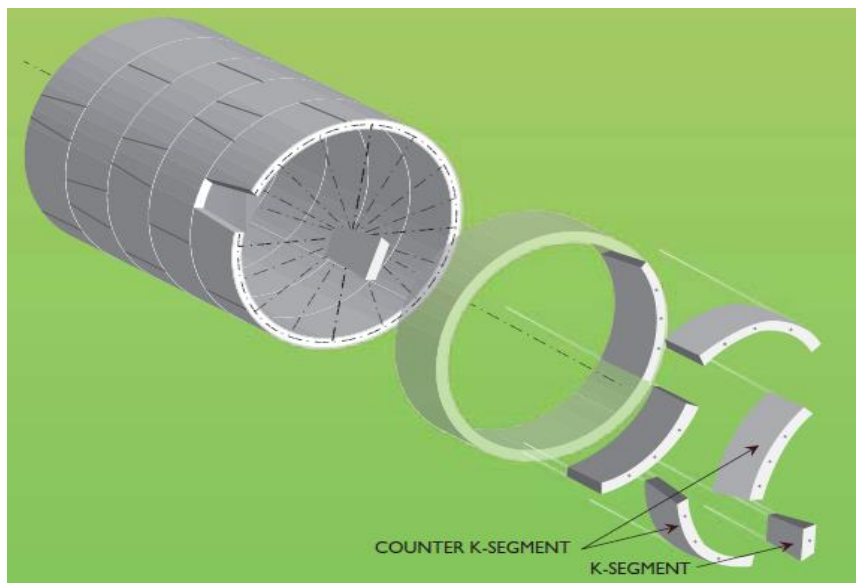
شکل ۲-۱۳- هندسه سگمنت و حداکثر خطای مجاز (Toan, 2006)

جدول ۲-۳- حداکثر خطای مجاز در ساخت قسمت‌های مختلف سگمنت (Toan, 2006)

توضیحات	تغییرات
طول (پهنای) سگمنت	$\pm 1 \text{ mm}$
ضخامت	$-0/+3 \text{ mm}$
طول قوس خارجی	$\pm 1 \text{ mm}$
شعاع داخلی	$\pm 2 \text{ mm}$
قطر سگمنت	$\pm 1 \text{ mm}$
موقعیت حفره های اتصالات	$\pm 0.5 \text{ mm}$
موقعیت حفره های نصب	$\pm 2 \text{ mm}$
عمق شیار درزگیرها	$-0.5 + 0.1 \text{ mm}$
تخت بودن صفحات اتصال یافته	$\pm 1 \text{ mm}$

## ۹-۴-۲- فرآیند تشکیل حلقه‌های بتنی پوشش تونل

هر حلقه سگمنتی در داخل ماشین حفاری تونل (TBM)، به وسیله دستگاه نصاب<sup>۱</sup> تشکیل می‌شود (شکل ۲-۱۴). فرآیند سوار کردن قطعات معمولاً شامل ساخت حلقه‌ها، از قرار دادن اولین سگمنت شروع می‌شود و در نهایت با قراردادن سگمنت کلید پایان می‌یابد.



شکل ۲-۱۴- فرآیند سوار کردن سگمنت‌ها و تشکیل حلقه‌های پوشش تونل (Guglielmetti, et al., 2007)

از نظر هندسی حلقه‌های تشکیل شده توسط دستگاه نصاب به سیلندرهایی تقسیم می‌شود که ممکن است؛ دارای سطح‌های موازی یا غیرموازی باشند (شکل ۲-۱۵) که در زیر تعریف می‌شوند:

- سطح‌های موازی (حلقه‌های مستقیم<sup>۲</sup>)
- سطح‌های غیرموازی (حلقه‌های باریک شونده دوزنقه‌ای<sup>۳</sup> و باریک شونده عادی<sup>۴</sup>)

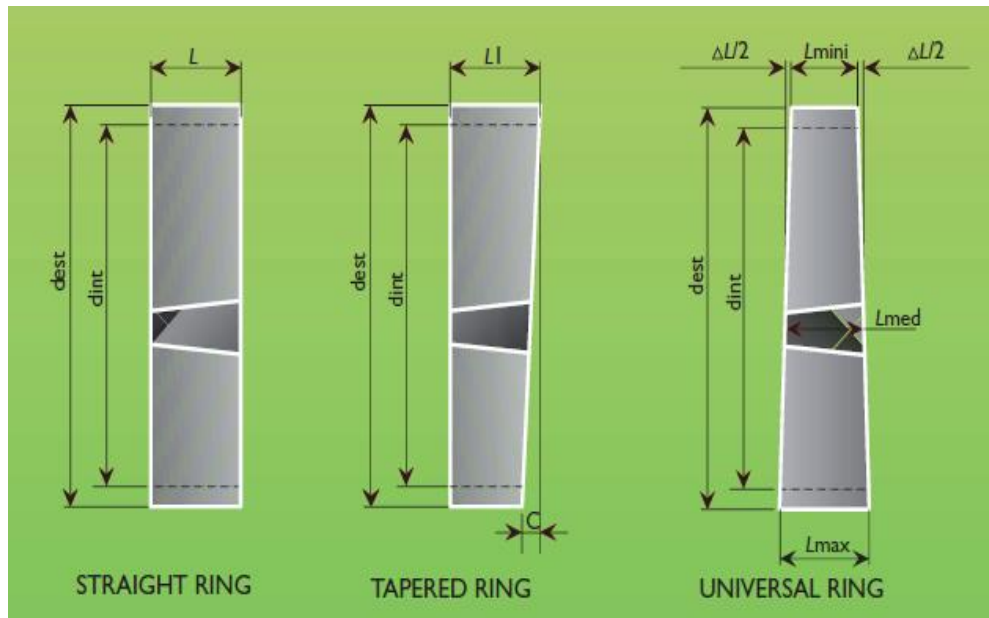
<sup>۱</sup> erector

<sup>۲</sup> straight ring

<sup>۳</sup> tapered trapezoidal ring

<sup>۴</sup> tapered universal ring

فرق بین این دو نوع (مستقیم و باریک‌شونده) از حلقه‌ها به انطباق‌پذیری آن‌ها در طی فرآیند سوار کردن آن‌ها برمی‌گردد اما آن‌ها عملکرد حلقه را تحت تاثیر قرار نمی‌دهند.



شکل ۲-۱۵- هندسه‌ی انواع مختلف حلقه‌های سگمندی (Guglielmetti, et al., 2007)

در نصب پوشش سگمندی باید موارد زیر مورد توجه قرار گیرد:

- قبل از شروع به ایجاد هر حلقه از پوشش سگمندی، هر نوع مصالح شل و لق و یا دیگر موانع باید از محیط ساخت خارج شود.
- تمامی سطوح سگمندی‌ها باید به طور کامل از مواد خارجی و خرده سنگ‌ها پاک شود.
- در زمان تزریق هر قسمت از پوشش، شکل حلقه باید تا زمان پایداری حلقه، حفظ شود.
- نصب پوشش‌های سگمندی باید با سامانه‌های مکانیکی یا دست کنترل شود و وسایل مکانیکی به کار رفته در نصب، آسیبی به پوشش نرسانند (Guglielmetti, et al., 2007).

## ۲-۵- انواع آسیب‌های وارده به سگمنت‌های بتنی

در همه مراحل تولید و نصب یک سگمنت، آسیب‌هایی بر آن وارد می‌شود. کاهش این آسیب‌ها می‌تواند باعث کاهش زیاد هزینه‌های ساخت شود. کاهش هزینه مستقیماً بوسیله کاهش در ترک- برداشتن سگمنت<sup>۱</sup>، تعمیر بعد از نصب و یا بطور غیرمستقیم با کاهش تاخیر در نصب بوجود می‌آید (Sugimoto, 2006).

### ۲-۵-۱- آسیب سگمنت<sup>۲</sup>

اولین آسیب در حین ساخت سگمنت بوجود می‌آید. مثالی از این آسیب‌ها، شکستن گوشه‌ها در نزدیکی پروفیل‌های ضد آب است؛ چون در این مناطق قالب‌بندی به صورت نواری است. تخریب سطح بتن یا ترک خوردگی در نتیجه برخورد، در حین جابجایی و انتقال اتفاق می‌افتد. این آسیب دیدگی‌ها می‌تواند تعمیر شود اما اغلب به خاطر کنترل کیفیت<sup>۳</sup> پذیرفته نمی‌شود (شکل ۲-۱۶).



شکل ۲-۱۶- شکسته شدن گوشه‌های سگمنت (پروژه قمرود، ایران)

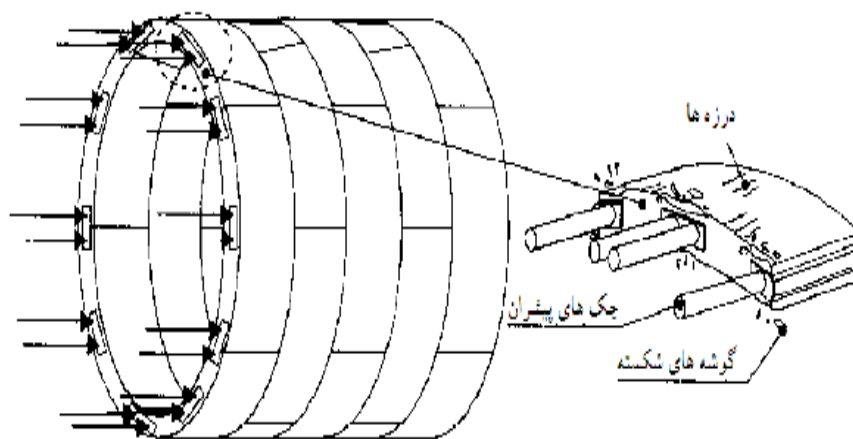
<sup>۱</sup> outburst of segment

<sup>۲</sup> damage of segment

<sup>۳</sup> strict tolerance demand



وقتی که ماشین حفار، شروع به حفاری می‌کند، جک‌های پیشران بر روی آخرین حلقه نصب شده فشار وارد می‌کند. این جک‌ها یک نیروی متمرکز بالا را که پیامد آن ایجاد ترک‌هایی به‌ویژه در مناطقی که ضخامت سگمنت به‌خاطر محفظه‌های بولت کاهش یافته است، اعمال می‌کنند. اغلب ترک‌های ریز قابل بهبود هستند، اما ترک‌های بزرگ باعث تراوش می‌شود که باقی می‌مانند. این ترک‌های تراوشی در صورت امکان تعمیر و یا تزریق می‌شوند. بخشی از ترک‌ها باعث خردشدن گوشه‌ها می‌شوند (شکل ۲-۱۷)، که اغلب در نتیجه تمرکز بالای نیرو در پوشش بتنی است (Sugimoto, 2006).


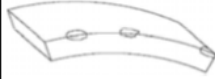


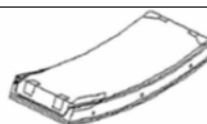
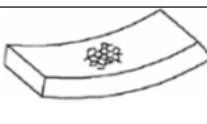




شکل ۲-۱۷- شکستگی‌ها در اثر نیروی جک (Wall, 1999)

## ۲-۵-۱-۱- طبقه‌بندی آسیب‌های سگمنت در طول ساخت

تجربه ناشی از تونل‌کاری سپری نشان داده که بیشتر آسیب‌هایی که سگمنت دچار آن می‌شود در اثر افزایش فشار زمین به علت نشست تحکیمی در اطراف تونل بعد از اتمام تونل‌کاری و تغییر فشار زمین به علت ساخت تونل‌های جدید در کنار تونل مورد نظر است (Sugimoto, 2006). جدول (۲-۴) یک طبقه‌بندی از آسیب سگمنت را در حین مرحله ساخت که بر مبنای مشاهدات عینی است، نشان می‌دهد.

جدول ۲-۴- طبقه‌بندی آسیب‌های سگمنت در طول ساخت (Sugimoto, 2006)

شماره	نوع آسیب‌دیدگی	شکل	شماره	نوع آسیب‌دیدگی	شکل
۱	ترک‌خوردگی در جهت محوری		۵	از بین رفتن بتن در سطح خارجی سگمنت	
۲	ترک‌خوردگی در جهت محیطی		۶	ترک‌های مویی در سطح داخلی سگمنت	
۳	خردشدگی گوشه‌های سگمنت		۷	وجود ترک‌های غیر قابل مشاهده	
۴	از بین رفتن بتن در نزدیکی محفظه بولت‌های سگمنتی		۸	پنجش میله‌های طولی در سگمنت‌های فولادی	

## ۲-۵-۱-۲- آسیب‌های سگمنت پس از اجرا

- خرابی ناشی از سایش به دلیل برخورد ذراتی از قبیل سیلت، ماسه، شن و قلوه سنگ و حتی یخ با سطح بتن در تونل‌های انتقال آب
- واکنش ترکیبات شیمیایی موجود در بتن سخت شده با آب، اسیدها و نمک‌ها
- خوردگی آرماتورها
- واکنش بین یون‌های OH مربوط به قلیایی‌های سیمان ( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ) و مواد سیلیسی موجود در بعضی از سنگدانه‌های بتن
- واکنش بین قلیایی‌های سیمان و بعضی از انواع سنگ‌های آهکی دولومیتی که سبب انبساط بتن می‌شود (سعیدی و طارمی، ۱۳۹۰).

## ۲-۶- خلاصه فصل

در این فصل کلیاتی راجب به نگهداری سگمنتی، ویژگی‌ها و پارامترهای طراحی و همچنین آسیب‌های احتمالی آمده است. ابتدا انواع نگهداری‌هایی که در حالت حفاری تمام مقطع مورد استفاده قرار می‌گیرد بحث شده که شامل نگهداری لوله‌ای (لوله‌رانی)، نگهداری درجا، نگهداری سگمنتی است. پارامترهای طراحی پوشش‌های سگمنتی که شامل پارامترهای هندسی و سامانه‌های درزه در این نوع نگهداری‌ها و همچنین انواع اتصالات از جمله بولت‌ها و داوول‌ها نیز مورد بحث قرار گرفته است. در ادامه نیز فرآیند تشکیل حلقه‌های سگمنتی و آسیب‌های وارده بر آن‌ها، شامل آسیب‌های حین اجرا و بعد از آن بررسی شده است. در فصل بعد فرآیند طراحی نگهداری سگمنتی و جنبه‌های آن بیان خواهد شد.



## فصل سوم

### فرآیند طراحی نگهداری سگمنتی

### ۳-۱- مقدمه

به طور کلی مراحل طراحی تونل‌های حفر شده با TBM به صورت زیر است (Toan, 2000, ITA, 2006):

۱. تعیین پارامترهای هندسی: قطر حفاری، قطر نگهداری، ضخامت نگهداری، طول حلقه‌ها، تعداد سگمنت‌ها و نوع بولت‌ها

۲. انتخاب مقاطع بحرانی: روباره، بار زنده، آب زیرزمینی و سازه‌های نزدیک تونل

۳. تعیین داده‌های مکانیکی TBM: فشار همجواری، اضافه حفاری، طول TBM، نیروی پیشران کل، تعداد جک‌های پیشران، فشار تزریق و فضا برای نصب سگمنت‌ها  
۴. تعیین خصوصیات مواد:

✓ مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته بتن

✓ نوع و مقاومت کششی آرماتور

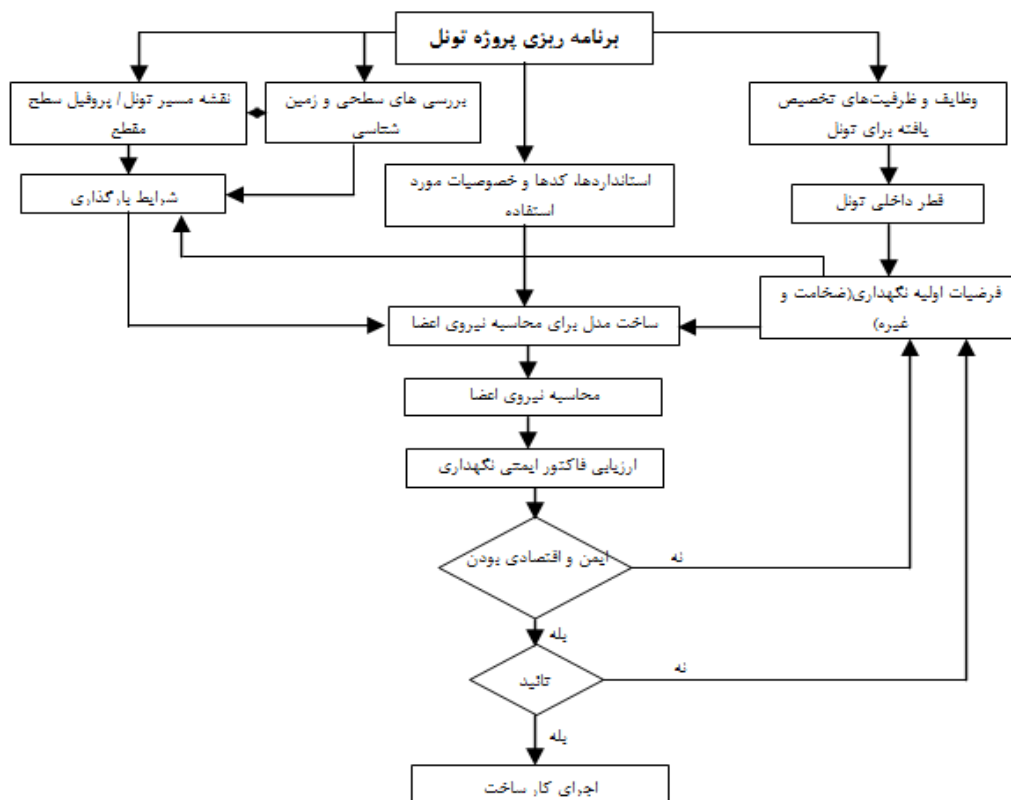
✓ نوع، قطر و فاصله مجاز درزگیر

۵. بارهای طراحی: فشار زمین، فشار آب، بارهای ساخت

۶. مدل طراحی: مدل تجربی، مدل تحلیلی و مدل عددی

۷. نتایج محاسبات: نیروی محوری، گشتاور خمشی، برش، تغییر شکل‌های ایجاد شده

طراحی نگهداری تونل، مطابق ترتیبی که در شکل ۳-۱ نشان داده شده است، از یک برنامه کاری پیروی می‌کند.



شکل ۳-۱- روندنمای طراحی نگهداری سگمنتی (Ozgen, 2010؛ ITA, 2000)

### ۳-۲- شرایط بارگذاری

سامانه نگهداری تونل در پشت TBM باید تمامی نیروها، به‌ویژه در حین نصب و پیشروی دستگاه به سمت جلو را بدون تغییر شکل تحمل کند. بارهایی که در طراحی و ساخت نگهداری بتنی باید مورد توجه قرار گیرد به‌صورت زیر است (Toan, 2006):

- فشار افقی و عمودی زمین
- فشار آب
- بار مرده
- اندرکنش خاک
- بارهای داخلی
- بارهای اعمال شده در حین ساخت

- بار ناشی از زلزله

- بار ناشی از سازه‌ها و تونل‌های حفاری شده در نزدیکی تونل

ترکیب مختلفی از بارهای ذکر شده در بالا می‌تواند در طول عمر تونل مورد توجه قرار گیرد. در جدول ۱-۳ یک طبقه بندی در مورد این ترکیب بارها ارائه شده است.

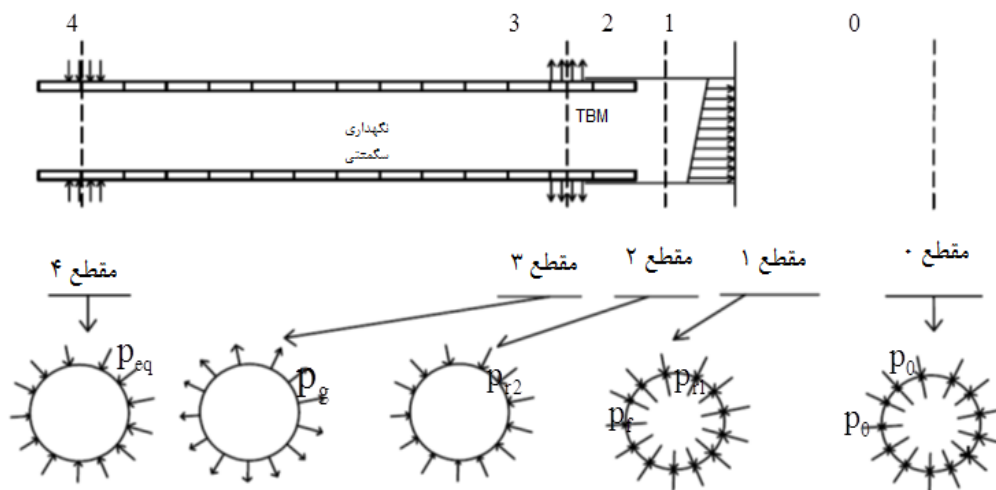
جدول ۱-۳- انواع بارهای وارد بر پوشش نگهداری (Ozgen, 2010، Sugimoto, 2006)

بار	نوع
بارهای افقی و عمودی زمین فشار آب وزن مرده تاثیر روباره اندرکنش خاک	بارهای اصلی
بارهای داخلی بارهای ناشی از ساخت بار زلزله	بارهای ثانویه
تاثیر تونل‌های مجاور تاثیر کارهای انجام شده در نزدیک تونل تاثیر نشست زمین بارهای دیگر	بارهای خاص

در شکل ۲-۳ فرآیند حفاری توسط TBM بر اساس نیروهایی که به سپر و سامانه نگهداری وارد می‌شود، مشخص شده است. سطح مقطع صفر، دور از جبهه کار قرار دارد، جایی که هنوز تونل اثری بر روی تنش‌های اولیه ندارد. سطح مقطع ۱، در جبهه کار تونل قرار دارد، جایی که کله حفار TBM در تماس با زمین است. در سطح مقطع ۲، شرایط بارهایی که به علت همگرایی زمین بر روی سپر وارد می‌شود، نشان داده شده است. در سطح مقطع ۳ نیز نگهداری تحت تاثیر بار ناشی از تزریق

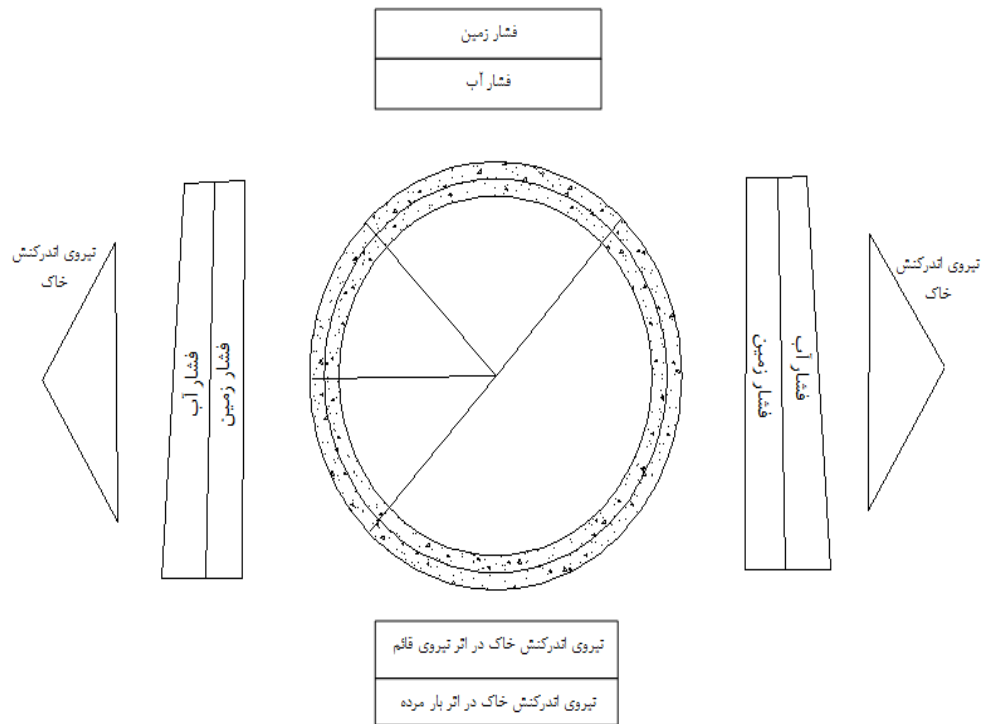


است. سطح مقطع ۴ نیز نیروهایی را که بطور دایم بر روی نگهداری وارد می‌شود، نشان داده است (Toan, 2006).



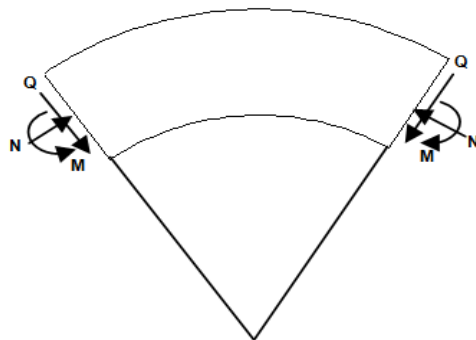
شکل ۳-۲- فرآیند حفاری توسط ماشین حفار (Toan, 2006)

در رابطه با بارهایی که به سگمنت وارد می‌شود، بارهایی از قبیل بار ناشی از حمل و نقل، اتصال سگمنت برای ایجاد حلقه سگمنتی، نیروی پیشروی جک‌ها و بار ناشی از تزریق در مورد طراحی زیاد مورد توجه نیستند. شکل ۳-۳ بارهایی که در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد را نشان می‌دهد. این نیروها برای طراحی سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۳- بارهایی که در طراحی مورد استفاده است (Ozgen, 2010، Toan, 2006، Ding, 2004).

در شکل ۳-۴ بارها در داخل یک مقطع نشان داده شده است که به سه صورت نیروی محوری (N)، نیروی برشی (Q) و گشتاور خمشی (M) هستند.



شکل ۳-۴- نمادهای به کار رفته برای نیروی محوری، گشتاور خمشی و نیروی برشی (Toan, 2006)

### ۳-۲-۱ - بار مرده

بار مرده ناشی از نگهداری، باید طبق معادله زیر محاسبه شود (Toan, 2006):

$$g_1 = \frac{W_1}{2\pi \cdot R_c} \quad (۱-۳)$$

به طوری که

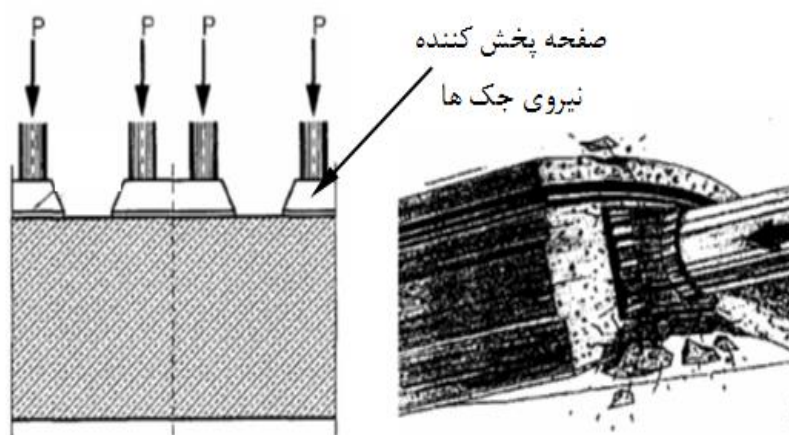
$g_1$ : بار مرده به ازای واحد طول (در جهت شعاعی) نگهداری که در جهت مرکز ثقل نگهداری وارد می شود.

$W_1$ : بار مرده نگهداری

$R_c$ : شعاع داخلی نگهداری

### ۳-۲-۲ - بار جک‌های پیشران

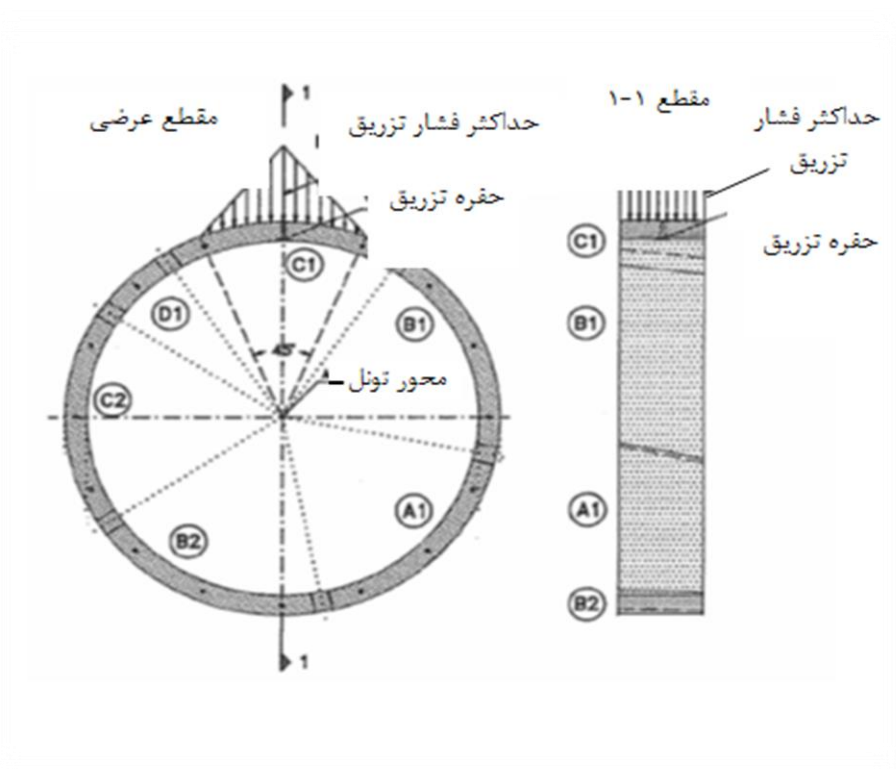
در طول مرحله ساخت تونل، سگمنت‌ها باید بار ناشی از جک‌های پیشران و بار تزریق را تحمل کنند. نیروی پیشروی ناشی از جک‌های TBM، باری است که جک‌ها به سگمنت‌ها وارد می‌کنند تا ماشین را به طرف جلو هل دهند و این نیرو تاثیر بسیار زیادی بر روی سگمنت‌ها (در حین مرحله ساخت) دارد (شکل ۳-۵). لذا باید در مورد تاثیر این نیروها بر روی سگمنت تحقیق شود.



شکل ۳-۵ - صفحه پخش کننده نیروی جک‌ها و ترک خوردگی در سطح بتن (Toan, 2006، ITA, 2000)

### ۳-۲-۳- بار ناشی از تزریق

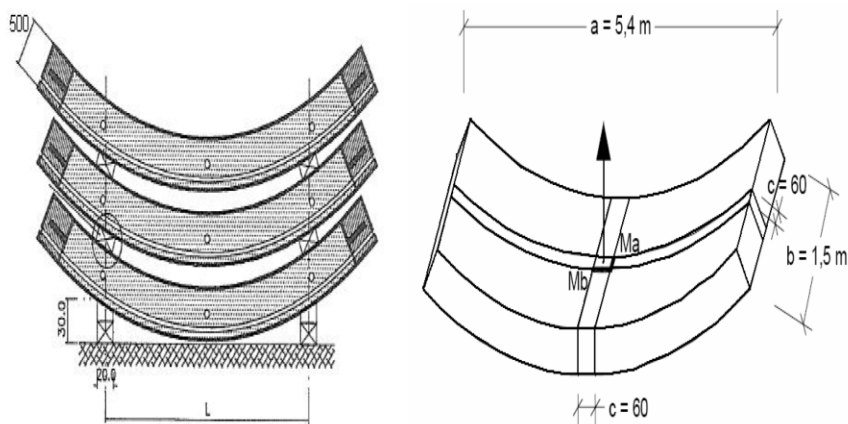
تزریق به منظور پرکردن فضای خالی پشت سگمنت‌ها انجام می‌شود تا این فضای خالی باعث نشست در سطح زمین نشود. وقتی که سپر از پشت سگمنت خارج می‌شود بار تزریق بر روی سطح خارجی سگمنت تاثیر می‌گذارد. در حالت معمولی، وقتی از دوغاب با جریان پذیری بالا استفاده می‌شود، فشار ناشی از تزریق را می‌توان بصورت ثابت در اطراف حلقه محاسبه کرد. تزریق حفره‌های اطراف سگمنت با فشار حداقل یک بار انجام می‌گیرد. علاوه بر تزریق اولیه، تزریق ثانویه نیز در پشت سگمنت‌ها انجام می‌شود که باعث افزایش فشار در پشت حلقه می‌شود. تاثیر تزریق فضاهای خالی را می‌توان به صورت یک بار مثلی بر روی سگمنت در نظر گرفت که در محل حفره تزریق مقدار این بار حداکثر است و با حرکت به اطراف سگمنت مقدار این بار تا صفر کاهش پیدا می‌کند (شکل ۳-۶). در جهت طولی نیز مقدار این بار ثابت در نظر گرفته می‌شود (Toan, 2006).



شکل ۳-۶- فشار تزریق بر روی سگمنت (Toan, 2006، ITA, 2000)

### ۴-۲-۳- بار ناشی از انبار کردن سگمنت‌ها

وقتی که سگمنت‌ها از قالب خارج شدند، برای انبار کردن، آن‌ها را بر روی هم قرار می‌دهند. معمولاً برای مراقبت از سگمنت‌ها، بین آن‌ها بلوک‌های چوبی قرار می‌دهند (شکل ۷-۳). این عملیات (خارج کردن سگمنت از قالب و انبار کردن آن) باعث ایجاد گشتاور خمشی در سگمنت می‌شود.



شکل ۷-۳- نیروی بوجود آمده در اثر انبار کردن سگمنت (Chen, 2007، ITA, 2000، Toan, 2006)

برای پیدا کردن این گشتاور، باید گشتاور در دو جهت مطابق شکل ۷-۳ محاسبه شود که برای محاسبه می‌توان از فرمول‌های ۲-۳ و ۳-۳ استفاده کرد:

$$M_a = 0.125 \times \gamma \times b \times d \times l^2 \quad (2-3)$$

$$M_b = 0.5 \times \gamma \times b \times d \times l^2 \quad (3-3)$$

مقدار بدست آمده از دو فرمول با هم مقایسه می‌شود، هر کدام بزرگتر باشد از آن برای محاسبه و طراحی استفاده می‌شود (Chen, 2007).

### ۳-۲-۵- بار ناشی از نصب سگمنت‌ها

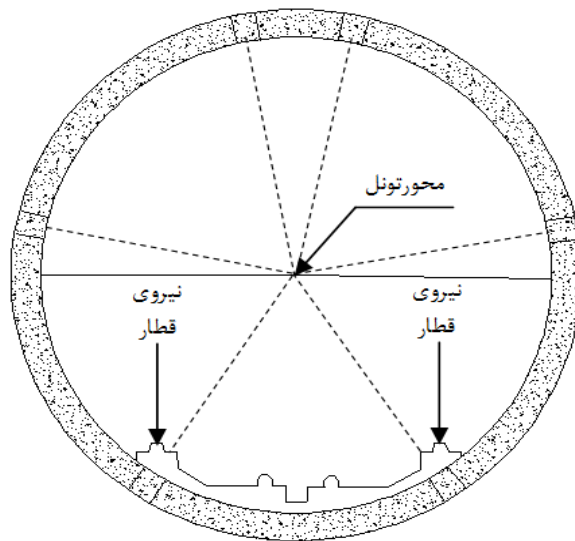
در طول نصب سگمنت‌ها، پوشش تحت تاثیر مجموعه‌ای از نیروها از جمله: نیروی فشاری ناشی از جک‌های طولی TBM، نیروی برشی به علت تغییر شکل متفاوت حلقه‌های مجاور هم، نیروی که در اثر نصب سگمنت به آن وارد می‌شود، ضربات ناشی از به هم خوردن سگمنت‌ها و نیروی ناشی از قرار دادن سگمنت‌ها در یک حلقه است.

### ۳-۲-۶- بار ناشی از وزن قطار

بارهای وارده ناشی از وزن و ترافیک داخل تونل‌ها کاملاً تابع نوع قطارهای مورد استفاده است. لذا بار نهایی شامل بارهای بهره‌برداری با اثر ضربه، بارگذاری خروج از خط و بارهای گریز از مرکز و تاثیر نوسانات جانبی است (Toan, 2006، ITA, 2000). تاثیر بار قائم بر روی ریل و از ریل به تراورس و در نهایت سازه اصلی تونل با در نظر گرفتن ضریب ضربه لحاظ می‌شود و بار جانبی ناشی از خارج شدن از خط که عموماً در طراحی‌ها برای ۴۰ درصد وزن یک واگن که در ارتفاع ۱۰۵ سانتی متری از سطح روی ریل به صورت افقی وارد می‌کند، توصیه می‌شود (شکل ۳-۸).

### ۳-۲-۷- سایر نیروهای وارد بر سگمنت

ارزیابی خصوصیات دینامیکی زمین اطراف در جاهایی که از لحاظ زلزله مستعد هستند، اهمیت زیادی دارد. همچنین نیروهایی که ناشی از تغییرات دمایی در تونل‌های حفاری شده در عمق زیاد و تونل‌های انتقال انرژی هستند باید مورد توجه قرار گیرند.



شکل ۳-۸- گسترش وزن قطار (ITA, 2000, Toan, 2006)

### ۳-۳- طراحی سگمنت

یک طرح کلی نقش خیلی مهمی را در طراحی تونل ایفا می‌کند، به‌ویژه آنکه تونل تحت چندین نوع بارگذاری از قبیل نیروی نرمال، نیروی پیشران جک‌ها، نیروی اتصالات دایروی و غیره طراحی می‌شود. یک سگمنت تونل برای همه این موارد بارگذاری که در طول پیشروی تونل به هر یک از سگمنت‌ها وارد می‌شود، طراحی می‌گردد، که این عامل باعث طراحی محافظه‌کارانه<sup>۱</sup> خواهد شد. این شرایط به اهمیت یک فرض خوب و دقیق با توجه به طرح کلی یا مدل محیط و اجزای سازه-ای تاکید می‌کند. قبل از انجام طراحی، هرچند که توصیف یک ماده غیرهمگن از قبیل خاک و سنگ با در دست داشتن چند نمونه محدود، کار خیلی مشکلی است، یک طرح کلی از محیط دربرگیرنده تونل آماده می‌شود. به همین دلیل سنگ، یک جز غیر قابل اطمینان در نظر گرفته می‌شود که نتیجه استفاده از آن اعمال یک ضریب ایمنی بزرگ است. بنابراین در بیشتر تحقیقات و استفاده از مدل-سازی عددی پیچیده، زمین همیشه یک جز غیر قابل اطمینان و یک عامل غیر دقیق در طراحی نگهداری تونل است. برای محاسبه گشتاورها و نیروهای نرمال که به علت بارگذاری خارجی در اثر

<sup>۱</sup> over design

محیط سنگی اطراف تونل ایجاد شده‌اند، از مدل‌سازی استفاده می‌شود. به علت غیردقیق بودن فرضیات مدل‌سازی خاک و سنگ، تخمین بارگذاری در آن‌ها اغلب غیردقیق است که با اعمال یک روش نگهداری ایمن، این عدم دقت‌ها تا اندازه‌ای برطرف می‌شود. مشکل اصلی این کار این است که سازه باید به صورت محافظه‌کارانه طراحی شود، اما اگر این روش نگهداری نادیده گرفته شود مخاطره ریزش سازه خیلی زیاد خواهد بود (Blom, 2002، Guglielmetti, et al., 2007).

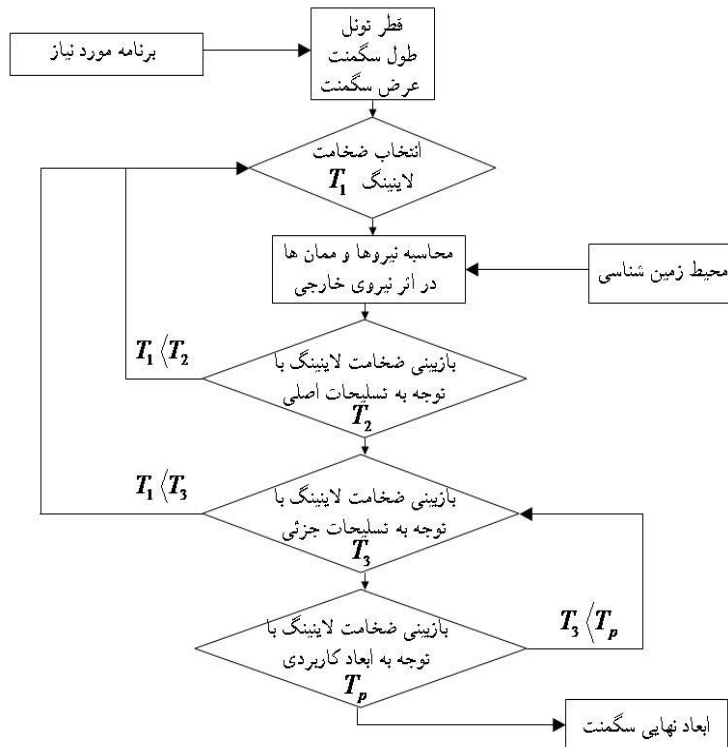
یکی از جنبه‌های هندسی سازه، ضخامت است که تاثیر زیادی بر روی هزینه‌های تولید دارد. طراحی نگهداری تونل یک فرآیند تکراری است که ابتدا ضخامت نگهداری به عنوان پارامتر ورودی برای محاسبات تعیین می‌شود. سپس این ضخامت با استفاده از فرضیات اولیه برای تایید بازبینی می‌شود (Kasper, 2008).

### ۳-۱- فرآیند طراحی

بدست آوردن ضخامت حداقل نگهداری با بهینه‌سازی خصوصیات مواد مصرفی برای فرآیند طراحی به طوری که ابعاد مناسب سگمنت بدست آید، یک امر مهم است. وقتی که مشخصات تونل با استفاده از نتایج یک تحقیق وسیع در سنگ بدست آمد، طراحی واقعی نگهداری تونل شروع می‌شود که مرحله بعد از آن طراحی کلی سگمنت بوسیله کنترل محاسبات است (شکل ۳-۹). بعد از آن طرح کلی زمین‌شناسی محیط اطراف در داخل یک مدل وارد می‌شود. برای تعیین نیروها و گشتاورهای داخلی در اثر بارگذاری خارجی از یک مدل محاسباتی استفاده می‌شود. یک ضخامت اولیه نگهداری برای شروع محاسبات و تعیین اندازه نیروهای متقاطع، نیاز است که اغلب به عنوان یک عدد سرانگشتی مقدار  $\frac{1}{20}$  قطر داخلی تونل را به عنوان مقدار اولیه انتخاب می‌کنند. بعد از محاسبه نیروها، گشتاورها و تغییرشکل‌ها در سطح مقطع و در جهت محوری، مقدار و نوع تقویت‌های بتن می‌تواند تعیین شود. برای حداقل کردن مقدار تقویت به کار رفته، محاسبات کنترل می‌شود. اگر میزان تقویت انتخاب شده با استفاده از ضخامت اولیه نگهداری، قواعد طراحی را تامین کند، برای بهینه‌کردن

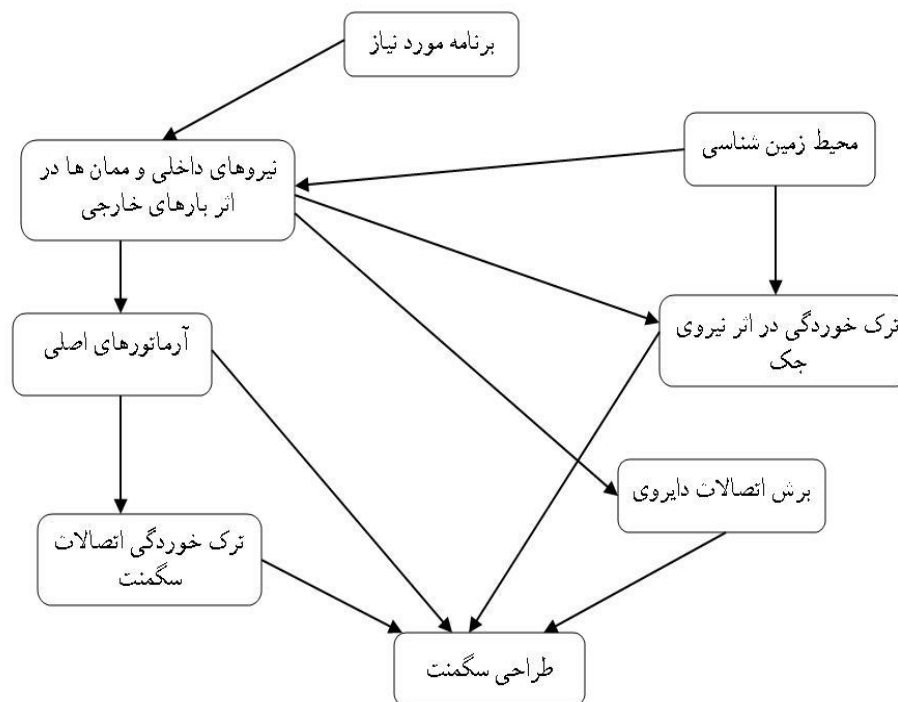


هندسۀ سگمنت از محاسبات اضافی کاسته می‌شود (Wall, 1999).



شکل ۳-۹- روش طراحی سگمنت به وسیله کنترل محاسبات (Wall, 1999)

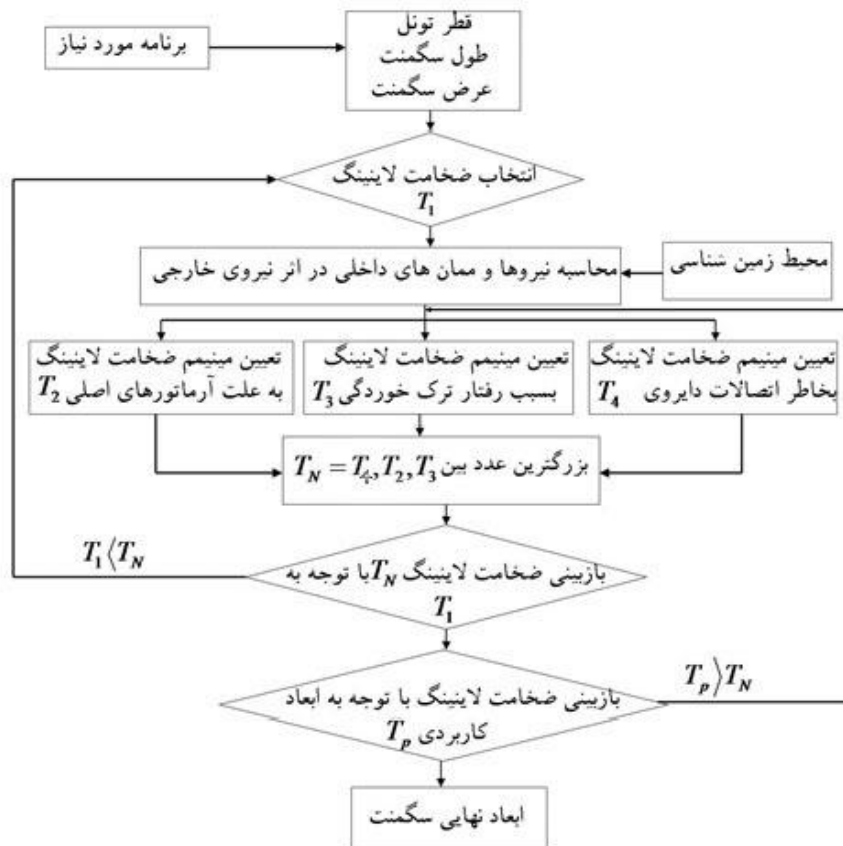
در عمل، طراحی سگمنت خیلی پیچیده‌تر از روندنمای پیشنهادی در شکل ۳-۹ است. با توجه به اینکه طراحی، به کاهش هزینه‌ها با کاهش ضخامت و از طرفی کاهش مخاطره با اعمال ضریب ایمنی بالا نیازمند است؛ ارتباط اجزای اصلی تاثیرگذار در طراحی بسیار مهم خواهد بود. شکل ۳-۱۰ رابطه شماتیک بین قسمت‌های مختلف طراحی تونل‌زنی سپری را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۰- رابطه شماتیک بین قسمت‌های مختلف تونل‌زنی سپری (Wall, 1999)

### ۳-۳-۲- روندنمای طراحی بهینه

پارامترهای هندسی اصلی سگمنت از قبیل طول و عرض، عوامل خیلی مهمی در کاهش هزینه‌های نگهداری نیستند. پارامتر اصلی ضخامت سامانه نگهداری است. یک تغییر در این پارامتر هندسی تاثیر زیادی در حمل و نقل و در حین نصب می‌گذارد. بنابراین این پارامتر جهت بهینه کردن سگمنت‌ها مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. یک طراحی بهینه سگمنت، با توجه خاص به نگهداری، می‌تواند با استفاده از راه‌های مختلفی انجام شود. روش ساده برای بهینه‌سازی ضخامت سگمنت، تعیین ضخامت نگهداری و تقویت‌های بتن مورد نیاز برای هر یک از وضعیت‌ها به صورت جداگانه و انتخاب بزرگترین آن‌ها است (شکل ۳-۱۱). بطوری‌که هر یک از وضعیت‌های بارگذاری را ارضا کند. این روش یک بهسازی ناچیز روی کنترل محاسبات است هرچند بسته به روش‌های طراحی مختلف دارای یک‌سری نواقص است (ITA, 2000).



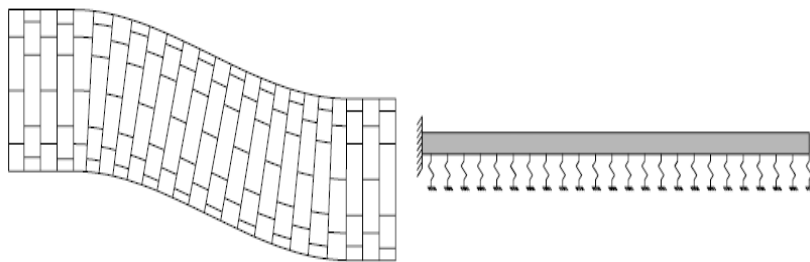
شکل ۳-۱۱- روندنمای طراحی سگمنت (ITA, 2000).

### ۳-۴- اندرکنش تیر

در اغلب مدل‌سازی‌ها، بر رفتار یک حلقه‌ی پوشش تونل توجه می‌شود، اما به‌دلیل پیوند بین حلقه‌ها، جابجایی غیر یکنواخت بین دو حلقه باعث اندرکنش آن‌ها می‌شود، لذا باید دو حلقه مجاور مدل‌سازی و آنالیز شود. تغییر شرایط زمین در مسیر تونل باعث ایجاد جابجایی‌های غیریکنواخت در سامانه نگهداری می‌شود. تاثیر این نوع جابجایی‌های غیریکنواخت بر روی سامانه نگهداری فقط در صورتی که چندین حلقه مدل شوند می‌توانند مورد بررسی قرار گیرد. آنالیز این گونه تغییرات شرایط بارگذاری در جهت محوری، اندرکنش تیر نامیده می‌شود. تحقیقات بسیار کمی در مورد تاثیر این نوع جابجایی‌ها و چگونگی مدل کردن انجام شده است (Blom, 2002).

تاثیر بازشدگی و برش در اتصالات رینگی بر روی نیروهای بوجود آمده در سگمنت‌ها و تاثیر نر و مادگی در این اتصالات باید مورد بررسی قرار گیرد (Luttikholt, 2007).

یک روش ساده برای تعیین نیروهای بوجود آمده در اثر این گونه جابجایی‌ها در مسیر تونل، مدل تیر پیوسته نگهداری شده با فنر است (شکل ۳-۱۲). این نوع مدل بازشدگی اتصالات را شبیه سازی نمی‌کند ولی می‌تواند گشتاور خمشی در جهت محوری نگهداری را تخمین بزند. برای بدست آوردن جواب‌های دقیق‌تر باید خصوصیات معادل مواد که از تحلیل‌های پیچیده بدست می‌آید به تیر اعمال شود (Luttikholt, 2007).



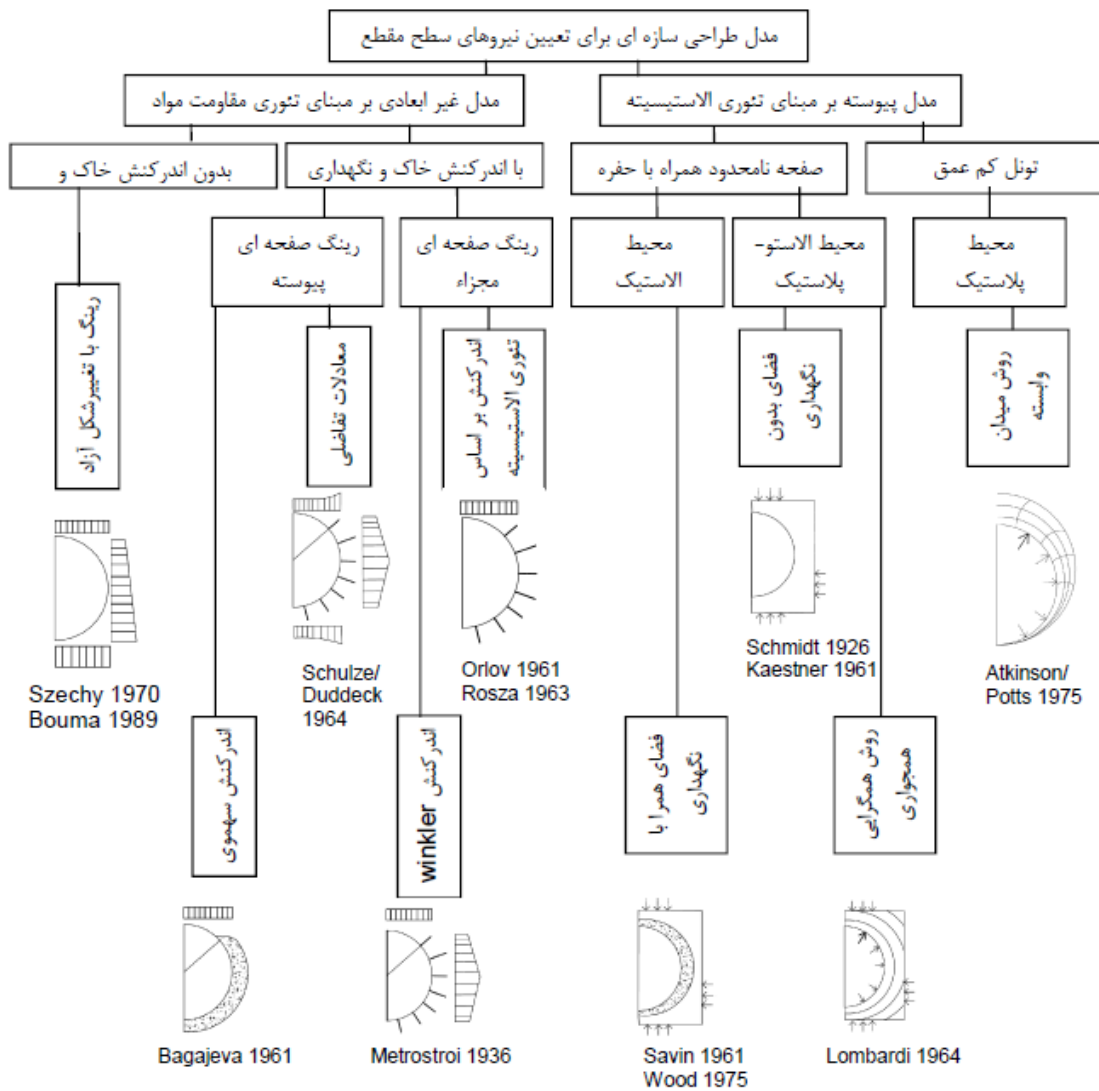
شکل ۳-۱۲- تغییر شکل پوشش و مدل ساده اندرکنش تیر (Luttikholt, 2007).

### ۳-۵- مدل طراحی سازه‌ای

مدل طراحی سازه‌ای، که برهم کنش بین سازه و زمین مجاور را با استفاده از قوانین ریاضی بیان می‌کند، می‌توان به دو بخش تقسیم کرد: اولی مدلی بر مبنای تئوری مقاومتی مواد است که نیروهای داخلی را تعیین می‌کند و دومی مدلی بر مبنای تئوری الاستیسیته است که تنش و کرنش‌های داخلی را تعیین می‌کند. این دو مدل امکان کاربرد در یک مدل طراحی سازه‌ای را دارا هستند البته موارد زیر باید لحاظ گردد (Klappers, et al., 2006):

- امکان مدل کردن عوامل مهم از قبیل رفتار زمین، هندسه تونل، نیروها، ممان‌ها و تنش‌ها وجود داشته باشد.
- توانایی مدل کردن وضعیت نیروها و برهم کنش سازه-زمین را، به خوبی داشته باشد.
- به آسانی قابل استفاده برای طراحان باشد.

بدون توجه به پیچیدگی‌های یک مدل به‌خصوص، هر مدلی بر اساس یک اصل کلی است. یکی از این اصول اساسی، تئوری مقاومت مواد است که بر مبنای تعادل نیروهای داخلی و خارجی است. مشخصه خاص در این گروه، شبیه سازی زمین بوسیله فنر است. تفاوت اصلی بین مدل‌های مختلف ناشی از تفاوت وضعیت بارگذاری و یا طرح نگهداری است. در گروه دیگر مدل‌ها، برهم کنش سازه-زمین با استفاده از یک وسیله الاستیک توصیف می‌شود که بر مبنای سازگاری تنش-تغییرشکل است. شکل ۳-۱۳ مدل‌های ممکن را نشان می‌دهد (Wall, 1999).

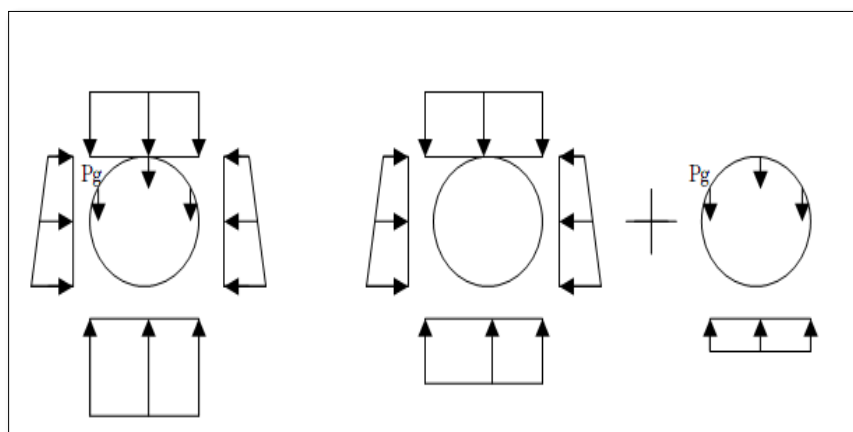


شکل ۳-۱۳- مدل‌های طراحی سازه‌ای برای بدست آوردن نیروهای سطح مقطع ( Wall, 1999, IFTA, 2000, Ifitimie, 1996 )

نیروهای اعضا<sup>۱</sup> و طراحی پوشش سگمنتی را با روش‌های مختلفی می‌توان ارزیابی کرد، که معمولاً بر مبنای دو حالت بارگذاری مستقیم و بارگذاری غیرمستقیم هستند. در روش بارگذاری مستقیم از یکسری فنر به عنوان تکیه‌گاه ارتجاعی استفاده می‌شود. این روش می‌تواند شرایط زیر را ارزیابی کند:

- ✓ تغییر یکنواخت بار به واسطه تغییر شرایط زمین
- ✓ فشار هیدروستاتیک آب
- ✓ نیروی فنر برای شبیه‌سازی عکس‌العمل بستر
- ✓ بارهای نامتقارن شکل
- ✓ اثر درزه با شبیه‌سازی آن با لولا یا فنرهای پیچشی

اگر عکس‌العمل بستر در برابر جابجایی برای بار مرده در نظر گرفته نشود، لازم است که به صورت جداگانه نیروهای داخلی حاصل شده از بار مرده با معادلات الاستیک محاسبه و سپس به نیروهای داخلی ایجاد شده توسط سایر بارها، اضافه شود. در این روش هم عکس‌العمل عمودی و هم عکس‌العمل مماسی بستر را می‌توان به حساب آورد. در شکل ۳-۱۴ مدل‌های بارگذاری قابل قبول برای روش بارگذاری مستقیم را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۴- مدل‌های بارگذاری قابل قبول برای روش بارگذاری مستقیم (Hefny et al., 2004)

<sup>۱</sup> Member force

در روش بارگذاری غیرمستقیم زمین و سازه با هم مدل می‌شوند. در این روش مدول دگر-شکل‌پذیری و ضریب پواسون زمین باید معلوم باشد. در طراحی با این روش، پوشش قطعه‌ای با المان تیر ارزیابی می‌شود. در این روش نه تنها نیروهای داخلی پوشش تونل بلکه جابجایی و حالت تنش- کرنش زمین اطراف و اثر حفر تونل بر سازه‌های بالا یا مجاور تونل را نیز می‌توان برآورد نمود. این روش را می‌توان با مزایای زیر به کار برد:

✓ رفتار زمین را می‌توان با در نظر گرفتن حالت اولیه تنش زمین، پارامترهای زمین از قبیل وزن مخصوص، مدول دگرشکل‌پذیری، ضریب پواسون، شکل و اندازه‌ی مقطع تونل، روش اجرا شامل مراحل مختلف آن را ارزیابی نمود.

✓ بررسی رفتار پوشش در برابر بارهای وابسته به ساختار پوشش (تعداد قطعات، شکل آن‌ها و نوع درزه)، تزریق در پشت پوشش و ... امکان‌پذیر است.

در ادامه تعدادی از روش‌های طراحی مبتنی بر این حالات آمده است.

### ۳-۵-۱- روش حل معادلات استاتیکی

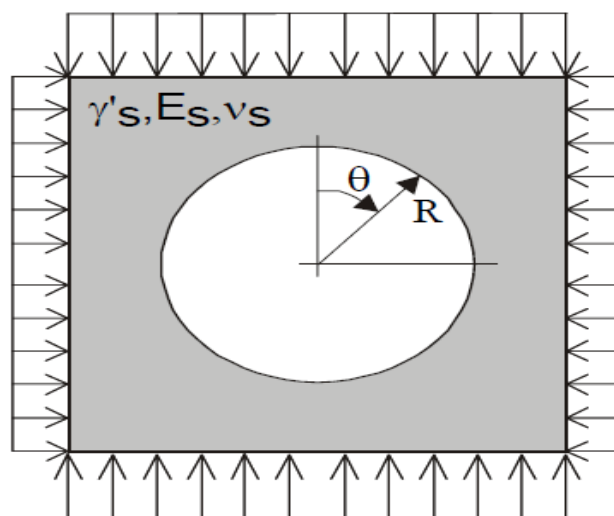
روش حل معادلات استاتیکی یک روش ساده برای محاسبه‌ی نیروهای داخلی با استفاده از روابط ریاضی است که توسط انجمن تونل‌سازی معرفی شده است و با توجه به اینکه ضرایب بار در آن در نظر گرفته نشده است، ضریب ایمنی مقطع بحرانی باید با استفاده از روش تنش مجاز بررسی شود و مقطع با حداکثر گشتاور خمشی مثبت و منفی و مقطع با حداکثر نیروی محوری بررسی شود (فرخ، ۱۳۸۶).

### ۳-۵-۲- مدل پیوسته

راه حل تحلیلی برای یک تیر دایروی با استفاده از یک مدل الاستیک خطی پیوسته<sup>۱</sup> بدست می‌آید. در اینجا فرض می‌شود که نگهداری دایروی در اثر فشار زمین به صورت بیضوی تغییرشکل می‌دهد. یک مشخصه بارز در این مدل، پیشنهاد یک اتصال کامل است که در جهت شعاعی و مماسی بین

<sup>۱</sup> Linear-elastic continuum

زمین و نگهداری، به طور اتوماتیک انجام می‌شود. در مورد تونل‌کاری با استفاده از سپر، طراحان ترجیح می‌دهند زمین را به صورت پیوسته نشان دهند، زیرا توصیف رفتار واقعی زمین بهتر از نشان دادن آن به صورت فنر است. مدل پیوسته را می‌توان به صورت شکل ۳-۱۵ نشان داد. پارامتر مهم در این مدل ضریب پواسون، مدول دگرشکل‌پذیری و وزن مخصوص زمین اطراف تونل است (Erdmann, 1983).



شکل ۳-۱۵- تصویر شماتیک مدل پیوسته (Erdmann, 1983)

### ۳-۵-۳ - روش مویرود<sup>۱</sup>

این روش اولین گام محققین برای وارد کردن درزه‌ها در محاسبات طراحی محسوب می‌شود و تا پیش از آن معمولاً محققین مختلف از وارد کردن درزه‌ها در محاسبات صرف نظر می‌کردند. بر این اساس مویرود در سال ۱۹۷۵ رابطه‌ی زیر را برای تعیین گشتاور اینرسی موثر پوشش نگهداری سگمنتی معرفی کرد:

$$I_e = I_j + \left(\frac{4}{n}\right)^n \cdot I \quad , \quad I_e < I \quad , \quad n > 4 \quad (4-3)$$

<sup>۱</sup> Muir wood



که در آن

$I_e$ : مقدار گشتاور اینرسی موثر

$I_j$ : مقدار گشتاور اینرسی موثر بر روی درزه‌ها

$I$ : گشتاور اینرسی پوشش نگهداری

$N$ : تعداد سگمنت‌ها در یک حلقه است (Hefny, et al., 2004 , Klappers, et al., 2006).

در این روش مویروود با بیان گشتاور اینرسی موثر برای پوشش سگمندی از تاثیر مستقیم تعداد و آرایش درزه‌ها در محاسباتش صرف نظر کرد و یک فرمول تجربی را برای تخمین اثر درزه‌های طولی در حلقه‌های از هم مجزا معرفی کرد که توسط این فرمول می‌توان با کاهش سختی خمشی پوشش سگمندی، آن‌را با یک پوشش صلب همگن جایگزین کرد. بیشترین گشتاور خمشی محاسبه شده به وسیله‌ی این روش کاملاً با بیشترین گشتاور خمشی محاسبه شده برای حلقه‌های مجزای درزه‌دار هم‌خوانی دارد. مویروود نهایتاً به این نتیجه رسید که برای تونل‌های با پوشش سگمندی کمتر از چهار درزه، درزه‌ها تاثیر قابل ملاحظه‌ای در نیروهای داخلی و استحکام پوشش سگمندی ندارند. به هرحال این نظریه برای بدست آوردن ایده‌ی اولیه از نیروهای داخلی پوشش سگمندی کاملاً مفید است (Hefny et al., 2004).

### ۳-۵-۴ - مدل شولز - دودک<sup>۱</sup>

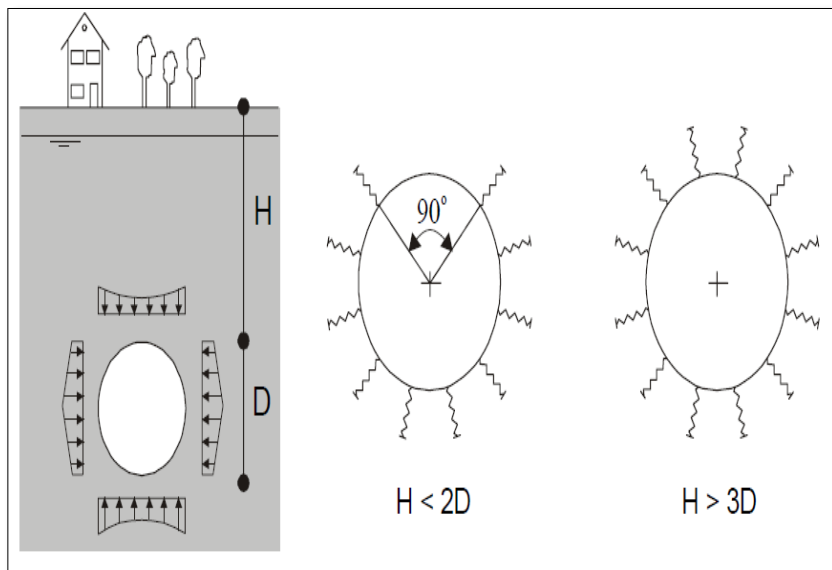
در این مدل نسبت سختی پوشش زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد، همچنین تاثیر عمق و شعاع نیز در مدل وارد شده است. نگهداری زمین با استفاده از فنرهای شعاعی و مماسی در کل محیط نگهداری مدل می‌شود. حلقه به صورت همگن است که از تئوری الاستیک خطی پیروی می‌کند با استفاده از یکسری معادلات ساده فشارهای اولیه زمین به صورت شعاعی و مماسی بر روی نگهداری وارد می‌شود.

---

<sup>۱</sup> Schulze-duddek

به این ترتیب حداکثر نیروی نرمال و گشتاور در اثر بارهای بیضوی، می‌تواند با استفاده از گراف‌های اریه شده توسط شولز- دودک تعیین شود. این گراف‌ها بر مبنای روش‌های تحلیلی هستند (Duddeck, et al., 1982). در این مدل فقط یک حلقه بدون اتصالات در نظر گرفته می‌شود. برای در نظر گرفتن تاثیر اتصالات از سختی خمشی هم‌ارز برای حلقه استفاده می‌شود. برای بدست آوردن دقت بیشتر، اتصالات را می‌توان با استفاده از مفصل یا فنرهای پیچشی مدل کرد. تصحیحات دیگری در طی سال‌های اخیر برای این مدل‌ها انجام شده است، که از آن جمله می‌توان بررسی تاثیر هندسی غیر خطی توسط بلوم را اشاره کرد. همچنین بلوم راه‌حل تحلیلی که شامل اندرکنش چند حلقه و رفتار غیر خطی اتصالات است را توسعه داده است.

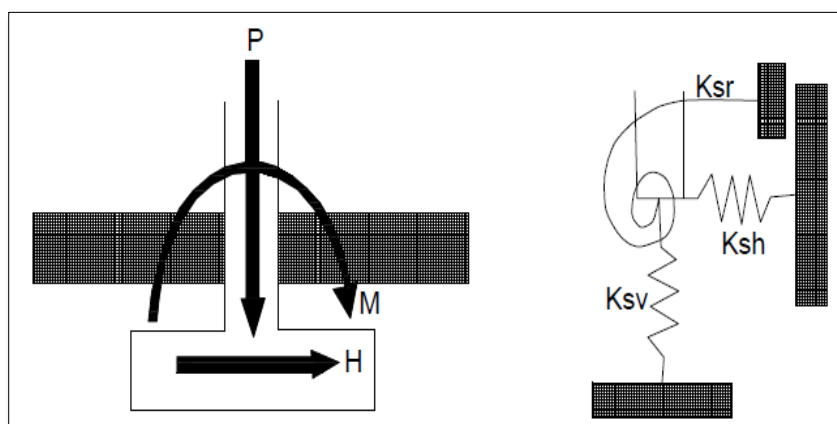
وقتی که خاک بالای تونل کمتر از دو برابر قطر تونل باشد تونل یک تونل کم عمق است (شکل ۳-۱۶). طبق تئوری دودک در تونل‌های کم عمق، قسمت تاج تونل با زاویه ۹۰ درجه به وسیله فنرها نگهداری نمی‌شود. بنابراین زمین بالای تاج به صورت بار مرده عمل می‌کند. اگر روبراه بالای تونل از سه برابر قطر تونل بیشتر باشد، تونل عمیق نامیده می‌شود (Duddeck, et al., 1982). برخلاف تونل‌های کم عمق، تونل‌های عمیق به وسیله فنرهایی در تمام محیط تونل نگهداری می‌شوند و فاکتور تصحیح فنرهای زمین در موارد کاملاً پیوسته (متصل)،  $0/5$  تا  $0/6$  است. ناحیه بین دو و سه برابر قطر تونل، ناحیه گذر است که نیازی به یک مدل مشخص ندارد. در این وضعیت هر دو مدل می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، یعنی طراحان دارای دو انتخاب هستند که می‌توانند بهترین مدل را برای آن حالت خاص انتخاب کنند.



شکل ۳-۱۶- نگهداری زمین توسط فنر در عمق‌های مختلف (Duddeck, et al., 1982)

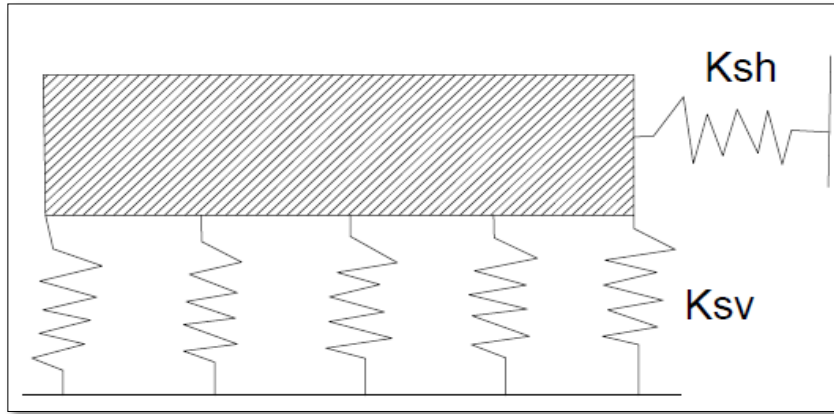
### ۳-۵-۵- مدل تیر- فنر<sup>۱</sup>

اگر بارهای وارد بر یک پی به صورت شکل ۳-۱۷ شامل بار عمودی  $P$  و بار جانبی  $H$  و گشتاور  $M$  باشد، عکس‌العمل زمین را می‌توان به صورت دو فنر انتقالی و یک فنر پیچشی نشان داد که هر کدام با یک سختی الاستیک خطی مشخص می‌شوند. در این حالت می‌توان برای فنرهای انتقالی از مدل فنرهای الاستیک وینکلر طبق شکل ۳-۱۸ استفاده کرد (Plizzari, 2006).



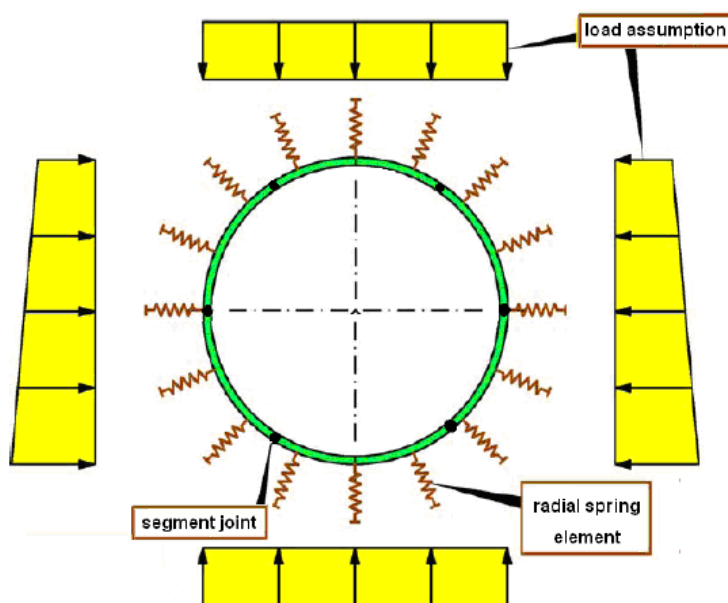
<sup>۱</sup> Beam – Spring Model

شکل ۳-۱۷- بارهای وارد بر یک پی و فنرهای نشان دهنده زمین (Plizzari, 2006)

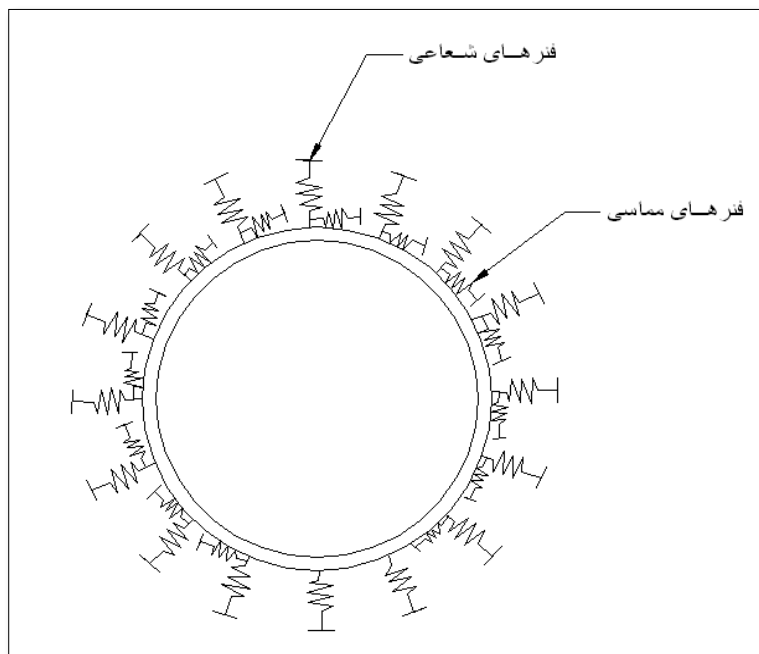


شکل ۳-۱۸- مدل فنرهای الاستیک وینکلر (Plizzari, 2006)

برای استفاده از این مدل برای پوشش تونل می‌توان حلقه پوشش را به عنوان یک حلقه محبوس شده (تیر- ستون) و اندرکنش پوشش با زمین اطراف را فنرهای الاستیک وینکلر با طول‌های مساوی فرض نمود. در شکل‌های ۳-۱۹ و ۳-۲۰، مدلی از روش تیر- فنر پوشش تونل تحت بارگذاری و همچنین نمایی از مولفه‌های شعاعی و مماسی فنرها در این مدل نشان داده شده است ( Ozgen, 2010).

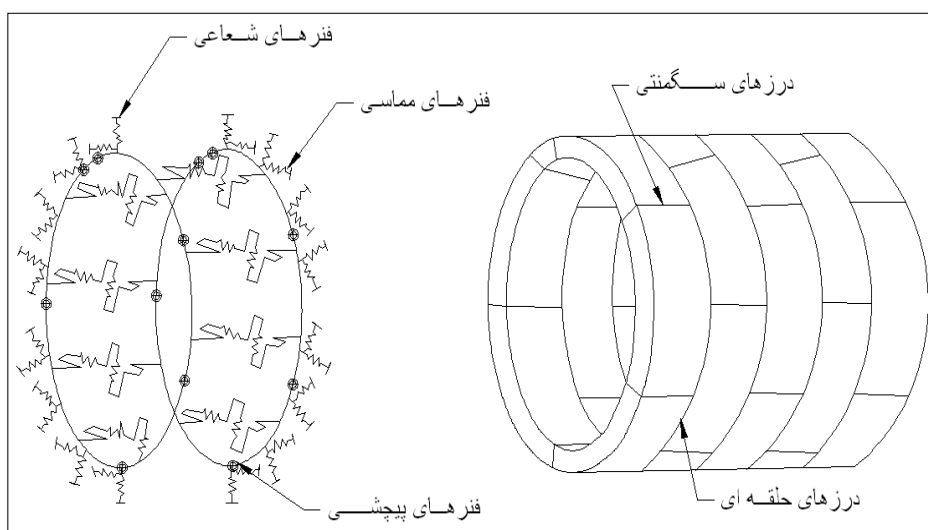


شکل ۳-۱۹- مدلی از روش تیر- فنر پوشش تونل تحت بارگذاری (Ozgen, 2010).



شکل ۳-۲۰- نمایی از مولفه شعاعی و مماسی فنرها در مدل تیر- فنر (Ozgen, 2010)

اگر دو حلقه متوالی از پوشش سگمنتی در نظر گرفته شود، این مدل به صورت شکل (۳-۲۱) خواهد بود که علاوه بر فنرهای شعاعی و مماسی، برای نشان دادن درزهای شعاعی سگمنت (درز سگمنت) از فنرهای پیچشی و برای نشان دادن درزهای پیرامونی سگمنت (درز حلقه‌ای) از فنرهای برشی استفاده می‌شود.



شکل ۳-۲۱- نمایی از مدل تیر- فنر برای دو حلقه پوشش سگمندی (Plizzari, 2006)

برای آنکه حلقه پوشش، به خوبی گشتاور و نیروی محوری اعمال شده بر روی المانها را نشان دهد، باید به زوایای ۱۵ درجه و یا کمتر تقسیم شود. به عبارت دیگر توصیه می‌شود که حداقل تعداد فنرها بین ۱۲ تا ۳۰ عدد یا حداکثر فاصله فنرها از یکدیگر ۳ فوت (۱ متر) باشد.

برای تعیین سختی دورانی<sup>۱</sup> درزه های طولی معمولاً از فرمول جانسن<sup>۲</sup> (۱۹۸۳) استفاده می‌شود. از این سختی برای مدل کردن میزان مقاومت درزه در برابر دوران استفاده می‌شود. مطابق این رابطه تا زمانی که درزه‌ها کاملاً به هم فشرده هستند، سختی دورانی ( $C_m$ ) ثابت است و می‌توان آنرا به شکل زیر بدست آورد:

$$C_m = \frac{E \cdot b^2}{12} \quad (۵-۳)$$

که در آن

E: مدول دگرشکل‌پذیری ناحیه تماس (بتن)

b: عرض ناحیه تماس

برای مدل کردن درزه‌های محیطی نیز از فنرهای جانبی<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. معمولاً اتصال حلقه‌ها به وسیله فنرهای جانبی، که بیان‌کننده سختی برشی و حداکثر ظرفیت باربری اتصالات است، شبیه‌سازی می‌شود. سختی برشی درزه‌ها به وسیله رابطه‌ی زیر مدل می‌شود:

$$C = \frac{G \cdot A}{D} \quad (۶-۳)$$

که در آن

G: مدول برشی درزه

---

<sup>۱</sup> Rotational Stiffness

<sup>۲</sup> Jansen

<sup>۳</sup> Lateral Springs

A : مساحت صفحه

D : ضخامت صفحه است.

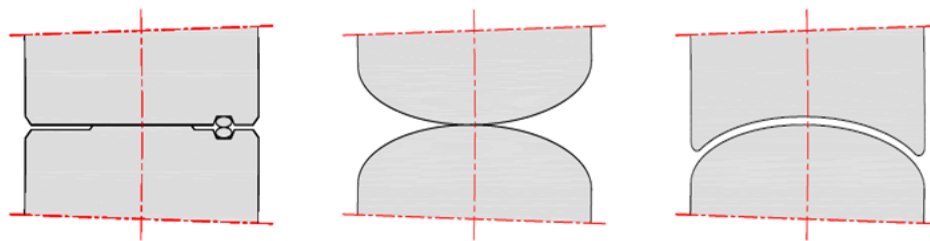
در این مدل فرض می‌شود که فنرهای مماسی در حالت‌های کششی و فشاری رفتار الاستیک از خود نشان می‌دهند و فنرهای شعاعی فقط در حالت فشاری عمل می‌کنند. از آنجایی که فنرهای مماسی اصطکاک بین پوشش و زمین را مدل می‌کنند، با فرض اینکه مولفه مماسی به وسیله سنگ حمل می‌شود، می‌توان آن‌ها را از مدل حذف نمود (Hefny, et al., 2004 , Klappers, et al., 2006).

### ۳-۶- بررسی اتصالات نگهداری سگمنتی

یکی از بخش‌های مهم و تاثیرگذار در طراحی سامانه نگهداری سگمنتی محل اتصال قطعات بتنی پیش‌ساخته (سگمنت) است. در ادامه انواع این اتصالات و رفتار آن‌ها بررسی می‌شود.

#### ۳-۶-۱- اتصالات سگمنتی

خطوط تماس بین دو سگمنت مجاور در یک حلقه، اتصالات سگمنتی نامیده می‌شود. در عمل دو نوع اتصال سگمنتی مورد استفاده قرار می‌گیرد: اتصال صفحه‌ای و اتصال انحنادار. تفاوت اساسی بین اتصالات انحنادار و اتصالات صفحه‌ای نحوه انتقال گشتاور خمشی است. وقتی که در اتصالات صفحه‌ای چرخش اتفاق می‌افتد، گشتاور بوجود آمده در اثر نیروی نرمال سعی می‌کند بازشدگی در اتصالات را ببندد، منظور اینکه یک اتصال صفحه‌ای قادر است گشتاور خمشی را منتقل کند. یکی از معایب این نوع اتصال این است که وقتی مقدار چرخش بزرگ است. قسمت‌های خارجی دو سگمنت باهم تماس پیدا می‌کنند و این پدیده باعث آسیب‌دیدگی شده و همچنین آب-بندی نیز تضمین نمی‌شود، لذا زمانی که مقدار چرخش زیاد می‌شود، اتصالات انحنادار می‌توانند استفاده شوند، در این نوع به دلیل هندسه اتصالات، گشتاور منتقل نشده و به صورت منفصل عمل می‌کنند (Luttikholt, 2007). در شکل ۳-۲۲ انواع اتصالات سگمنتی نشان داده شده است.



پ- اتصال صفحه‌ای

ب- اتصال انحنادار

الف- اتصال انحنادار

شکل ۳-۲۲- انواع مختلف اتصالات سگمنتی (Luttikholt, 2007)

کاربرد هریک از اتصالات به مقدار چرخش و نیروی نرمال وارد شده بستگی دارد. در صورت وجود چرخش زیاد و نیروی نرمال بالا اتصالات انحنادار بهتر هستند، چون در این حالت مخاطره خرابی بتن کمتر است. وقتی که از اتصالات صفحه‌ای استفاده می‌شود، ناحیه فشار در بتن بزرگتر است؛ بنابراین این اتصالات زمانی که چرخش و نیروی نرمال کم باشد مناسب هستند (Luttikholt, 2007). معمولاً در تونل‌های موجود در ایران از اتصالات صفحه‌ای که ضخامت ناحیه تماس در آن‌ها کاهش یافته، استفاده می‌شود.

در اتصالات صفحه‌ای تماس بین دو سگمنت، تماس بتن با بتن بدون مواد متراکم (ضربه‌گیر) است. این ناحیه تماس معمولاً دارای ضخامت کمتری نسبت به ضخامت سگمنت است؛ لذا نیروی نرمال در این نواحی به صورت متمرکز به سگمنت مجاور منتقل می‌شود، آب‌بند کردن نگهداری معمولاً با استفاده از درزبندهای لاستیکی<sup>۱</sup> انجام می‌شود. این درزبندها در بخش بیرونی اتصالات قرار می‌گیرند وقتی که چرخش بزرگی در اتصالات بوجود می‌آید این درزبندها بسته به مسیر چرخش دچار فشردگی یا رهایی می‌شوند. وقتی که رهاشدگی اتفاق می‌افتد آب می‌تواند از اتصالات به داخل تونل نفوذ کند (Luttikholt, 2007). در شکل ۳-۲۳ رهاشدگی نوار آب‌بند از محل اتصالات در پروژه قمرود ایران نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Robber gasket





شکل ۳-۲۳- رهاشدگی نوار آببند از محل اتصالات (پروژه قمرو، ایران)

### ۳-۶-۲- اتصالات حلقه‌ای

در بین دو حلقه‌ی سگمندی مجاور، اتصالات حلقه‌ای قرار دارند، تماس بین دو حلقه به‌وسیله‌ی تماس بین دو تا پنج ناحیه بتن با بتن و یا مواد ضربه‌گیر بدست می‌آید. برای اجتناب از تغییرشکل‌های بزرگ می‌توان از نر و مادگی<sup>۱</sup> استفاده کرد. نر و مادگی‌هایی با ابعاد کوچک که فاقد آرما تور بوده و قادر به تحمل جابجایی زیاد نیستند می‌توانند برای قرارگیری بهتر سگمنت‌ها در جای خود مورد استفاده قرار گیرند. تحت نیروی نرمال هیچ‌گونه تماس بین نر و مادگی‌ها بوجود نمی‌آید. برای اجتناب از آسیب‌دیدگی بتن، می‌توان در بین سطوح بتن از کائوبیت<sup>۲</sup> استفاده کرد. با توجه به اینکه سطوح تماس معمولی قادر به مقاومت در برابر نیروی برشی نیستند، جابجایی‌های زیادی ممکن است بوجود آید، برای جلوگیری از تسلیم سامانه نگهداری، نر و مادگی سازه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند که برای تحمل نیروی وارده معمولاً قسمت نر تقویت می‌شود. در جهت شعاعی و مماسی معمولاً بین نر و مادگی یک فضای خالی وجود دارد. این فضای خالی در جهت مماس نسبتاً بزرگ است؛ که باعث می‌شود اندرکنش در این جهت بین حلقه‌ها بوجود نیاید. در جهت شعاعی این فضای

<sup>۱</sup> dowel and socket

<sup>۲</sup> kaubit

خالی معمولاً کوچکتر است اما فقط در صورتی که تغییر شکل‌ها زیاد باشد نیروی برشی توسط نر و مادگی تحمل می‌شود (Luttikholt, 2007).

همانطور که گفته شد، تماس عمده دو حلقه، بصورت تماس بین بتن با بتن یا مواد ضربه‌گیر است؛ این ناحیه تماس در چندین موقعیت مختلف در وجوه سگمنت قرار دارد. تماس بتن با بتن به علت ناصاف بودن سطوح بتن می‌تواند باعث ایجاد تمرکز موضعی تنش در سطوح تماس شود. برای اجتناب از این تمرکز تنش از مواد ضربه‌گیر استفاده می‌شود. در عمل از تخته سه‌لایه یا کائوبیت استفاده می‌شود (شکل ۳-۲۴). این مواد باعث انتقال نیروی محوری مماسی و شعاعی از یک حلقه به حلقه مجاور می‌شوند. همچنین این مواد باعث توزیع مناسب فشار جک‌های پیشران بر روی سطوح تماس با سگمنت‌ها و همچنین سطوح تماس سگمنت‌ها با یکدیگر می‌شود.



ب- کائوبیت



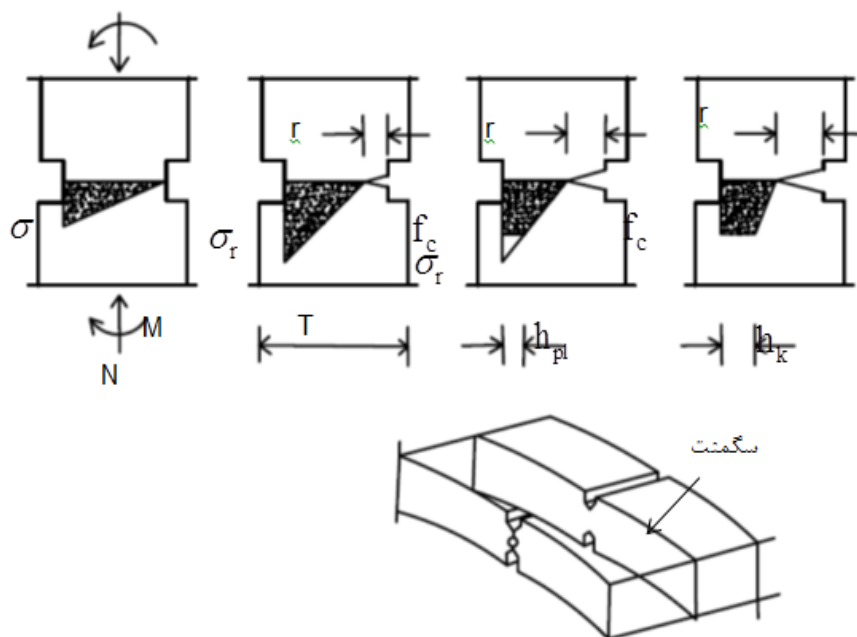
الف- تخته سه‌لایه

شکل ۳-۲۴- استفاده از مواد ضربه‌گیر در اتصالات نگهداری سگمنتی (Luttikholt, 2007).

### ۳-۶-۳- رفتار اتصالات سگمنتی

مدل طراحی سازه‌ای در مدل‌سازی یک حلقه پیوسته بدست آمده است ولی در عمل نگهداری تونل، از چند سگمنت ساخته می‌شود. اتصالات موجود در بین سگمنت‌ها، بر روی رفتار و الگوی واقعی تنش تاثیر خواهند گذاشت و همچنین در تعیین نیروها و رفتار سگمنت نقش مهمی را ایفا می‌کنند. این اتصالات دارای یک مد رفتاری، ما بین حالت ثابت و لولا شده هستند. برای تعیین

تنش‌ها و تغییرشکل‌ها، یک ناحیه انتقالی معین را که تنش‌ها روی آن تقسیم شده، فرض می‌شود. حاصل جمع تغییرشکل‌ها در زون انتقال و کرنش‌ها در یک نقطه خاص، می‌تواند به چرخش سطح تبدیل شود. با یک پهنای کم اتصالات، پهنای ناحیه تماس و زون انتقال کوچک‌تر خواهد شد. لذا می‌توان فهمید که با کاهش ناحیه تماس اتصالات سگمنتی، انحنا افزایش می‌یابد (Luttikholt, 2007). در شکل ۳-۲۵ گسترش تنش‌ها با توجه به اثر تغییرشکل‌های متفاوت اتصالات نشان داده شده است.



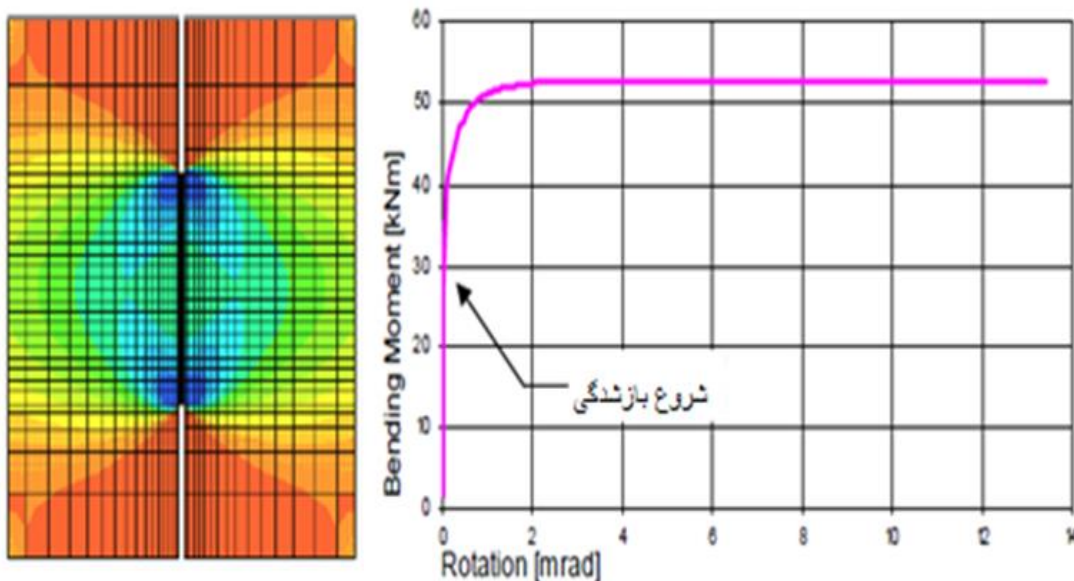
شکل ۳-۲۵- گسترش تنش در اثر تغییرشکل‌های متفاوت اتصالات (Wall, 1999)

ایجاد تغییرشکل اتصالات سگمنتی را می‌توان طبق مراحل زیر بررسی کرد:

- اتصالات (درزه‌ها) بسته می‌شود و بتن رفتار الاستیک خطی از خود نشان می‌دهد. وقتی که تنش به وجود آمده در اثر گشتاور خمشی کوچک‌تر از تنش نرمال باشد اتصالات رفتار الاستیک خطی خواهند داشت و قابلیت تحمل تنش بیشتر خواهد شد.
- تنش بوجود آمده در اثر گشتاور بر روی تنش نرمال اضافه می‌شود. اگر کشش اتفاق بیفتد، اتصالات سگمنتی باز شده و بر خلاف مواد تشکیل دهنده که هنوز هم رفتار الاستیک خطی دارند رفتار الاستیک خطی زیادی نخواهند داشت.

- بتن به حداکثر رفتار الاستیک خطی مواد در ناحیه فشار می‌رسد. در این مورد رفتار پلاستیک غیرخطی مواد با بازشدگی اتصالات ترکیب خواهد شد.
- سرانجام بتن بعد از رسیدن به کرنش  $3/5$  درصد خرد می‌شود. اتصالات سگمندی در حالت نهایی متلاشی می‌شوند.

اتصالات بین سگمندی دارای تاثیر زیادی بر روی رفتار کلی سامانه نگهداری هستند. رفتار اتصالات سگمندی شدیداً تحت تاثیر نیروی نرمالی است که در این اتصالات بوجود می‌آید (این نیرو در اثر بار شعاعی وارد بر نگهداری بوجود می‌آید). زمانی که گشتاور خمشی کم است، یک نیروی فشاری در کل سطح مقطع اتصالات به وجود می‌آید و گشتاور فقط باعث ایجاد اندکی چرخش (بسته به ارتفاع و ضخامت اتصالات) در اتصالات می‌شود. در صورتی که اگر ضخامت اتصالات با ضخامت سگمنت یکی باشد، انحنای اضافی در اثر چرخش به وجود نمی‌آید بهر حال در صورتی که ضخامت اتصالات خیلی کمتر از ضخامت سگمنت‌ها باشد در این صورت خمیدگی در اتصالات زیاد بوده و منجر به چرخش بزرگ در شاخه خطی می‌شود. فقط زمانی که فشار وارد بر روی سطح خارجی ناحیه تماس صفر باشد، بازشدگی به وجود می‌آید که این امر باعث چرخش اضافی می‌شود. در شکل ۳-۲۶ نتایج محاسبات المان محدود، در دو بخش مختلف خطی و غیرخطی نشان داده شده است. وقتی که چرخش افزایش می‌یابد، چرخش سگمنت حول گوشه‌های ناحیه تماس بیشتر و بیشتر می‌شود. افزایش بیشتر چرخش باعث ایجاد رفتار پلاستیک در بتن محل اتصالات شده و در نهایت باعث خردشدگی آن، در این نقطه می‌شود (Luttikholt, 2007).



ب- توزیع تنش در اثر نیروی نرمال

الف- رفتار گشتاور-چرخش اتصال

شکل ۳-۲۶- مدل المان محدود از اتصالات سگمندی (Luttikholt, 2007)

### ۳-۶-۴- رفتار اتصالات حلقه‌ای

اتصالات حلقه‌ای بین دو سگمنت در دو حلقه مجاور قرار دارند که در این اتصالات امکان چرخش و انتقال وجود دارد. بین دو سطح بتن مواد متراکم<sup>۱</sup> ممکن است استفاده شود. وقتی که از این گونه مواد استفاده نمی‌شود، تماس بین دو سطح بتنی بوجود می‌آید. در نتیجه تمرکز تنش بالایی در اثر سطوح ناصاف بتنی ممکن است بوجود آید. اصطکاک در این اتصالات بوسیله تماس در سطح بتنی بدست می‌آید که این اصطکاک باعث ایجاد نیروی برشی می‌شود و از تغییر شکل شعاعی و مماسی حلقه جلوگیری می‌کند. همچنین این نیرو مقاومتی را برای چرخش این صفحات بوجود می‌آورد. نیروی برش وابسته به صافی سطح بتن، مقدار نیروی نرمال در اتصال و اندازه سطح تماس است. وقتی که از مواد متراکم استفاده می‌شود مقدار نیروی برش به خصوصیات مواد بستگی دارد.

<sup>۱</sup> Packing material

### ۳-۷- خلاصه فصل

در این فصل به بررسی مراحل طراحی نگهداری سگمنتی و بارهای وارده بر نگهداری از جمله بار مرده، بار جک های پیشران، بار ناشی از تزریق، بار ناشی از انبار کردن سگمنتها و سایر نیروها پرداخته شده است. در ادامه تاثیر عمده ضخامت نسبت به سایر پارامترهای هندسی نگهداری و روندنمای انتخاب بهینه ضخامت مورد بررسی قرار گرفت.

مدل طراحی سازه‌ای، که برهم کنش بین سازه و زمین مجاور را با استفاده از قوانین ریاضی بیان می‌کند، بحث شده است. این مدل‌ها به دو بخش تقسیم می‌شوند: اولی مدلی بر مبنای تئوری مقاومتی مواد است که نیروهای داخلی را تعیین می‌کند و دومی مدلی بر مبنای تئوری الاستیسیته است که تنش و کرنش‌های داخلی را تعیین می‌کند. از این مدل‌ها در طراحی نگهداری استفاده می‌شود. در مورد تونل کاری با استفاده از سپر، طراحان ترجیح می‌دهند زمین را به صورت پیوسته نشان دهند، زیرا توصیف رفتار واقعی زمین بهتر از نشان دادن آن به صورت فتر است.

در ادامه ویژگی‌های انواع اتصالات سامانه نگهداری سگمنتی که شامل اتصالات سگمنتی و اتصالات حلقه‌ای می‌شود، بیان شده است و تاثیر رفتار آن‌ها در طراحی‌ها آمده است که شامل:

- اتصالات موجود در بین سگمنت‌ها، بر روی رفتار و الگوی واقعی تنش تاثیر خواهند گذاشت و همچنین در تعیین نیروها و رفتار سگمنت نقش مهمی را ایفا می‌کنند. این اتصالات دارای یک مد رفتاری، ما بین حالت ثابت و لولا شده هستند.
- اتصالات حلقه‌ای بین دو سگمنت در دو حلقه مجاور قرار دارند که در این اتصالات امکان چرخش و انتقال وجود دارد. بین دو سطح بتن مواد متراکم<sup>۱</sup> ممکن است استفاده شود. وقتی که از این گونه مواد استفاده نمی‌شود، تماس بین دو سطح بتنی بوجود می‌آید. در نتیجه تمرکز تنش بالایی در اثر سطوح ناصاف بتنی ممکن است بوجود آید.

---

<sup>۱</sup> Packing material

- ایجاد تمرکز تنش در محل اتصالات در اثر چرخش و گشتاور بوجود آمده در آنها  
است که وقتی که چرخش افزایش می‌یابد، چرخش سگمنت حول گوشه‌های ناحیه  
تماس بیشتر و بیشتر می‌شود. افزایش بیشتر چرخش باعث ایجاد رفتار پلاستیک در  
بتن محل اتصالات شده و در نهایت باعث خردشدگی آن، در این نقطه می‌شود.





## فصل چهارم

زمین شناسی تونل انتقال آب چمشیر

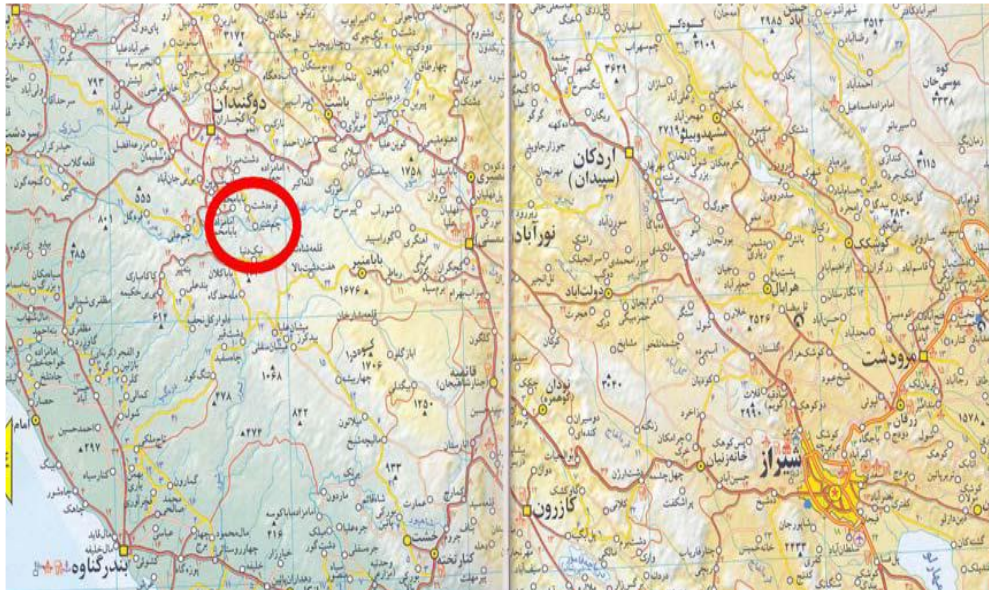
#### ۴-۱- مقدمه

احداث سد چمشیر و تاسیسات وابسته به آن به منظور ذخیره‌سازی آب رودخانه زهره و انتقال بخشی از آن به دشت دیلم (لیراوی) در شهرستان گچساران واقع در استان کهگیلویه و بویراحمد در حال اجرا است (شکل ۴-۱). این طرح شامل بند تنظیمی بطول ۲۱۶ متر و با ارتفاع ۸ متر در تراز ۱۷۹ متری بر روی رودخانه زهره با قابلیت تنظیم جریانی با حداکثر دبی ۲۷ متر مکعب در ثانیه و تونل انتقال آزاد آب به قطر حفاری ۵/۳ تا ۵/۵ متر و قطر تمام شده ۴/۵ متر بطول ۷/۱۰۰ کیلومتر است؛ که آب به صورت آزاد (بدون فشار) از محل بند تا انتهای تونل انتقال یافته و پس از آن به وسیله خط لوله انتقال تحت فشار به قطر ۳/۲ و طول ۳/۵ کیلومتر وارد نیروگاه برق آبی می‌گردد. پس از نیروگاه به وسیله لوله به قطر ۳/۲ تا ابتدای دشت دیلم منتقل گردیده و بوسیله دو شاخه لوله وارد کانال‌های شبکه آبیاری و زهکشی دشت‌های دیلم و گناوه شده و به مصرف کشاورزی می‌رسد (دهکردی و همکاران، ۱۳۹۱).

#### ۴-۲- موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی

طرح سد چمشیر در مختصات جغرافیایی  $X=431514$ ,  $Y=3352399$  قرار دارد. دسترسی به این محل از طریق جاده اختصاصی آسفالته شرکت نفت دوگنبدان-پازنان (۶۰ کیلومتری آن) امکان پذیر است که از طریق جاده آسفالته منشعب از آن در فاصله حدود ۱۰۰ متری نرسیده به پل رودخانه خیرآباد (جاده امامزاده حیدر کرار) به طول تقریبی ۲ کیلومتر به محل بند قابل دسترسی است. مسیر انتقال آب با جهت تقریبی شمالی-جنوبی (N11E) که شامل دو بخش تونل انتقال و خط لوله انتقال است، از نظر دسترسی محدود بوده به طوری که در بخش ابتدایی تونل از طریق جاده آسفالته زیدون-دیلم و از طریق جاده اختصاصی شرکت نفت که بعد از پل زهره به سمت چپ منشعب می‌شود (جاده روستای گنجه‌گون بعد از تلاقی با خط لوله گاز) امکان‌پذیر و بخش میانی تونل از طریق جاده سرویس خاکی خط لوله گاز شرکت نفت که به موازات مسیر تونل بوده و در ۳

کیلومتری، جاده روستای گنجه گون را قطع می‌کند. محل خروجی تونل انتقال آب که محل شروع خط لوله انتقال آب نیز است؛ از طریق جاده اختصاصی شرکت ملی نفت ایران که در کیلومتر ۱۵ این جاده به صورت جاده خاکی منشعب می‌شود پس از مرمت و بازسازی قابل دسترسی است (دهکردی و همکاران، ۱۳۹۱).



شکل ۴-۱- نقشه راهنمای راه‌های ارتباطی منطقه مورد مطالعه

### ۴-۳- زمین‌شناسی عمومی منطقه

از دیدگاه زمین‌شناسی، پهنه‌ی ایران زمین دارای ویژگی‌ها و سرگذشت زمین‌شناسی بسیار متنوع و گاهی پیچیده است. بر این اساس، محققین مختلف با توجه به عوامل متعددی از جمله شرایط چینه‌شناسی و محیط رسوبی و ویژگی‌های ساختاری، فعالیت‌های ماگمایی و دگرگونی و همچنین ویژگی‌های لرزه زمین‌ساختی این پهنه را به واحدهای مختلفی تقسیم نموده‌اند. برای اولین بار در سال ۱۹۶۸ اشتوکلین<sup>۱</sup>، زمین‌شناسی ایران را به چند منطقه یا زون ساختاری که دارای وضعیت زمین-ساختی، ساختار و شرایط محیط رسوبی متفاوتی هستند تقسیم نمود که این نقشه مبنای کار بسیاری از محققین قرار گرفته است. بر اساس تقسیم‌بندی زمین‌شناسی نبوی (۱۹۷۶) منطقه مورد مطالعه در

<sup>۱</sup> Stocklin

حاشیه جنوبی رشته کوه‌های زاگرس و تقریباً در بخش‌های میانی و حاشیه جنوب غربی آن قرار گرفته است. این رشته کوه‌ها که در راستای شمال غرب- جنوب شرق از شمال غرب ایران تا بندرعباس کشیده شده است، در واقع جزئی از بخش‌های میانی کمربند کوهزایی جوان آلپی است که از شمال غربی آفریقا شروع و تا جنوب شرق آسیا ادامه دارد.

مسیر انتقال آب از محل آبگیر بند تنظیمی واقع در حاشیه چپ رودخانه زهره شروع گردیده و در ابتدا بصورت تونل با امتداد تقریباً شمالی- جنوبی (آزیموت ۱۹۱ درجه) تا خروجی تونل و سپس بصورت خط لوله با امتداد تقریبی شمال غربی- جنوب شرقی تا ابتدای دشت دیلم ادامه می‌یابد. تشکیلات زمین‌شناسی در ابتدای این مسیر (حدود ۲/۲۵ کیلومتر) سنگ‌های کنگلومرایی و ماسه سنگی سازند بختیاری بوده و در ادامه آن سنگ‌های نرم گل‌سنگی، مارنی با میان لایه‌های ماسه سنگی سازند آغاچاری رخنمون دارند (دهکردی و همکاران، ۱۳۹۱).

#### ۴-۴- زمین‌ریخت‌شناسی

از دیدگاه زمین‌ریخت‌شناسی، ابتدای مسیر تونل انتقال که سازند بختیاری آن را می‌پوشاند دارای ریخت صخره‌ای و حالت پرتگاهی داشته و واریزه‌های دامنه‌ای در پایین دست پرتگاه‌ها به چشم می‌خورد. شیب لایه‌بندی در این سازند ملایم و در حدود ۵ تا ۱۴ درجه است. بیشینه روباره تونل در این محدوده حدود ۱۷۰ متر خواهد بود. ادامه مسیر تونل و خط انتقال، که در سازند آغاچاری قرار می‌گیرد به دلیل وجود لایه‌های نیمه سخت ماسه‌سنگی در تناوب با لایه‌های نرم و ضخیم گل‌سنگی و مارنی دارای ریخت و رخساره دامنه نامنظم است؛ به‌طوری‌که در اثر فرسایش لایه‌های نرم، لایه‌های ماسه‌سنگی بصورت برجسته دیده می‌شوند و ریخت کلی این محدوده بصورت تپه و ماهوری است. این سازند در مسیر انتقال شیبی در حدود ۱۵ تا ۲۲ درجه به سوی شمال شرق داشته و در بخش انتهایی تونل دارای صخره‌های موازی و مرتفع است. در قسمت خروجی تونل و ابتدای خط لوله انتقال، به علت نبود مصالح ماسه‌سنگی فرسایش و شست‌شو بیشتر از قسمت‌های دیگر مسیر انجام شده و باعث

ایجاد ماریچ‌های متعدد در طول آبراهه‌ها شده است.

#### ۴-۵- چینه‌شناسی

قدیمی‌ترین رسوبات رخنمون یافته در مسیر انتقال سازند آغاچاری و جدیدترین آنها سازند بختیاری و رسوبات عهد حاضر است.

#### ۴-۵-۱- سازند آغاچاری

این سازند متعلق به دوره پلیوسن و جزو گروه فارس است. این سازند از تناوب لایه‌های متفاوت با لایه‌بندی نازک تا متوسط و ضخامت متفاوت به شرح ذیل تشکیل گردیده است.

- لایه‌های مارنی به رنگ سبز مایل به خاکستری تا قهوه‌ای با ضخامت تا ۵ متر که در سطح فرسایش یافته هستند.
- لایه‌های گل‌سنگ به رنگ خاکستری تا قهوه‌ای و ریزدانه با ضخامت کم تا متوسط
- ماسه‌سنگ به رنگ‌های قهوه‌ای مایل به قرمز با ضخامت متوسط تا زیاد (حداکثر ۱۰ متر)
- ژپس و انیدریت به رنگ سفید تا خاکستری تیره به صورت بین لایه‌ای و انحلال‌پذیر با ضخامت ۰/۵ تا حداکثر ۲ متر و رگه‌های نازک ژپس به ضخامت ۲ سانتی‌متر در این سازند دیده می‌شود که بصورت ثانویه مقدار زیادی از ناپیوستگی‌های موجود در لایه‌ها را پر نموده‌اند.

#### ۴-۵-۲- سازند بختیاری

این سازند متعلق به دوره پلیوسن بالایی بوده و از لایه‌های متوسط تا ضخیم کنگلومرا با سیمان رسی \_سیلتی همراه با سیمان ثانویه آهکی، ماسه‌سنگ کنگلومرای با دانه‌بندی متوسط و عدسی‌ها و لایه‌های نازک تا ضخیم گل‌سنگ تشکیل شده و فاقد ناپیوستگی‌های سیستماتیک می‌باشد.

- کنگلومرای این سازند از نوع ارتوکنگلومرا بوده و دارای بافتی است که در آن قلوه سنگ‌ها و

ماسه‌های درشت با یکدیگر در تماس هستند و به وسیله سیمانی از مصالح کربناته، به هم جوش خورده‌اند. این سنگ‌های کنگلومرایی در مناطق کم‌عمق و ساحلی رسوب‌گذاری شده و سنگ‌دانه‌های تشکیل دهنده آنها عموماً گردشده تا نیمه‌گرد هستند و با ابعاد متفاوت مانند شن، قلوه سنگ و حتی قطعه سنگ نیز دیده می‌شوند. جنس سنگ‌دانه‌ها عموماً آهکی بوده ولی سنگ‌دانه‌های سیلیسی و چرتی نیز در آنها مشاهده می‌شود. این نوع کنگلومراها در اثر حمل با آب‌های بسیار متلاطم و پر انرژی با امواج و جریان‌های با سرعت زیاد ته نشست شده‌اند، عموماً گردش‌دگی سنگ‌دانه‌ها متوسط تا خوب بوده و از تراوایی بالایی برخوردار هستند.

- ماسه‌سنگ‌های این سازند دارای شرایط مشابه کنگلومرا بوده و ساختارهای رسوبی از جمله ساختار چلیپایی که ویژگی محیط‌های کم ژرف و آشفته هستند.
- لایه‌های گل‌سنگی آن از تجمع ذرات ریز کربناته با بافت ریزدانه مانند لای و رس تشکیل گردیده و دانه‌بندی این لایه‌ها گاهی تا حد ماسه ریزدانه افزایش می‌یابد.

#### ۴-۵-۳ - رسوبات دامنه‌ای و واریزه‌ای

وجود لایه‌های فرسایش‌پذیر مارن، گل‌سنگ، رس‌سنگ و غیره تحت تاثیر عامل‌های تخریب و هوازدگی سبب فرسایش و تخریب بخش‌های سطحی سازنده‌های رخنمون یافته بویژه سازند آغاچاری گردیده است. بخش‌های فرسایش‌یافته یا در روی دامنه‌ها برجا مانده‌اند و یا با جریان‌های سطحی جابجا شده و در کناره برجستگی‌ها و پای دامنه‌ها همراه با واریزه‌های سنگی نهشته شده‌اند. این نهشته‌های واریزه‌ای متشکل از رس، لای و قلوه‌سنگ‌های گوشه‌دار ماسه‌سنگی و گاه‌آهکی به ضخامت ۰/۵ تا حداکثر ۸ متر هستند که در محل مسیر تونل و همچنین مسیر خط لوله انتقال دیده می‌شوند.

#### ۴-۶- زمین ساخت

همان‌طوریکه اشاره گردید مسیر انتقال در زون زاگرس چین‌خورده قرار داشته و دارای ساختار چین‌خورده ساده است. چین‌خوردگی ساده و ملایم این محدوده سبب گشته تا تکتونیک و آثار گسلش و ناپیوستگی‌ها بسیار کم شده و یا قابل مشاهده نباشد. بخشی از مسیر تونل انتقال در سازند بختیاری و غالب مسیر آن در سازند آغاچاری قرار دارد لایه‌های این سازندها شیبی به سوی شمال خاوری و ورودی تونل دارند که یال جنوبی ناودیس عریض و بسیار پهن را تشکیل می‌دهند. محور این ناودیس در راستای رودخانه زهره در محل بند تنظیمی است (مدنی، ۱۳۸۵).

#### ۴-۷- حفاری‌های اکتشافی مسیر تونل انتقال آب

برای ارزیابی و مشخص کردن جنس لایه‌های زیرسطحی مسیر تونل انتقال آب تعداد ۵ حلقه گمانه اکتشافی با عمق حداقل ۴۵ متر و حداکثر ۱۲۰ متر حفاری گردیده که موقعیت، مشخصات و نوع سازند زمین‌شناسی گمانه‌های حفاری شده در مسیر تونل انتقال به شرح جدول ۴-۱ است.

جدول ۴-۱- موقعیت و مشخصات گمانه‌های حفاری شده در مسیر تونل انتقال (دهکردی و همکاران، ۱۳۹۱)

نوع سازند	موقعیت			عمق	شماره گمانه
	X	Y	Z		
بختیاری و آغاچاری	۴۳۰۶۹۰	۳۳۴۹۷۲۵	۲۳۹	۱۱۰	BH-9
آغاچاری	۴۳۰۳۵۶	۳۳۴۸۰۲۱	۲۱۹	۸۰	BH-10
آغاچاری	۴۳۰۲۲۱	۳۳۴۸۸۰۲	۲۶۳	۱۲۰	BH-11
آغاچاری	۴۲۹۸۲۰	۳۳۴۵۱۱۰	۱۹۵	۴۵	BH-12
بختیاری	۴۳۰۲۵۷	۳۳۵۱۲۸۵	۲۱۱	۹۰	BH-13

با بررسی حفاری‌های انجام شده در مسیر تونل انتقال آب حدود یک سوم لایه‌های زمین‌شناسی ابتدای مسیر سازند بختیاری و لایه‌های زمین‌شناسی ادامه مسیر سازند آغاچاری است. بخش ابتدایی مسیر از سازند بختیاری تشکیل گردیده که اغلب لایه‌های آن از کنگلومرای متوسط تا

درشت‌دانه خاکستری تا قهوه‌ای رنگ با سیمان‌شدگی ضعیف از نوع رسی تشکیل گردیده و میان لایه‌هایی از گل‌سنگ، لای‌سنگ، ماسه‌سنگ و گاهی از عدسی‌هایی از رس، ماسه و گاهی مارن در آن به چشم می‌خورد.

#### ۴-۸- هیدروژئولوژی مسیر تونل انتقال

بررسی‌های هیدروژئولوژی در مسیر تونل انتقال نشان می‌دهد که به دلیل شرایط مورفولوژی و توپوگرافی رسوبات آبرفتی دارای آب‌های زیرزمینی، در این مسیر وجود ندارد و حدود ۲/۲۵ کیلومتر از طول مسیر تونل از لایه‌های نفوذپذیر کنگلومرایی و ماسه‌سنگی سازند بختیاری تشکیل گردیده و حدود ۴/۸ کیلومتر آن، یعنی حدود ۷۰ درصد لایه‌های سنگی تشکیل دهنده مسیر از رسوبات نفوذ-ناپذیر گل‌سنگ، لای‌سنگ و مارن سازند آجاجاری تشکیل گردیده است.

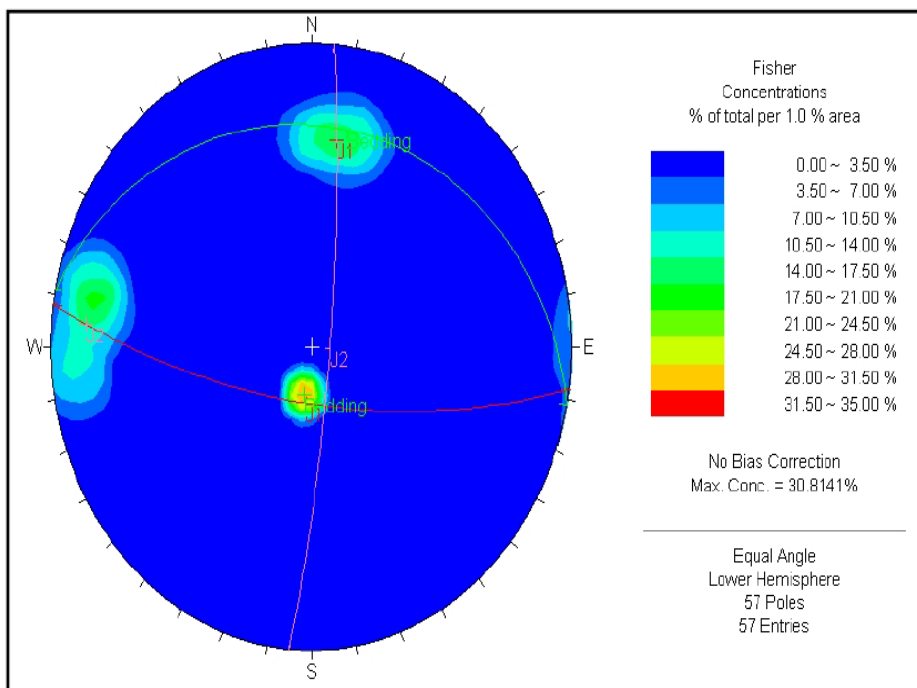
همچنین حفاری‌های اکتشافی انجام‌شده بر روی سازند آجاجاری در مسیر تونل انتقال نشان داده است که سطح ایستابی آب در گمانه‌ها در حین حفاری بین ۳/۶ تا ۵/۷ متری بوده و به این معنی است که فقط زون هوازده در سطح لایه‌های رس‌سنگی، گل‌سنگی و مارنی سازند آجاجاری قابلیت نفوذ و جذب آب را دارند و به محض رسیدن آب به سنگ بکر، بدلیل نفوذناپذیری آن‌ها، آب حفاری نفوذ و جذب نگردیده و بصورت سطح ایستابی کاذب خود را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت که سفره آب زیرزمینی در تراز مسیر حفاری تونل انتقال در سازند آجاجاری وجود ندارد و حفاری تونل بدون مشکل اساسی در این قسمت از مسیر تونل در شرایط خشک و یا کمی مرطوب انجام خواهد شد.

#### ۴-۹- ناپیوستگی‌ها

در محدوده مورد مطالعه بیشترین رخنمون سازندها مربوط به سازند آجاجاری است که بدلیل عملکرد پلاستیک در برابر نیروهای تکتونیکی عملاً درزه‌های بسیار محدودی در آن‌ها ایجاد گردیده و از طرفی فرسایش پذیری شدید این سازند باعث گردیده که رسوبات فرسایش یافته، سطح رخنمون



آن را بپوشاند. در جاهایی که سطح این لایه‌ها رخنمون دارند درزه‌های موجود در آنها به وسیله ژئوپس پر گردیده، ولی وجود لایه‌های نسبتاً مقاوم ماسه‌سنگی در لابه‌لای لایه‌های فرسایش‌پذیر دارای درز و شکاف بوده و برای اندازه‌گیری سیستم درزه‌ها و پارامترها و خصوصیات آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. برداشتی از ناپیوستگی‌های لایه‌های ماسه‌سنگی مسیر انجام شده‌است که پس از دسته‌بندی و رسم نمودار درزه‌ها، سه دسته درزه قابل تشخیص بوده که نمودار فراوانی و میانگین امتداد و شیب آن‌ها در شکل ۲-۴ رسم گردیده‌است.



شکل ۲-۴- نمودار فراوانی ناپیوستگی‌ها، میانگین شیب و جهت شیب آن‌ها در مسیر تونل (دهکردی و همکاران، ۱۳۹۱)

پارامترهای هندسی درزه‌ها، شامل گسترش و فاصله درزه‌ها، بازشدگی یا ضخامت مواد پرکننده، نوع مواد پرکننده درزه‌ها، وضعیت هوازدگی و زبری سطح درزه‌ها، در آن‌ها نیز برداشت گردیده که نتایج آن‌ها در جدول ۲-۴ ارائه شده است.

جدول ۴-۲- خصوصیات ناپیوستگی‌های لایه‌های ماسه‌سنگی مسیر تونل (دهکردی و همکاران، ۱۳۹۱)

درزه ها		لایه بندی B	پارامتر
J <sub>2</sub>	J <sub>1</sub>		
۶۹/۱۸۸	۸۲/۰۹۵	۱۸/۰۱۱	شیب و جهت شیب
۰/۵ تا ۲ متر	۰/۵ تا ۲ متر	۱ تا ۳ متر	فاصله ناپیوستگی ها
۰/۳ تا ۴ متر	۰/۵ تا ۵ متر	>۱۰۰ متر	گسترش ناپیوستگی ها
ژیپس و رس	ژیپس و رس	ماسه و رس	مواد پرکننده
۰/۵ تا ۲/۵ میلیمتر	۰/۵ تا ۲/۵ میلیمتر	< ۰/۱ میلیمتر	بازشدگی
زبر- ناهموار	زبر- ناهموار	صاف- ناهموار	وضعیت سطح درزه ها

#### ۴-۱۰- طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ

##### ۴-۱۰-۱- مقدمه

در طراحی سازه‌های مهندسی گرچه اطلاعات توصیفی و کیفی ناشی از بررسی‌های صحرایی ضروری است ولی به تنهایی جوابگوی نیازهای طراحی نیستند و الزاماً داده‌های کمی درباره ویژگی‌های ذاتی سنگ بکر و توده‌های سنگ را می‌طلبد. این داده‌ها محدوده وسیعی از خواص فیزیکی و مکانیکی و هیدرولیکی توده سنگی را شامل می‌شود.

در طراحی تونل‌ها اطلاعات مورد نیاز شامل اطلاعات زمین‌شناسی، خواص مکانیکی توده سنگی و ارزیابی تنش‌های زمین محدوده تونل است. به عبارت دیگر پارامترهای زیر از توده‌سنگ باید جمع‌آوری و در تلفیق با یکدیگر تجزیه و تحلیل شوند.

- ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی ناپیوستگی‌ها در توده‌سنگی
- ویژگی‌های مکانیکی سنگ بکر
- پارامترهای دینامیکی و استاتیکی توده‌سنگی

- تنش‌ها و جهات آن‌ها در زمین

#### ۴-۱۰-۲- انواع طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ

سامانه‌های طبقه‌بندی مهندسی، نظیر طبقه‌بندی مقاومت فشاری تک محوری و نسبت مدولی برای ماده‌سنگ و سامانه‌های GSI, Q, RMR, RSR به منظور ارزیابی کیفی و کمی توده‌های سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سامانه‌ها به پارامترهای مهمی نظیر مقاومت ماده‌سنگ، شاخص کیفی سنگ و شرایط ناپیوستگی‌های توده‌سنگ بستگی دارند.

مقاومت ماده‌سنگ به عنوان یک پارامتر مهم و ضروری طبقه‌بندی، در اکثر سامانه‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ در نظر گرفته می‌شود. این پارامتر به صورت مقاومت فشاری تک محوری از طریق آزمایش مستقیم در آزمایشگاه و یا به طور غیرمستقیم توسط شاخص مقاومت بار نقطه‌ای در محل تعیین می‌شود. شاخص کیفی سنگ یا RQD پارامتر دیگری است که در طبقه‌بندی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد و مبتنی بر مغزه بازیافتی اصلاح شده از سنگ است. دیگر پارامترهایی که در طبقه‌بندی‌های رایج توده‌سنگ استفاده می‌شود شرایط ناپیوستگی‌های سنگ، نظیر فاصله بین ناپیوستگی‌ها، وضعیت ناپیوستگی‌ها (زبری، تداوم، جدایش، پرشدگی و هوازدگی دیواره درزه)، تعیین موقعیت ناپیوستگی‌ها، وضعیت آب زیرزمینی (آب در حال جریان، فشار) و میدان تنش است (شهریار، ۱۳۹۰).

#### ۴-۱۰-۳- واحدهای زمین‌شناسی مسیر تونل انتقال

با توجه به مقاطع زمین‌شناسی مسیر تونل انتقال و با در نظر گرفتن کیفیت سنگ‌های حاصل از نمونه‌های حفاری شده و نتایج بدست آمده از آزمایشات مقاومتی این سنگ‌ها، سنگ‌هایی که دارای خصوصیات کیفیتی و پارامترهای مقاومتی مشابهی است، در یک واحد زمین‌شناسی قرار گرفته که به شرح ذیل هستند.

#### ۴-۱۰-۴ - واحد زمین‌شناسی کنگلومرای (CST)

تشکیلات زمین‌شناسی قسمت ابتدایی مسیر تونل انتقال آب (۰ تا ۱۱۹۰) سازند بختیاری بوده و این سازند از ارتوکنگلومرای نسبتاً سست با عدسی‌ها و یا میان‌لایه‌های ماسه‌سنگی و گل‌سنگی فاقد ناپیوستگی‌های سیستماتیک تشکیل گردیده است (تنها شکستگی‌های اتفاقی بسیار نامنظم، با سطوح زبر موجدار به‌صورت پراکنده در سطح رخنمون آن‌ها مشاهده می‌شود). این واحد زمین‌شناسی با علامت اختصاری CST نام‌گذاری می‌شود.

#### ۴-۱۰-۵ - واحد زمین‌شناسی ماسه‌سنگی (SST)

در حد فاصل بین سازند بختیاری و سازند آغاچاری (۱۹۵۰ تا ۲۵۸۰) لایه‌های نسبتاً ضخیم ماسه‌سنگی در تناوب با لایه‌های سیلت‌استون که میان لایه‌های نازک پاراکنگلومرا و گل‌سنگ نیز در آن مشاهده می‌شود، وجود دارد. این ماسه‌سنگ‌ها دارای درز و شکاف بوده و نسبتاً نفوذپذیر هستند و با واحد زمین‌شناسی ماسه‌سنگی یا SST نام‌گذاری می‌گردند.

#### ۴-۱۰-۶ - واحد زمین‌شناسی مارنی - گل‌سنگی (MMT)

این واحد زمین‌شناسی در حقیقت تشکیلات زمین‌شناسی سازند آغاچاری می‌باشد که اغلب طول مسیر ۲۵۸۰-۷۰۵۰ را تشکیل می‌دهند. این سازند از لایه‌های مارنی و گل‌سنگی نسبتاً ضخیم همراه با میان‌لایه‌های ماسه‌سنگ و رس‌سنگ و بعضاً لای سنگ تشکیل گردیده که با واحد زمین‌شناسی MMT نام‌گذاری می‌شوند (دهکردی و همکاران، ۱۳۹۱).

#### ۴-۱۱ - انتخاب روش حفاری تونل

با بررسی‌های فنی و اقتصادی انجام‌شده بر روی روش‌های حفاری در مسیر تونل، تاثیر عوامل زمین‌شناسی در انتخاب روش حفاری، مهم‌ترین عامل بوده و لذا بر همین اساس روش حفاری تونل انتخاب می‌گردد. با توجه به وجود سازند کنگلومرای بختیاری که از سنگدانه‌های شن، قلوه سنگ و

ماسه درشت دانه با سیمان‌شدگی ضعیف تشکیل گردیده و از نفوذپذیری بالایی برخوردار هستند، استفاده از روش آتشباری به دلیل احتمال هدرروی گاز انفجار، مناسب نیست. همچنین استفاده از این روش در لایه‌های ماری، گل‌سنگی و رس‌سنگی سازند آغاچاری به دلیل خاصیت انعطاف‌پذیری این سازند، امکان توسعه ترک و انتشار انرژی آزاد شده از انفجار، کم بوده و کاربرد موثری ندارد.

استفاده از ماشین‌های بازویی در این سازندها به دلیل این‌که مقاومت کنگلومرای بختیاری و همچنین لایه‌های ماری، گل‌سنگی و رس‌سنگی کمتر از ۲۵ مگاپاسکال است، از نظر راندمان حفاری مناسب بوده و کاربرد دارد، ولی به دلیل نیاز به سامانه نگهداری موقت و همچنین نیاز به حمل مصالح با ماشین‌آلات از طریق تونل‌های دسترسی و یا تونل‌های حمل و نقل (به خاطر طولانی بودن طول تونل) راندمان حفاری کاهش یافته و هزینه پروژه و زمان اجرای تونل افزایش می‌یابد. این روش برای تونل‌های کوتاه و همچنین ورودی و خروجی تونل‌های بلند مناسب است.

استفاده از ماشین‌های تمام مقطع به دلیل تنوع ماشین‌ها، در تمام شرایط زمین‌شناسی (از زمین‌های نرم و خاکی تا توده‌سنگ‌های مستحکم و سخت و حتی در زمین‌های ترکیبی خاک و سنگ) کاربرد داشته و قابل استفاده است. استفاده از قطعات بتنی (سگمنت) به عنوان پوشش بتنی داخل تونل در روش ماشین‌های تمام مقطع، همچنین سرعت بالای حفاری همراه با ایمنی پرسنل حفاری و در نتیجه کاهش زمان اجرای پروژه از مزایای دیگر این روش هستند. از محدودیت‌های این روش عدم طراحی مناسب نوع ماشین، قطر زیاد تونل، نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه و پرسنل متخصص و مجرب و همچنین شرایط تحریم‌های اقتصادی است.

با در نظر گرفتن شرایط زمین‌شناسی و همچنین طول تونل و زمان اجرای پروژه و با توجه به گزارش بررسی و انتخاب روش اجرای تونل، از طرف شرکت مشاور پیشنهاد استفاده از روش ماشین-های بازویی برای حفاری قسمت‌های ابتدا و انتهای تونل و ماشین تمام مقطع یا TBM برای حفاری کل تونل داده شده و بر همین اساس سامانه نگهداری تونل نیز پیشنهاد گردیده است.

## ۴-۱۲ - سامانه نگهداری تونل

در این قسمت سامانه نگهداری تونل برای دو بخش سنتی (۱۲۰ متر ابتدایی تونل جهت شروع حفاری مکانیزه<sup>۱</sup>) و بخش مکانیزه توسط شرکت مشاور تعیین شده که در ادامه خلاصه‌ای از آن آمده‌است.

با توجه به این که پارامترهای توده سنگ در مسیر تونل به روش GSI تعیین شده‌است لذا جهت تحلیل پایداری تونل و تعیین سامانه نگهداری از نرم افزار Phase2 استفاده شده‌است. جهت تعیین سامانه نگهداری موقت تونل در صورتی که حفاری از پرتال جنوبی (خروجی تونل) آغاز شود پارامترهای واحد MMT و در صورتی که حفاری از پرتال شمالی (ورودی تونل) آغاز شود از پارامترهای واحد CST استفاده شده‌است. با توجه به احتمال هجوم آب (شیب منفی) به داخل تونل در سازند بختیاری به سمت سازند آغاچاری در مواقع بارندگی، و امکان گل‌گرفتگی کله حفار، تورم و ... پیشنهاد شده‌است حفاری از پرتال خروجی شروع شود.

جهت تحلیل پایداری تونل و تعیین سامانه نگهداری در بخش مکانیزه حداکثر ارتفاع روباره در هر واحد زمین‌شناسی مهندسی مشخص و تحلیل‌ها بر اساس این مقاطع بحرانی صورت گرفته‌است. لازم به ذکر است که در مسیر تونل هیچ‌گونه زون برشی یا گسله مشاهده نشده‌است. پارامترهای مقاومتی مورد استفاده در تحلیل‌ها برای هر یک از واحدهای مهندسی فوق در جدول ۴-۳ ارائه شده‌است.

---

<sup>۱</sup> Start chamber

جدول ۴-۳- مشخصات مقاومتی سه واحد زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل چمشیر (دهکردی و همکاران، ۱۳۹۱)

GSI	$\sigma_{ci}$ (Mpa)	$m_i$	$m_b$	s	a	$\sigma_t$ (Mpa)	$\sigma_{cm}$ (Mpa)	$E_m$ (Mpa)	C	$\varphi$ (deg)	واحد
۴۰	۱۴,۳۷	۱۴,۱۶	۱,۶۶۱	۰,۰۰۱۳	۰,۵۱۱	۰,۰۱۱	۲,۳۹	۲۱۳۲	۰,۳۹۹	۳۷,۱۱	CST
۳۷	۲۸,۳	۱۳	۱,۳۷	۰,۰۰۰۹	۰,۵۱۴	۰,۰۱۹	۴,۲۱	۲۵۱۷	۰,۴۴۰	۴۱,۶	SST
۳۰	۱۶,۳۷	۷	۰,۵۷۵	۰,۰۰۰۴	۰,۵۲۲	۰,۰۱۲	۱,۴۹	۱۳۲۳	۰,۲۹۰	۲۸,۱	MMT

بنابراین با توجه به مشخصات مقاومتی واحدهای معرفی شده، قطر تونل، ارتفاع روباره در مقطع بحرانی و شرایط مرزی مشخص، اقدام به مدل‌سازی و آنالیز سازه‌ای تونل چمشیر در سه واحد فوق شده است. هر کدام از مدل‌های ساخته شده جهت حفاری مکانیزه در نرم افزار Phase2 در دو مرحله صورت گرفته است. به‌طور کلی سامانه نگهداری موقت و دائم پیش‌بینی شده در این مرحله از مطالعات از طرف شرکت مشاور در جدول ۴-۴ ارایه شده است. قطر تمام شده تونل بعد از نصب قطعات بتنی (سگمنت به ضخامت ۲۵ سانتیمتر و ۱۵ سانتیمتر فضای خالی برای تزریق پی گراول و دوغاب) برابر با ۵ متر خواهد بود.

جدول ۴-۴- سامانه نگهداری موقت و دائمی پیشنهادی برای تونل (دهکردی و همکاران، ۱۳۹۱)

تیپ	روش حفاری	طول سامانه نگهداری (متر)	سامانه نگهداری
I	سنتی یا ماشین بازویی	ورودی	وایر مش و شاتکریت به ضخامت ۷,۵ سانتیمتر و پوشش بتنی تقویت شده به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر
		خروجی	قاب فولادی (IPE12) به فواصل ۲ متری همراه با توری سیمی (وایر مش) و شاتکریت به ضخامت ۵ سانتی‌متر جهت نگهداری موقت و پوشش بتنی به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر
II	مکانیزه یا تمام مقطع	۷۰۵۰	قطعات بتنی مسلح پیش ساخته یا سگمنت به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر و مقاومت ۳۵ تا ۴۰ مگاپاسکال

#### ۴-۱۳- خلاصه فصل

در این فصل زمین‌شناسی مسیر تونل انتقال آب سد چمشیر بیان، که از نتایج آن (که توسط شرکت مشاور انجام شده است) برای مدل‌سازی فصل بعد استفاده شده است. خلاصه این فصل به شرح زیر است:

- از لحاظ زمین‌شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه در حاشیه جنوبی رشته کوه‌های زاگرس و تقریباً در بخش‌های میانی و حاشیه جنوب غربی آن و در دو سازند عمده‌ی آغاچاری و بختیاری قرار گرفته است.
- از برداشت ناپیوستگی‌ها در منطقه سه دسته درزه شامل لایه‌بندی و دو دسته درزه عمده شناسایی شده که ویژگی‌های آن‌ها در جدول ۴-۲ آمده است.
- مسیر تونل شامل سه واحد زمین‌شناسی مهندسی کنگلومرایبی (CST)، ماسه سنگی (SST) و مارنی-گلسنگی (MMT) است که مشخصات مقاومتی آن‌ها در جدول ۴-۳ آمده است.
- براساس نتایج بدست‌آمده و بررسی شرایط مسیر تونل روش حفاری پیشنهادی، حفاری مکانیزه تمام مقطع و سامانه نگهداری آن استفاده از قطعات بتنی پیش‌ساخته (سگمنت) با ضخامت ۲۵ سانتی‌متر و مقاومت ۳۵ تا ۴۰ مگاپاسکال بوده است.



## فصل پنجم

### مدل سازی عددی

## ۵-۱- مقدمه

در مدل‌سازی‌ها، پژوهشگران معمولاً سامانه نگهداری پوشش تونل‌های حفاری تمام مقطع را به صورت پیوسته و فاقد درزه بررسی می‌کنند، اما شواهد موجود از پروژه‌های مختلف نشان می‌دهد که بررسی دقیق محل اتصالات در حلقه‌های بتنی از اهمیت بالایی برخوردار است، چرا که محل اتصالات از لحاظ پایداری از استحکام کمتری برخوردار بوده و توانایی تحمل تنش و گشتاور خمشی برابر با دیگر قسمت‌های پوشش را ندارند. لذا در اکثر موارد پوشش از محل اتصالات دچار آسیب‌دیدگی می‌شود.

در سال ۱۹۶۴ شولز و دودک مدل حلقه نگهداری شده با فنر را پیشنهاد دادند. در این مدل نگهداری زمین با استفاده از فنرهای شعاعی و مماس در کل محیط نگهداری مدل می‌شود. حلقه بصورت همگن است که از تئوری الاستیک خطی پیروی می‌کند با استفاده از یکسری معادلات ساده فشارهای اولیه زمین بصورت شعاعی و مماس بر روی نگهداری وارد می‌شود (Wall, 1999). از معایب این روش در نظر نگرفتن شرایط واقعی توده‌سنگ در محیط‌های سنگی (از جمله ناپیوستگی‌های توده‌سنگ) دربرگیرنده تونل است؛ که در نتایج نهایی تاثیر خواهد گذاشت. بنابراین برای افزایش دقت در مدل‌سازی روش‌های عددی مختلف بررسی می‌شود و با توجه به ویژگی‌های هر کدام از این روش‌ها، روشی که بتواند شرایط واقعی زمین و همچنین اتصالات نگهداری را به صورت سه بعدی در نظر بگیرد انتخاب می‌گردد.

## ۵-۲- مدل‌های عددی

روش‌های عددی برای مدل‌سازی و تحلیل تنش در مسایل مکانیک سنگ در طول سه دهه گذشته گسترش یافته است. اهداف روش‌های عددی در مهندسی تونل متعدد است که از آن جمله می‌توان به تحلیل‌های کیفی مانند مطالعات پارامتری، آنالیز حساسیت و غیره و تحلیل‌های کمی مانند آنالیز طراحی و آنالیز برگشتی اشاره کرد. برخلاف روش‌های تجربی، روش‌های عددی امکان مدل

کردن تمامی عوامل موثر را به طور همزمان فراهم می‌کند. به همین دلیل استفاده از روش‌های عددی در طراحی فضاهای زیرزمینی امری اجتناب‌ناپذیر است. برنامه‌های کامپیوتری متعددی بر مبنای استفاده از روش‌های عددی-چه با اهداف مهندسی عمران و چه با اهداف مهندسی معدن- در دسترس هستند (Sinha, 1989). روش‌های عددی عبارت است از:

### ۵-۲-۱- روش المان محدود

در روش المان محدود، زمین اصولاً به صورت پیوسته مدل می‌شود و ناپیوستگی‌ها می‌تواند به صورت جداگانه مدل شوند. محیط مساله به تعداد محدودی المان تقسیم می‌شود که در نقاط گرهی به هم متصل هستند.

### ۵-۲-۲- روش تفاضلات محدود

تفاوت این روش با روش اجزا محدود این است که در روش تفاضلات محدود مقادیر مجهول به طور صریح محاسبه می‌شود. بدین معنا که گام زمانی، کوچک‌تر از زمانی است که تغییرات بین دو گره مجاور منتشر شود.

### ۵-۲-۳- روش اجزای مرزی

این روش، روش نسبتاً جدیدی است اما استفاده از آن در مهندسی تونل در حال گسترش است. مانند روش‌های اجزا محدود و تفاضلات محدود، روش اجزای مرزی نیز زمین را به صورت پیوسته مدل می‌کند. در این روش از کل محیط مساله فقط لازم است مرز حفاری مشخص شود. محیط داخل این مرزها با معادلات دیفرانسیل جزئی شبیه‌سازی می‌شود.

### ۵-۲-۴- روش اجزا مجزا

در روش اجزا مجزا، توده‌سنگ با بلوک‌هایی که توسط درزه از هم جدا شده‌اند مدل می‌شود. نیرو و تغییر مکان مرزی از روند محاسباتی که بر پایه حرکت بلوک‌ها انجام می‌شود، محاسبه می‌گردد

که این حرکت به علت نیروی مرزی یا حجمی موجود در سامانه، ایجاد شده است.

## ۵-۲-۵- روش‌های ترکیبی

هدف از روش‌های ترکیبی استفاده از تلفیق روش‌های بالا به منظور حذف معایب و بدست آوردن مزایای روش‌ها تا حد ممکن است. به عنوان مثال، در مدل‌سازی یک فضای زیرزمینی مرز حفاری رفتار غیرخطی از خود نشان می‌دهد، در صورتی که توده‌سنگ همان محدوده مرزی به صورت الاستیک رفتار می‌کند (Sinha, 1989). بنابراین توده‌سنگ نزدیک محل را می‌توان با استفاده از مدل اجزای مجزا<sup>۱</sup> یا اجزا محدود و در مرزها از روش اجزای مرزی استفاده کرد.

## ۵-۳- انتخاب روش عددی مناسب

با توجه به ماهیت مساله نیاز به انتخاب روش عددی و نرم‌افزار مناسب است. بسیاری از برنامه‌های کامپیوتری مبتنی بر روابط مکانیک محیط‌های پیوسته (برنامه‌های المان محدود و تفاضل محدود لاگرانژی) می‌توانند تغییرپذیری در انواع مواد و نیز رفتار ساختاری غیرخطی را که معمولاً به توده‌های سنگی مربوط می‌شود، شبیه‌سازی کنند، اما لحاظ کردن ناپیوستگی‌ها نیاز به روشی مبتنی بر محیط ناپیوسته دارد.

کاندال<sup>۲</sup> و هارت<sup>۳</sup> تعریف زیر را برای روش اجزای مجزا ارائه کردند. عنوان اجزای مجزا تنها به برنامه‌ی کامپیوتری گفته می‌شود که:

الف- اجزای جابجایی‌ها و چرخش‌های محدود را (از جمله جدایش کامل) به پیکره‌های<sup>۴</sup> جداگانه بدهد.

ب- همزمان با پیشروی محاسبات، تماس‌های جدید را به‌طور خودکار شناسایی کند.

---

<sup>۱</sup> discrete element

<sup>۲</sup> Cundall

<sup>۳</sup> hart

<sup>۴</sup> body

فرمول‌بندی و توسعه‌ی روش اجزای مجزا طی چندین سال از زمان اولین تعریف توسط کاندال<sup>۱</sup> شکل گرفته است. در اصل، روش اجزا مجزا برای شبیه‌سازی دو بعدی یک توده‌سنگ درزه‌دار ایجاد شد. مدل‌های اجزا مجزا برای مسایل سنگ درزه‌دار توسط بسیاری از محققان ساخته شده است. برنامه‌ی دو بعدی UDEC (Lemos, 1985, Cundall, 1980) ابتدا در سال ۱۹۸۰ برای شبیه‌سازی پیکره‌های صلب و یا تغییرشکل‌پذیری که با ناپیوستگی جدا شده‌اند، طراحی شد. این برنامه توانایی اجرای تحلیل‌های استاتیک و دینامیک را دارد. در سال ۱۹۸۳، دکتر کاندال شروع به ساخت نسخه‌ی سه بعدی این روش کرد. نتیجه‌ی کار وی برنامه‌ی 3DEC (Cundall & Hart, 1988) است. آخرین برنامه‌های اجزای مجزا، برنامه‌های جریان ذرات دوبعدی و سه‌بعدی PFC<sup>۲d</sup> و PFC<sup>۳d</sup> هستند (1999 Itasca).

## ۵-۴ - معرفی نرم افزار 3DEC

3DEC نرم‌افزاری بر مبنای روش اجزای مجزا است. این روش در دسته‌ی روش‌های تحلیل محیط‌های ناپیوسته قرار دارد. تفاوت میان یک محیط ناپیوسته و یک محیط پیوسته، وجود سطوح مشترک یا تماس میان پیکره‌های جداگانه‌ی تشکیل دهنده‌ی سامانه است. در این نرم افزار واکنش محیط ناپیوسته (مانند یک توده‌سنگ درزه‌دار) در معرض بارگذاری استاتیک یا دینامیک شبیه‌سازی می‌شود. ساختمان این محیط ناپیوسته به صورت مجموعه‌ای از بلوک‌های جداگانه تعریف شده و ناپیوستگی‌ها به صورت شرایط مرزی میان بلوک‌ها در نظر گرفته می‌شود و جابجایی‌های زیاد در امتداد ناپیوستگی‌ها و چرخش بلوک‌ها امکان‌پذیر است. رفتار هر بلوک می‌تواند به صورت ماده‌ای صلب یا تغییرشکل‌پذیر باشد. بلوک‌های تغییرشکل‌پذیر به شبکه‌ای از المان‌های تفاضل محدود<sup>۲</sup> تبدیل شده و هر یک از این المان‌ها مطابق با قانون تنش-کرنش خطی یا غیرخطی از پیش تعریف شده‌ای رفتار می‌کند (Itasca, 1999).

---

<sup>۱</sup> Cundall

<sup>۲</sup>finite difference elements

### ۵-۴-۱- پارامترهای مورد نیاز نرم افزار 3DEC

این نرم افزار پارامترهای سنگ بکر و ویژگی های ناپیوستگی ها را بر اساس مدل های رفتاری اختصاص یافته به آنها نسبت می دهد، مهمترین پارامترهای مورد استفاده در این نرم افزار عبارتند از (Itasca, 1999):

- وزن مخصوص یا چگالی سنگ بکر

- خواص تغییرشکل پذیری سنگ بکر شامل مدول بالک و مدل برشی که با فرمول های ۵-۱ و ۵-۲ بدست می آیند:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1-5)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2-5)$$

E: مدول الاستیک و  $\nu$ : ضریب پواسون است.

- خواص مقاومتی سنگ بکر شامل چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی ( $\varphi$ )، مقاومت فشاری تک محوره (UCS) و مقاومت کششی (T).

خواص مربوط به ناپیوستگی ها مانند شیب، فاصله داری، تداوم، جدایش، زاویه اصطکاک و چسبندگی سطح درزه، زاویه اتساع، مقاومت کششی، سختی نرمال و برشی ناپیوستگی ها.

### ۵-۴-۲- مدل های ساختاری در نرم افزار 3DEC

در این بخش نگاهی بر مدل های ساختاری بلوکی و درزه ای در نرم افزار 3DEC و بیان این که چه موقع از یک مدل استفاده شود، آورده شده است.

## الف - مدل‌های ماده بلوکی تغییر شکل پذیر

پنج مدل ماده‌ی بلوکی در 3DEC تعریف شده است (Itasca, 1999):

✓ تهی

✓ الاستیک و ایزوتروپ

✓ الاستیک و غیرایزوتروپ

✓ پلاستیسیته موهر-کولمب

✓ درزه سخت یا نرم شونده‌ی کرنش دو سویه

هر مدل بلوکی به نحوی طراحی می‌شود که بیانگر نوع خاصی از رفتار ساختاری و معمولاً مربوط به مواد زمین باشد. جدول ۵-۱ خلاصه‌ای از مدل‌های بلوکی در 3DEC را به همراه مثال‌هایی از مواد معرف و کاربردهای احتمالی این مدل‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱- مدل‌های ساختاری بلوکی در 3DEC (Itasca, 1999)

مدل	ماده معرف	نمونه کاربرد
تهی	خلأ	حفره‌ها، حفاری‌ها و نواحی که در آن مواد در مراحل بعدی افزوده خواهد شد.
الاستیک	محیط پیوسته همگن و ایزوتروپیک (رفتار تنش-کرنش خطی)	مواد ساختگی (مانند فولاد) تحت بارگذاری کمتر از حد مقاوتی آن‌ها، محاسبه ضریب ایمنی
پلاستیسیته دروکر-پراگر	کاربرد محدود، رس‌های نرم با اصطکاک کم	مدل رایج برای مقایسه دو برنامه المان محدود مطلق
پلاستیسیته موهر-کولمب	مواد دانه‌ای سست و به هم چسبیده، خاک‌ها، سنگ و بتن	مکانیک عمومی خاک و سنگ (مثلاً پایداری شیب و حفاری‌های زیرزمینی)
سخت یا نرم شونده‌ی کرنش موهر-کولمب با درزه ...	مواد دانه‌ای که رفتار سخت یا نرم شدگی غیر خطی از خود نشان می‌دهند یا مواد نازک لایه با آنیزوتروپی مقاومتی	مطالعات مربوط به پس از شکست (مثلاً ریزش پیش رونده، ستون یا فضای تسلیم شونده) و حفاری‌ها در لایه‌های ...

## ب- مدل‌های ماده‌ی درزه<sup>۱</sup>

دو مدل برای بیان رفتار ناپیوستگی‌ها موجود است:

✓ تماس سطحی درزه<sup>۲</sup>

✓ تسلیم پیوسته<sup>۳</sup>

مدل‌های ساختاری درزه برای بیان واکنش واقعی درزه‌های سنگی طراحی شده‌اند. مدل تماس سطح درزه برای بلوک‌های نزدیک به هم و دارای تماس سطحی در نظر گرفته شده است. این مدل، رفتار خطی حد تسلیم و سختی درزه را نشان می‌دهد و بر اساس خواص الاستیک سختی، اصطکاکی، چسبندگی، مقاومت کششی و ویژگی‌های اتساع معمول در درزه‌های سنگی است. این مدل ضعیف‌شدگی ناشی از جابجایی درزه را با کم شدن چسبندگی و مقاومت کششی در آغاز شکست برشی و کششی شبیه‌سازی می‌کند. مدل درزه‌ی تسلیم پیوسته، مدلی پیچیده‌تر است که رفتار ضعیف‌شدگی پیوسته را به صورت تابعی از جابجایی تجمعی برشی- پلاستیک شبیه‌سازی می‌کند (Itasca, 1999). جدول ۵-۲ به‌طور خلاصه مدل‌های درزه در 3DEC را به همراه مثال‌هایی از ماده‌های معرف و کاربردهای احتمالی آن‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۵-۲- مدل‌های ساختاری درزه در 3DEC (Itasca, 1999)

مدل	ماده معرف	نمونه کاربرد
تماس سطحی	درزه‌ها، گسل‌ها و صفحات لایه بندی در سنگ	مکانیک سنگ عمومی (مثلاً حفاری‌های زیرزمینی)
تسلیم پیوسته	درزه‌های سنگی با تخریب پیش رونده	بارگذاری چرخه ای و معکوس شدگی بار ، تحلیل دینامیک

<sup>۱</sup> Joint Material Models

<sup>۲</sup> area contact

<sup>۳</sup> Continuously yielding



### ۵-۴-۳ - خواص درزه در 3DEC

به‌طور عادی خواص درزه از آزمایش در آزمایشگاه (مثلاً آزمایش‌های سه‌محوری و برش مستقیم) به دست می‌آید. این آزمایش‌ها خواص فیزیکی زاویه‌ی اصطکاک، چسبندگی، زاویه‌ی اتساع و مقاومت کششی و نیز سختی‌های نرمال و برشی را تعیین می‌کند. زاویه‌ی اصطکاک و چسبندگی مطابق با پارامترهای معیار مقاومت کلمب هستند. عموماً مقادیر سختی‌های نرمال و برشی برای درزه‌های پر شده با رس نرم، در محدوده‌ی ۱۰ تا ۱۰۰ مگا پاسکال بر متر و برای درزه‌های محکم در گرانیت و بازالت، بیش از ۱۰۰ گیگا پاسکال است (میردار، ۱۳۸۳).

با محاسبه‌ی برگشتی اطلاعات تغییرشکل‌پذیری و ساختار درزه در توده‌سنگ‌های درزه‌دار و تغییرشکل‌پذیری سنگ بکر، می‌توان مقادیر تقریبی سختی را بدست آورد. اگر فرض شود که توده-سنگ درزه‌دار دارای واکنش تغییرشکل مشابه با یک محیط الاستیک معادل باشد، می‌توان روابط میان خواص سنگ درزه‌دار و خواص محیط معادل را بدست آورد. برای بارگذاری تک محوری سنگی دارای یک دسته درزه با فاصله میان درزه‌های یکسان که عمود بر جهت بارگذاری قرار گرفته است (Itasca, 1999)، این رابطه صدق می‌کند:

$$\frac{1}{E_m} = \frac{1}{E_r} + \frac{1}{KnS} \quad (3-5)$$

یا

$$Kn = \frac{E_m \cdot E_r}{S(E_r - E_m)} \quad (4-5)$$

که در آن  $E_m$ ، مدول دگرشکل‌پذیری توده‌سنگ،  $E_r$ ، مدول دگرشکل‌پذیری سنگ بکر،  $Kn$  سختی نرمال درزه و  $S$  فاصله‌ی میان درزه‌ها است. عبارت مشابهی را نیز می‌توان برای سختی برشی درزه بدست آورد:

$$K_s = \frac{G_m \cdot G_r}{S(G_r - G_m)} \quad (5-5)$$

که در آن  $G_m$ ، مدول برشی توده سنگ و  $G_s$ ، مدول برشی سنگ بکر و  $K_s$  سختی برشی درزه است.

با فرض محیط پیوسته معادل برای سه دسته درزه متعامد، روابط زیر بدست می آید:

$$E_i = \left( \frac{1}{E_r} + \frac{1}{S_i + K_{ni}} \right)^{-1} \quad (6-5)$$

$$G_{ij} = \left( \frac{1}{G_r} + \frac{1}{S_i + K_{si}} + \frac{1}{S_j + K_{sj}} \right)^{-1} \quad (i=1,2,3)$$

که در آن  $K_{si}$  سختی برشی درزه  $i$  ام و  $K_{ni}$  سختی نرمال درزه  $i$  ام

### ۵-۵- مراحل مدل سازی در نرم افزار 3DEC

برای تحلیل در نرم افزار 3DEC در حالت استاتیکی مراحل زیر جهت ایجاد مدل انجام شده

است.

#### ۵-۵-۱- ایجاد هندسه کلی مدل

برای بیشتر تحلیل های ژئومکانیکی در نرم افزار 3DEC، ساخت مدل با یک بلوک به اندازه ای

که ناحیه فیزیکی مورد تحلیل را دربر بگیرد شروع می شود. سپس ویژگی های این بلوک با برش دادن

آن به بلوک های کوچک تر تعریف می شود که مرز این بلوک های کوچک تر بیان کننده ساختار زمین-

شناسی (مثلا گسل ها، صفحات لایه بندی، ساختار درزه) و سازه های مهندسی از قبیل حفاری های

زیرزمینی و تونل ها است.

در مدل، تمام بلوک ها مختصات  $x, y, z$  رئوس و مرکزهایشان تعریف می شوند. تماس های میان

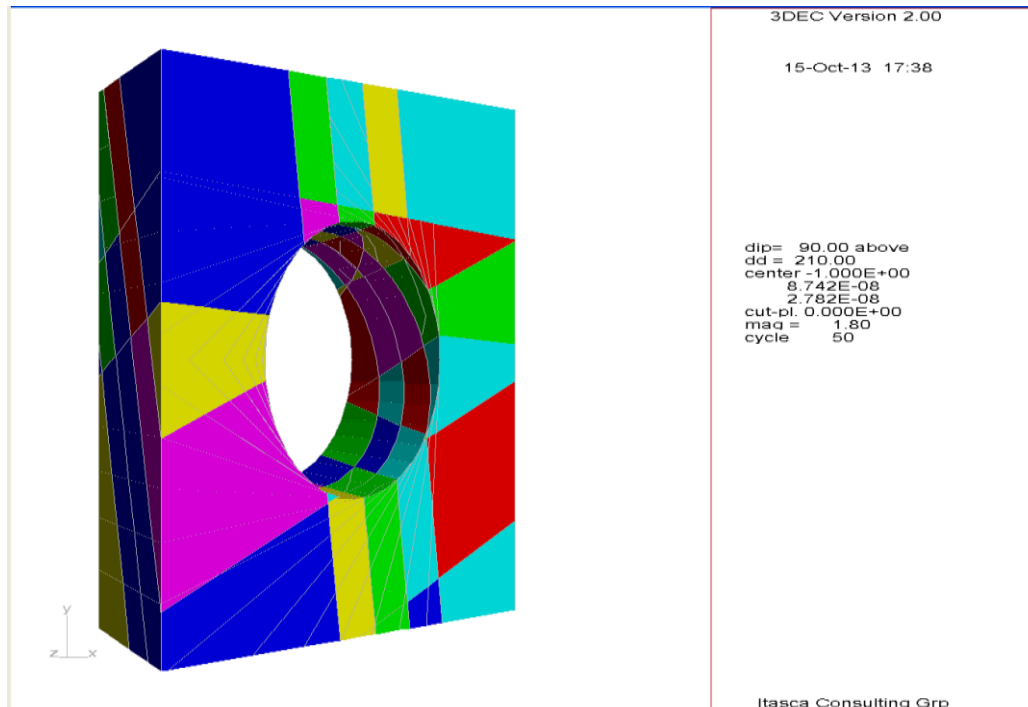
بلوک ها نیز همانند نقاط شبکه داخل بلوک های تغییر شکل پذیر با مختصات مکانی خود تعریف می-

شوند. نحوه ی ساخت مدل شامل برش دادن بلوک مدل در امتداد صفحاتی است که موقعیت آن ها با

جهت (شیب و جهت شیب) و محل یک نقطه روی صفحه تعریف می شود (Itasca, 1999). مدل مورد

نظر در ابعاد  $10 \times 10 \times 3/9$  که شامل سه گام پیشروی ماشین حفار است، طراحی گردیده است. شکل

۵-۱ هندسه سه بعدی تونل انتقال آب سد چمشیر را نشان می دهد.



شکل ۵-۱- هندسه سه بعدی تونل انتقال آب سد چمشیر

### ۵-۵-۲- تعریف خواص و مدل مشخصه رفتاری بلوکها

در این مرحله خواص مدل رفتاری بلوکها براساس نوع مدل رفتاری تعیین می شود. مدل رفتاری بلوکها برای مدل ساخته شده مدل رفتاری موهر-کلمب است. خواص ژئومکانیکی توده سنگ دربرگیرنده تونل انتقال آب سد چمشیر که شامل خواص فیزیکی و مکانیکی است، در جدول ۵-۳-۳-۵ ارائه شده است.

جدول ۵-۳-۳-۵- خواص فیزیکی و مکانیکی توده سنگ (دهکردی و همکاران، ۱۳۹۱)

چگالی	مدول الاستیک	نسبت پواسون	مقاومت فشاری	چسبندگی	زاویه اصطکاک
$\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	(Gpa)		تک محوره (Mpa)	(Mpa)	(deg)
۲/۷	۱/۳۲۳	۰/۳	۱۷/۵	۰/۳	۲۸/۵

توده‌سنگ مورد نظر شامل سه دسته درزه اصلی (لایه‌بندی با دو دسته درزه اصلی) است، خصوصیات این ناپیوستگی‌ها در جدول ۴-۵ آمده است. همچنین مدل رفتاری برای درزه‌های محیط، مدل درزه‌ای تماس سطحی درزه لغزش کولمب انتخاب و برای تعیین مقدار سختی نرمال و برشی آن‌ها از فرمول ارایه شده در روابط ۴-۵ و ۵-۵ استفاده شده است.

جدول ۴-۵- خصوصیات ناپیوستگی‌های منطقه (دهکردی و همکاران، ۱۳۹۱)

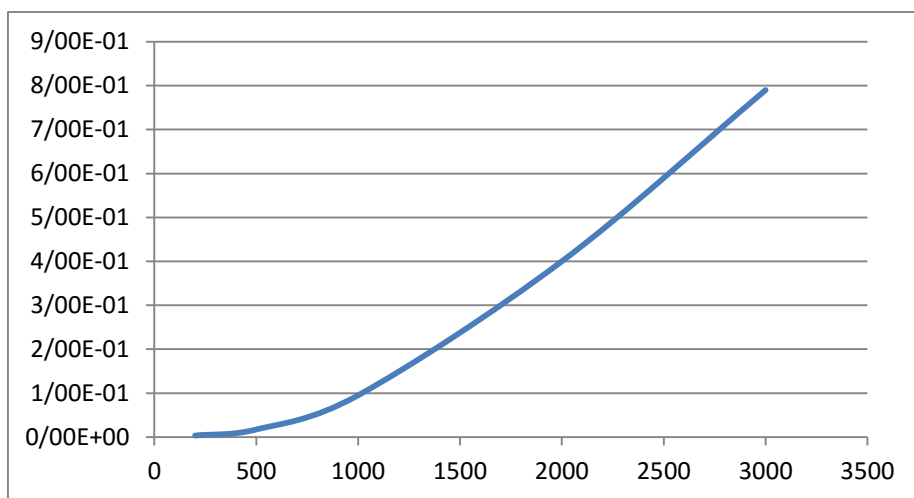
درزه‌ها		لایه بندی B	پارامتر
J <sub>2</sub>	J <sub>1</sub>		
۶۹/۱۸۸	۸۲/۰۹۵	۱۸/۰۱۱	شیب و جهت شیب
۰/۵ تا ۲ متر	۰/۵ تا ۲ متر	۱ تا ۳ متر	فاصله ناپیوستگی‌ها
۰/۳ تا ۴ متر	۰/۵ تا ۵ متر	>۱۰۰ متر	گسترش ناپیوستگی‌ها
ژیپس و رس	ژیپس و رس	ماسه و رس	مواد پرکننده
۰/۵ تا ۲/۵ میلیمتر	۰/۵ تا ۲/۵ میلیمتر	< ۰/۱ میلیمتر	بازشدگی
زبر- ناهموار	زبر- ناهموار	صاف- ناهموار	وضعیت سطح درزه‌ها

### ۳-۵-۵- شرایط مرزی و ذاتی

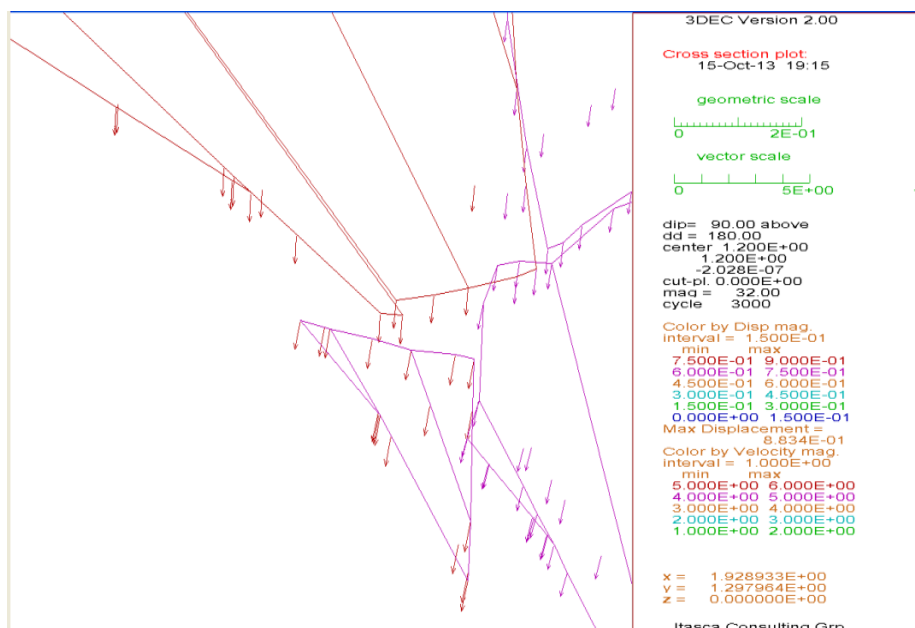
این مرحله عمدتاً شامل تعریف وضعیت تنش‌های اولیه یا ذاتی، بارگذاری‌ها و اعمال شرایط مرزی است. به همین منظور مرز پایین مدل‌ها در جهت قائم (در جهت  $y$ ) ثابت شده تا از جابجایی در این جهت جلوگیری شود. جابجایی مرزهای جانبی نیز در جهت افقی (در جهات  $x$  و  $z$ ) صفر تعریف شده است. همچنین برای اعمال تنش‌های برجای مورد نظر در مدل، حداکثر عمق معادل ۲۰۰ متر، برای تونل انتخاب شده است. پس از تعریف خواص توده‌سنگ و شرایط ناپیوستگی‌ها در مدل و حفاری تونل با قطر مورد نظر (طرح تونل انتقال چمشیر) در نرم‌افزار 3DEC شرایط تعادل و جابجایی‌ها از نتایج این نرم‌افزار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۵-۶- تحلیل تونل بدون سامانه نگهداری

با انتخاب تاریخچه جابجایی در راستای قائم در نقطه‌ای واقع در سقف تونل مشخص می‌شود که با افزایش مقدار سیکل‌های محاسباتی این مقدار (جابجایی در راستای قائم) افزایش می‌یابد که در شکل ۵-۲ نشان داده شده‌است. این پدیده نمایانگر تشکیل گوه در سقف تونل است و نشان دهنده‌ی آن است که تونل نیازمند نگهداری خواهد بود.



شکل ۵-۲- تاریخچه جابجایی در راستای قائم در نقطه (۵، ۰/۰، ۲) واقع در سقف تونل



شکل ۵-۳- مقطع عمودی از گوه ایجاد شده در سقف تونل، نمایش بردارهای جابجایی

## ۷-۵- بررسی پایداری تونل بدون نگهداری براساس کرنش ساکورایی

ساکورایی در سال ۱۹۸۶ روشی را برای ارزیابی پایداری سازه‌های زیرزمینی با توجه به کرنش بحرانی پیشنهاد کرده است که براساس نتایج آزمایشات فشاری تک‌محوره بر روی سنگ‌های مختلف تعریف می‌شود. این روش اغلب به‌عنوان روشی استاندارد برای محاسبه همگرایی (جابجایی نسبی دیواره‌های سازه‌های زیرزمینی) استفاده می‌شود. ساکورایی سه سطح کرنش را برای سنگ ارایه داده است که بر اساس مدول الاستیسیته سنگ استوار هستند. بر این اساس، رابطه (۷-۵)، حد بالای کرنش (کرنش شکست) و رابطه (۸-۵)، حد پایین کرنش را ارایه می‌دهند. رابطه (۹-۵)، میانگین لگاریتمی این دو رابطه را نشان می‌دهد (Sakurai, 1997). به منظور محاسبه جابجایی مجاز از رابطه ۱۰-۵ استفاده می‌شود. که در آن  $U_c$  جابجایی مجاز و  $a$  شعاع معادل تونل است که برای تونل با مقطع دایروی همان شعاع تونل است.

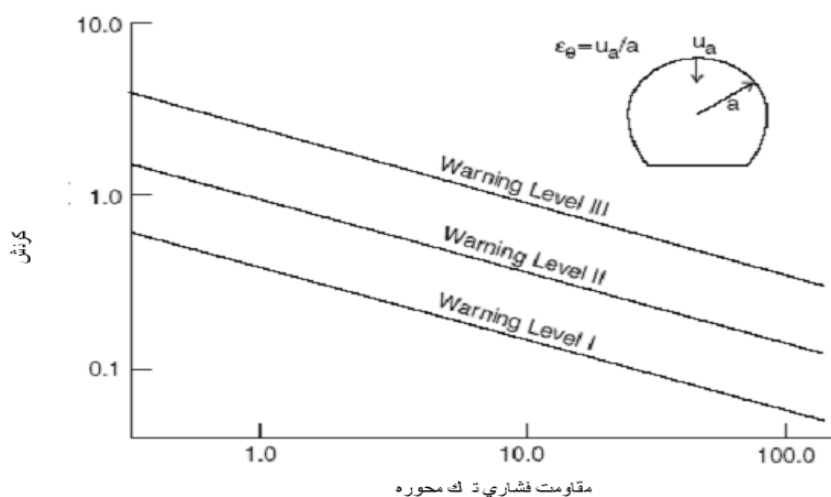
$$\text{Log } \varepsilon_c = -0.25 \text{ Log}E - 0.85 \quad (7-5)$$

$$\text{Log } \varepsilon_c = -0.25 \text{ Log}E - 1.22 \quad (8-5)$$

$$\text{Log } \varepsilon_c = -0.25 \text{ Log}E - 1.59 \quad (9-5)$$

$$\varepsilon_c = \frac{U_c}{a} \quad (10-5)$$

ساکورایی تراز هشدار خطر ۲ را به عنوان مبنای طراحی تونل‌ها پیشنهاد کرده است. تراز هشدار خطر ۳ پایداری کوتاه مدت را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۴- سطوح هشدار خطر در پایداری فضاهای زیرزمینی (Sakurai, 1997)

که برای تونل مورد نظر عبارتست از:

$$\text{Log } \varepsilon_c = -0.25 \text{ Log } (13230) - 1.22$$

$$\varepsilon_c = 5.61 \text{ e}^{-3}$$

$$U_c = 14 \text{ mm}$$

میزان جابجایی مجاز که از روابط ساکورایی بدست آمده برابر با ۱۴ میلی‌متر است که مقدار آن در مقایسه با جابجایی‌های به‌دست آمده از مدل‌سازی عددی با نرم افزار 3DEC کمتر است که عدم پایداری تونل را اثبات و آن را نیازمند نصب سامانه نگهداری می‌داند.

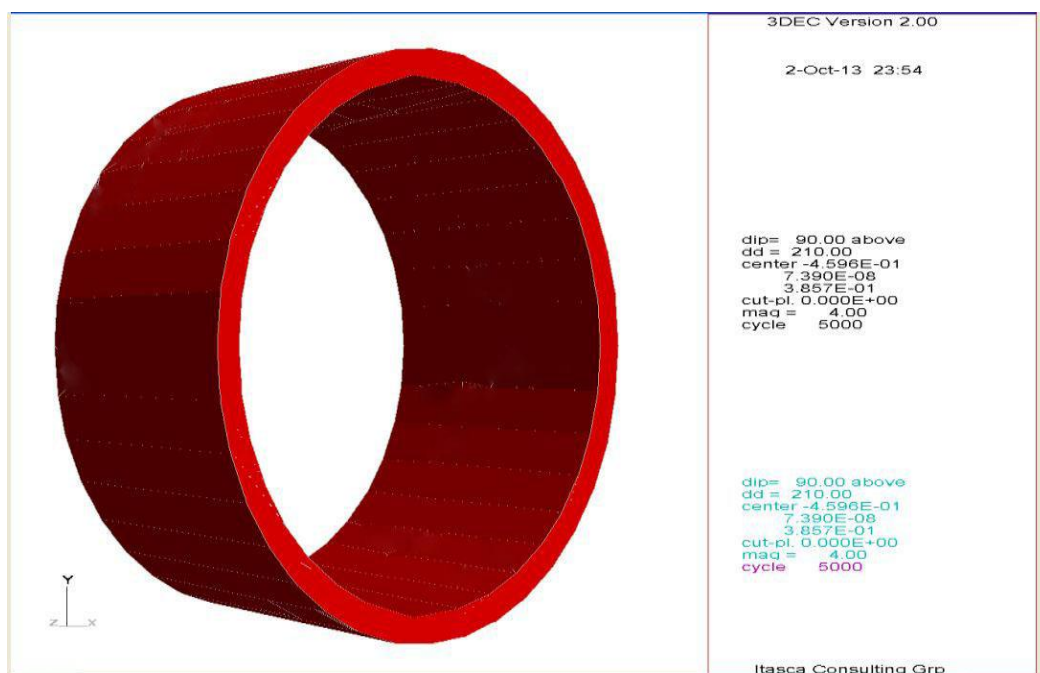
## ۵-۸- تحلیل تونل با حلقه پیوسته

با توجه به بررسی‌های انجام شده برای تعیین ضخامت پوشش مورد نیاز تونل در فصل پنجم، که بیانگر استفاده روش حفاری مکانیزه و اجرای پوشش سگمنتی به ضخامت ۲۵ سانتیمتر و مقاومت ۳۵ تا ۴۰ مگاپاسکال بود، در این مرحله در نرم افزار 3DEC، پوشش را به صورت یک حلقه پیوسته با عرض ۳/۹ متر (معادل مجموع سه گام پیشروی ماشین حفار) و با توجه به مشخصات بتن مورد استفاده در تونل انتقال آب سد چمشیر که در جدول ۵-۵ آمده، طراحی شده است.

جدول ۵-۵- مشخصات بتن مورد استفاده در تونل انتقال آب سد چمشیر برای مدل‌سازی در حالت حلقه پیوسته (دهکردی و همکاران، ۱۳۹۱)

مقاومت فشاری	وزن مخصوص	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته	ضخامت	شعاع خارجی	شعاع داخلی
تک محوره بتن	بتن	بتن	بتن	پوشش	حلقه	حلقه
(MPa)	(Kgr/m <sup>3</sup> )		(GPa)	(m)	(m)	(m)
۵۰	۲۴۰۰	۰/۲	۳۵	۰/۲۵	۲/۵	۲/۲۵

با توجه به هندسه مساله و تونل، پوشش تونل در حالت حلقه پیوسته (بدون در نظر گرفتن اتصالات) در شکل ۵-۵ نمایش داده شده است.

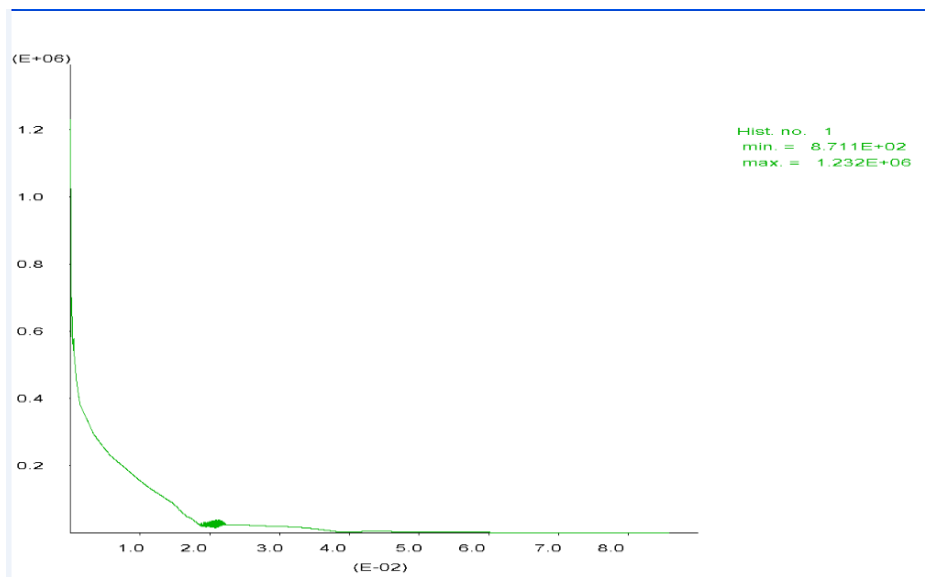


شکل ۵-۵- هندسه پوشش تونل انتقال آب سد چمشیر با حلقه پیوسته در نرم افزار 3DEC

با ایجاد هندسه مساله و اعمال شرایط مرزی و خواص بلوک‌ها و مدل‌های رفتاری مورد نظر، مدل برای تحلیل در نرم‌افزار 3DEC با گام محاسباتی لازم مورد بررسی قرار داده شده است. قبل از بررسی خروجی‌های نرم‌افزار، شرایط تعادل مساله بررسی می‌گردد. در یک تحلیل، در تعادل بودن مدل پیش از اعمال تغییرات بسیار مهم است. برای مطمئن شدن از آن که هیچ نیروی نامتعادل بزرگی وجود

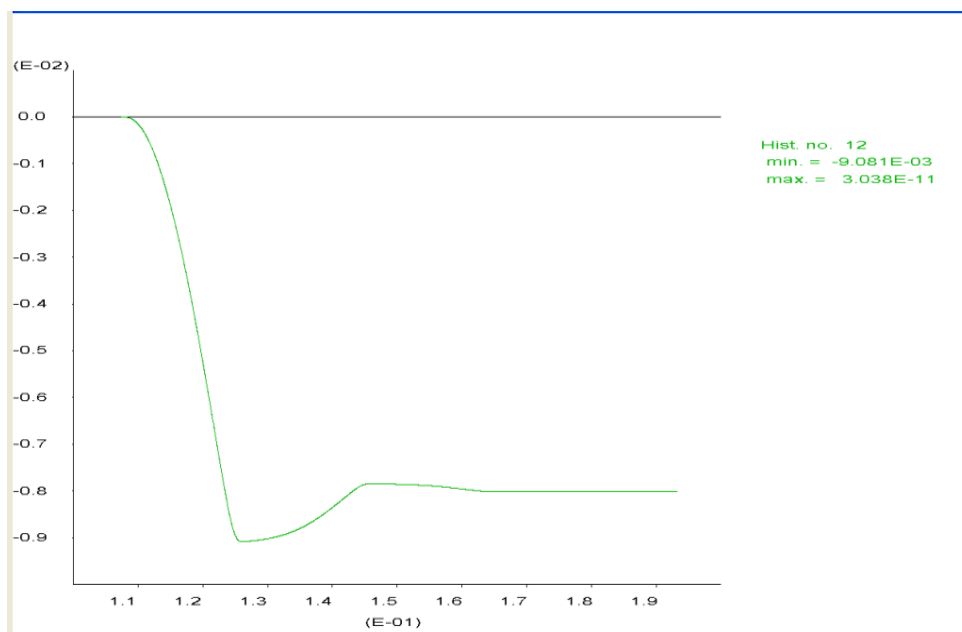


ندارد، تاریخچه‌ی تعداد زیادی از متغیرها ضبط می‌شود. در یک تحلیل اگر تعداد گام بیش از مقدار مورد نیاز برای رسیدن مدل به تعادل باشد، اثر مخربی بر مدل نخواهد داشت ولی اگر تعداد گام کافی نباشد بر تحلیل اثر خواهد گذاشت. در شکل ۵-۶ نمودار نیروهای نامتعادل نمایش داده شده است.



شکل ۵-۶- تاریخچه نیروهای نامتعادل در حالت پوشش پیوسته

با بررسی نمودار جابجایی در نقطه‌ای واقع در سقف تونل، تاریخچه‌ی جابجایی در راستای  $y$  نشان می‌دهد که گوه ایجاد شده در سقف تونل پس از ۸ میلی‌متر جابجایی در راستای قائم به تعادل نهایی می‌رسد و متوقف می‌شود. در شکل ۵-۷ این نمودار نمایش داده شده است.



شکل ۵-۷- تاریخچه‌ی جابجایی در راستای y در نقطه (۵، ۰/۰، ۲)، گوه پس از ۸ میلی‌متر جابجایی پایدار شده است.

## ۵-۹- تحلیل تونل با پوشش سگمنتی (در نظر گرفتن اتصالات)

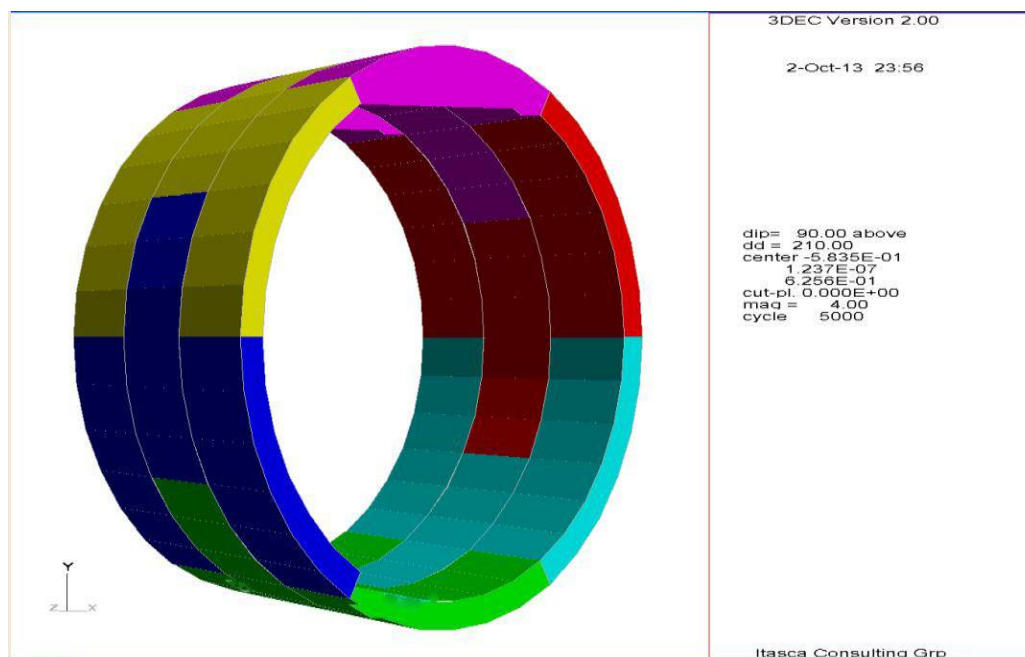
بر اساس بررسی‌های انجام شده در تونل انتقال آب سد چمشیر، روش حفاری مناسب براساس مطالب فصل قبل، روش حفاری مکانیزه تمام مقطع با دستگاه TBM انتخاب شده است. سامانه نگهداری در این روش حفاری استفاده از قطعات بتنی پیش‌ساخته (سگمنت) است که توسط خود دستگاه نصب می‌شود. با توجه به این که در مدل‌سازی به صورت پیوسته محل اتصالات این قطعات در نظر گرفته نمی‌شود و این سبب تولید خطا در نتایج نسبت به واقعیت می‌نماید بنابراین در این مرحله تونل مورد نظر با در نظر گرفتن اتصالات سگمنتی و همچنین اتصالات حلقه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

برای مدل‌سازی در این حالت، سه حلقه‌ی متوالی پوشش تونل، هرکدام به عرض ۱/۳ متر (یک گام حفاری) در نظر گرفته شده است که هر حلقه نیز شامل ۶ قطعه بتنی (سگمنت) است. خصوصیات سامانه نگهداری سگمنتی مورد استفاده در تونل انتقال آب چمشیر در جدول ۵-۶ آمده است.

جدول ۵-۶- خصوصیات سامانه نگهداری سگمنتی مورد استفاده در تونل انتقال آب چمشیر (دهکردی و همکاران، ۱۳۹۱)

۲/۲۵	شعاع داخلی رینگ (m)
۲/۵۰	شعاع خارجی رینگ (m)
۰/۲۵	ضخامت سگمنت (m)
۱/۳۰	طول حلقه ( عرض سگمنت) (m)
۱+۵	تعداد سگمنت‌ها در هر حلقه
۶	تعداد اتصالات سگمنتی در هر حلقه
۳۵	مدول الاستیسیته بتن (Gpa)
۰/۲	نسبت پواسون بتن
۲۴۰۰	وزن مخصوص بتن ( $\text{Kg/m}^3$ )
۵۰	مقاومت فشاری تک محوره بتن (Mpa)

در ادامه هندسه مدل مورد نظر، در نرم‌افزار 3DEC در شکل ۵-۸ نمایش داده شده است.



شکل ۵-۸- هندسه پوشش تونل انتقال آب سد چمشیر با در نظر گرفتن اتصالات سگمنتی و حلقه‌ای در نرم‌افزار 3DEC

## ۵-۹-۱- خواص ماده و اتصالات

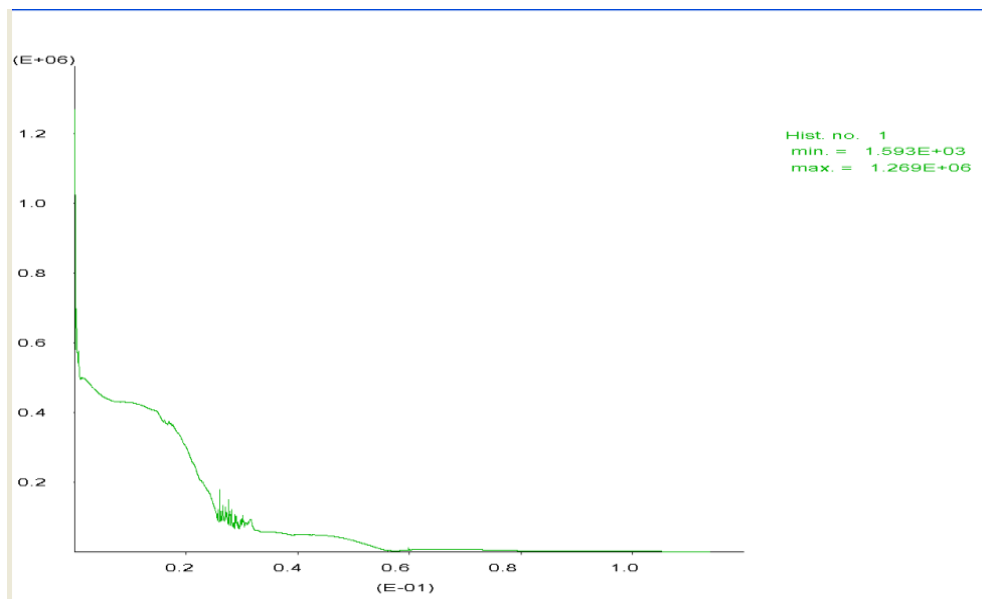
خصوصیات توده‌سنگ و بتن مورد استفاده در پوشش، همانند حالت پیوسته در نظر گرفته شده است. اما برای تعیین سختی اتصالات بتنی (تماس بتن با بتن) در محل سگمنت‌ها و حلقه‌ها از رابطه ارایه شده (AFTES, 2001) استفاده شده، که در ادامه آمده است.

$$K_n = \frac{E}{1 - \nu^2} \cdot \frac{e}{R} \quad (۱۱-۵)$$

که در آن  $E$  مدول الاستیسیته بتن،  $\nu$  نسبت پواسون بتن و  $e$  نیز ضخامت پوشش مورد استفاده می‌باشد.  $R$  شعاع تونل مورد بررسی است. براساس این روش مقدار  $K_s$  را نیز تقریباً ۰/۱ مقدار  $K_n$  در نظر می‌گیرد (جان نثاری، ۱۳۸۶). که برای تونل مورد بررسی محاسبه شده است:

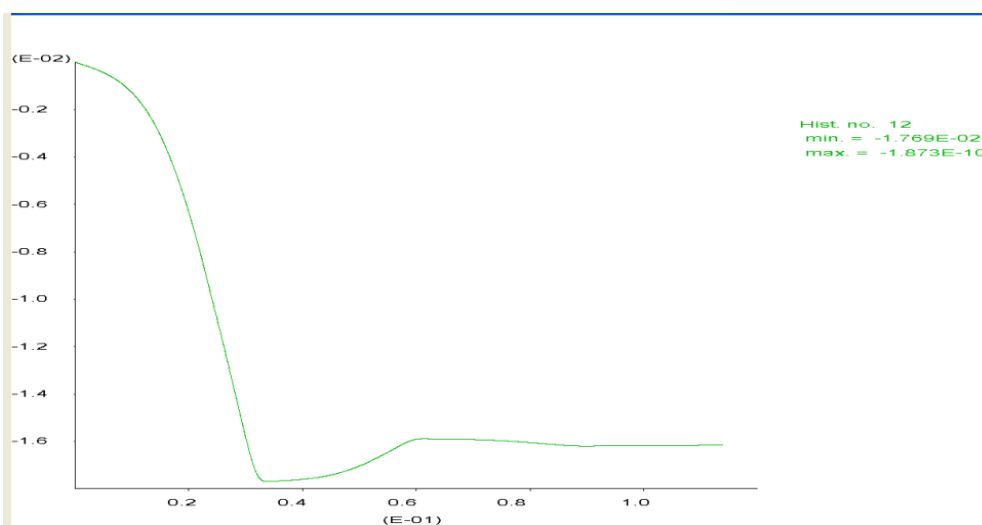
$$K_n = \frac{35}{1 - (0.2)^2} \cdot \frac{0.25}{2.5} = 3.4 \text{ GPa}$$

بنابراین سختی نرمال محل اتصالات بتنی برابر ۳/۴ گیگاپاسکال و مقدار سختی برشی مورد استفاده در مدل‌سازی ۰/۳۴ گیگاپاسکال است. با ایجاد هندسه مساله و اعمال شرایط مرزی و خواص بلوک‌ها و مدل‌های رفتاری مورد نظر، مدل برای تحلیل در نرم‌افزار 3DEC با گام محاسباتی لازم مورد بررسی قرار داده شد.



شکل ۵-۹- تاریخچه نیروهای نامتعادل در حالت پوشش سگمندی

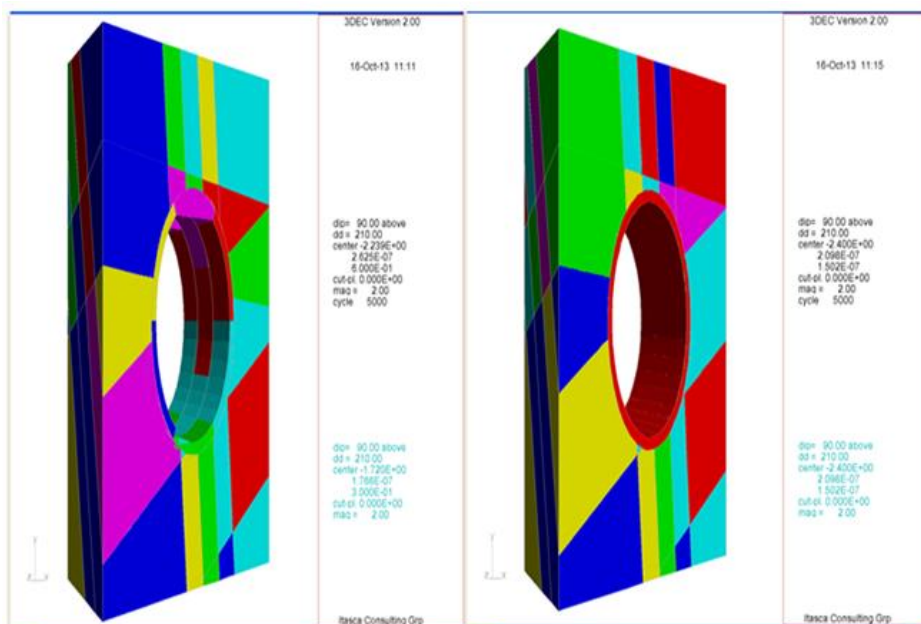
با بررسی نمودار جابجایی در نقطه‌ای واقع در سقف تونل (شکل ۵-۱۰)، تاریخچه‌ی جابجایی در راستای y نشان می‌دهد که گوه ایجاد شده در سقف تونل پس از ۱۶ میلی‌متر جابجایی در راستای قائم به تعادل نهایی می‌رسد و متوقف می‌شود، که بیانگر آن است که مدل‌سازی در حالت پیوسته با توجه به هندسه مساله و نسبت به شرایط اتصالات بین قطعات بتنی در حالت حلقه سگمندی، تقریباً خوشبینانه‌تر است. (در پیوست ۲ و ۳ تاریخچه جابجایی و تنش در سایر جهت‌های مدل آمده است).



شکل ۵-۱۰- تاریخچه‌ی جابجایی در راستای y در نقطه (۵، ۰/۲۰)، گوه پس از ۱۶ میلی‌متر پایدار شده است.

## ۵-۱۰- مقایسه رفتار سامانه نگهداری در حالت پیوسته و سگمنتی

هدف اصلی از این تحقیق، بررسی اختلاف نتایج حاصل از مدل‌سازی‌های صورت گرفته در حالت حلقه پیوسته با نتایج بدست آمده از مدل‌سازی حلقه با در نظر گرفتن اتصالات بین قطعات بتنی پیش‌ساخته است. این اختلافات در بررسی‌های صورت گرفته، بیشتر در مقدار جابجایی‌ها و تغییر شکل‌ها و همچنین تنش‌های ارایه شده در این مدل‌سازی‌ها است که در بعضی مطالعات سبب ایجاد خطای زیاد و دور از واقعیت بودن نتایج شده است. در ادامه با توجه به مدل‌سازی انجام شده در این پروژه با نرم‌افزار 3DEC برای حالت‌های پیوسته و سگمنتی، سعی در مقایسه این نتایج شده است.



ب- حلقه سگمنتی

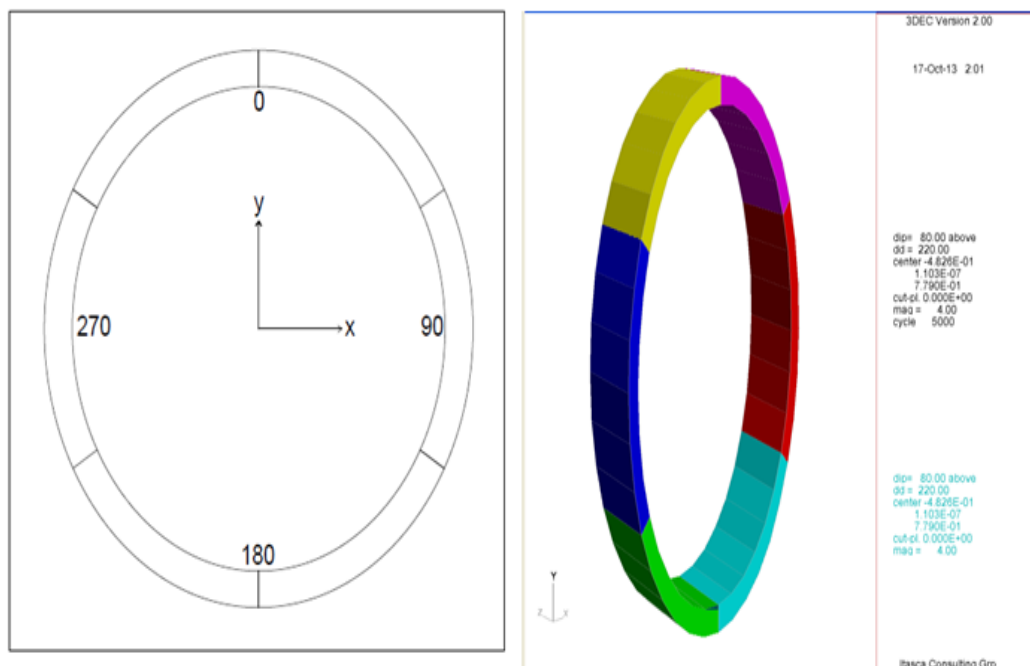
الف- حلقه پیوسته

شکل ۵-۱۱- هندسه سه‌بعدی تونل انتقال آب سد چمشیر

## ۵-۱۱- مقایسه نتایج جابجایی‌ها در حالت حلقه پیوسته و سگمنتی

یکی از مباحث مهم در طراحی پوشش تونل‌ها، بررسی جابجایی‌های رخ داده در آن است که مبنای مناسبی برای بررسی تاثیر نگهداری بر پایداری تونل است. در این بررسی در حالت حلقه پیوسته قسمت میانی پوشش تعریف شده و در حالت حلقه سگمنتی، حلقه دوم از سه حلقه مدل‌سازی

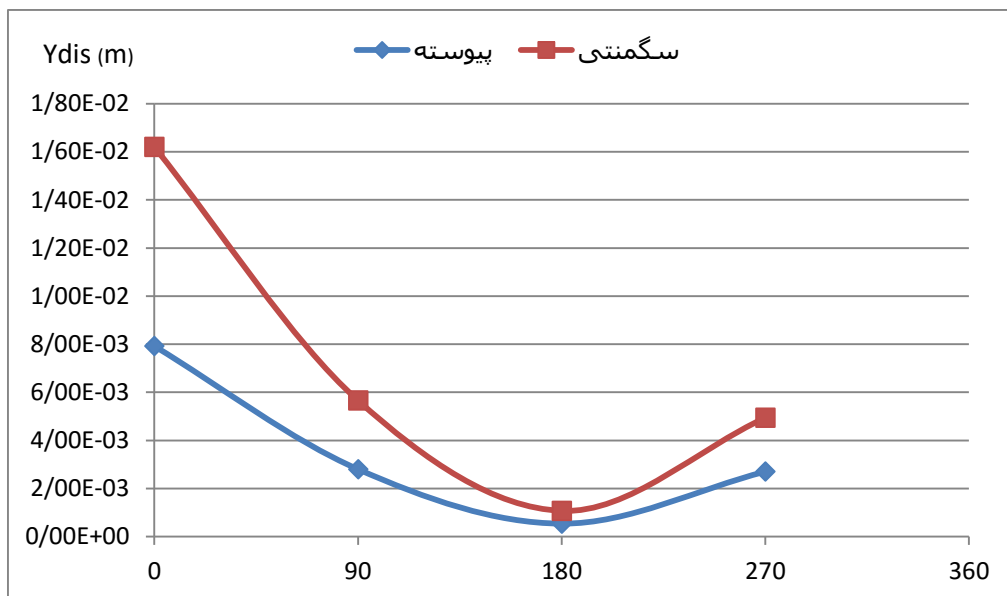
شده در مدل در نظر گرفته شده است. برای مقایسه این جابجایی‌ها مسیری شعاعی را حول محیط پوشش تونل که سقف زاویه صفر درجه و به صورت ساعت‌گرد نشان داده شده است. مسیر و نحوه قرارگیری قطعات در حلقه دوم در شکل ۵-۱۲ آمده است.



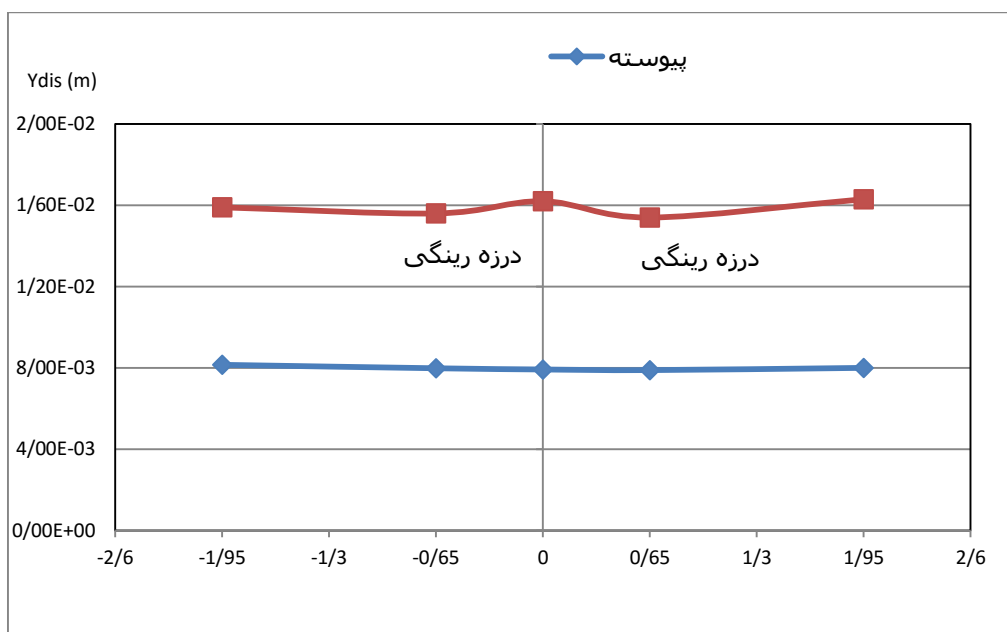
شکل ۵-۱۲- محل اتصالات و مسیر انتخاب شده برای بررسی نتایج در حلقه دوم در حالت حلقه سگمندی

### ۵-۱۱-۱- بررسی جابجایی قائم در حالت حلقه پیوسته و سگمندی

در بررسی نمودارهای ارزیابی شده، افزایش میزان جابجایی قائم در حالت حلقه سگمندی نسبت به حلقه پیوسته مشاهده می‌شود، به گونه‌ای که در تاج تونل (نقطه صفر) بیشترین جابجایی و اختلاف مشاهده می‌شود و همین اختلاف جابجایی در نقاط محیطی از جمله دیواره‌ها و کف تونل نیز مشاهده می‌شود که در کف تونل (۱۸۰ درجه) کمترین است. در شکل ۵-۱۳ مقایسه جابجایی قائم (در راستای  $y$ ) در حالت پیوسته و سگمندی بر محیط تونل نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۳- مقایسه جابجایی قائم (در راستای y) در حالت پیوسته و سگمندی بر محیط تونل



شکل ۵-۱۴- مقایسه جابجایی قائم (در راستای y) در حالت پیوسته و سگمندی در راستای محور تونل

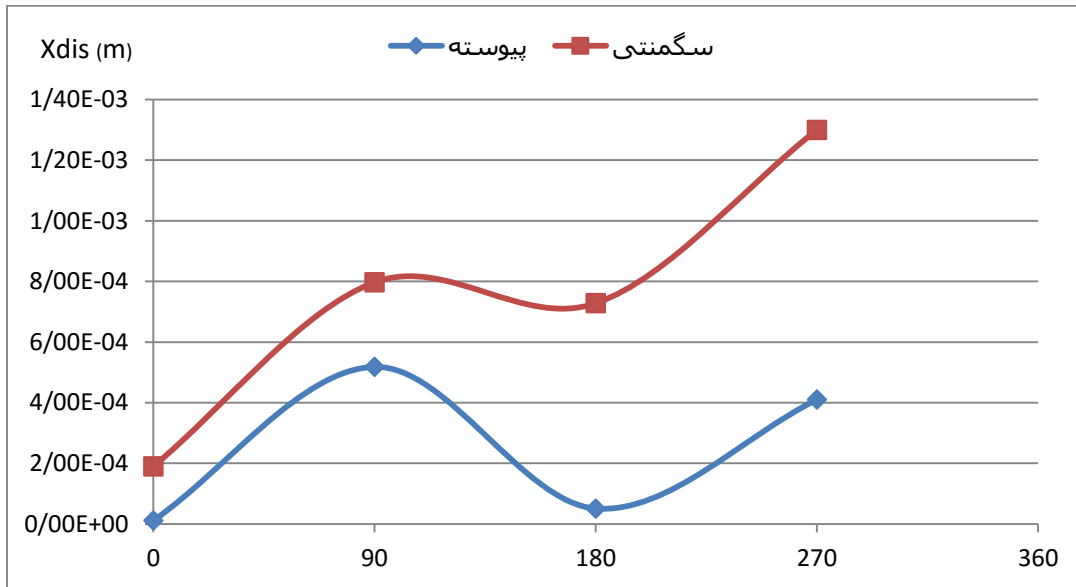
از شکل ۵-۱۴ که جابجایی قائم را در راستای محور طولی تونل را بررسی می‌کند برمی‌آید که جابجایی در نقاط اتصال حلقه‌های اندکی متغیر است و این درحالی است که در حلقه پیوسته به صورت یکنواخت است و این پدیده تاثیر اتصالات حلقه‌ای را بر جابجایی بیان می‌کند.



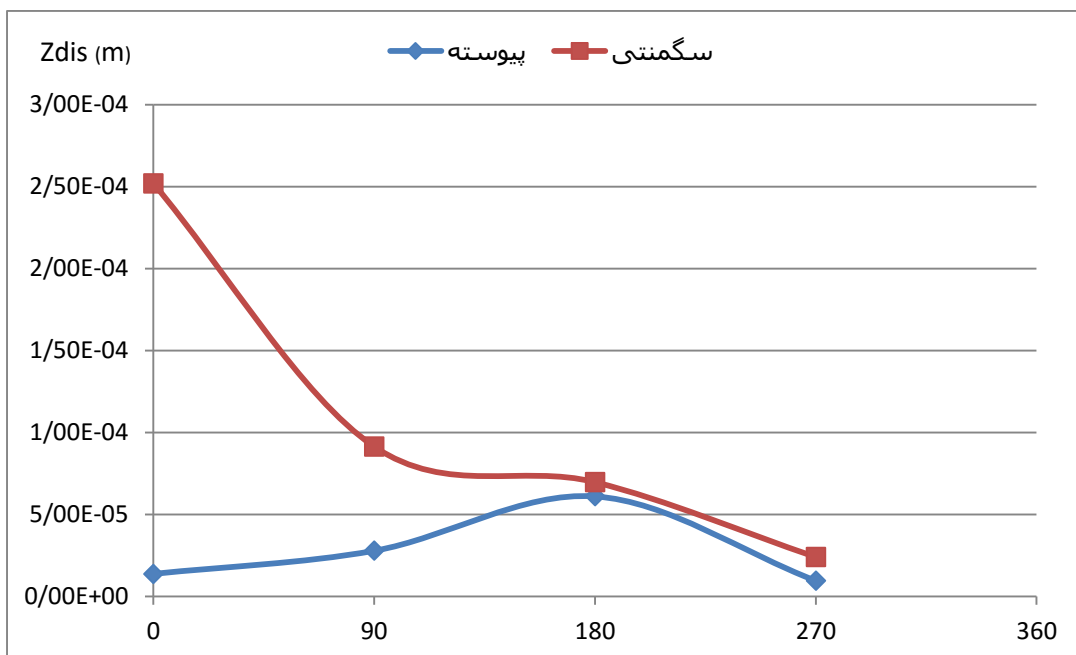
## ۵-۱۱-۲- بررسی جابجایی شعاعی و محوری در حالت حلقه پیوسته و سگمنتی

در ادامه اختلاف جابجایی‌ها در راستای محور x (شعاعی) و راستای محور z (محور تونل)

بررسی و در شکل‌های ۵-۱۵ و ۵-۱۶ آمده‌است.



شکل ۵-۱۵- مقایسه جابجایی شعاعی (در راستای X) در حالت پیوسته و سگمنتی بر محیط تونل

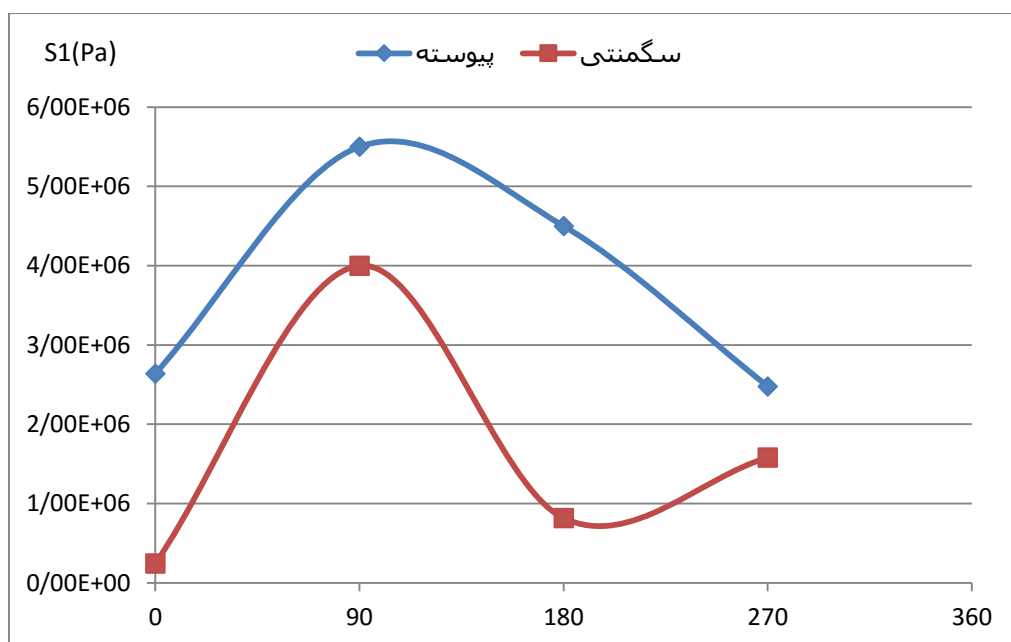


شکل ۵-۱۶- مقایسه جابجایی محوری (در راستای Z) در حالت پیوسته و سگمنتی بر محیط تونل

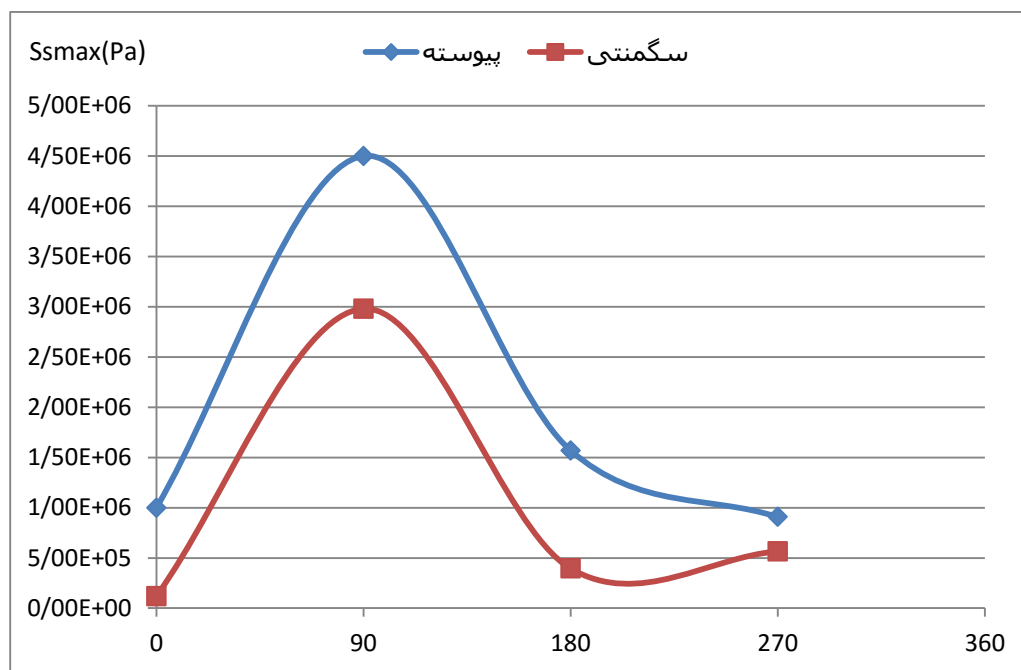
بیشترین جابجایی شعاعی ۱/۴ میلی‌متر در نقطه ۲۷۰ درجه واقع در دیواره سمت چپ است. همچنین بیشترین جابجایی ممکن در راستای محوری به دلیل وجود اتصال سگمندی در سقف تونل (نقطه صفر) رخ داده است که همین عامل باعث شده است که پس از کاهش این مقدار در دیواره راست (۹۰ درجه)، در نقطه ۱۸۰ درجه (کف تونل)، مقداری افزایش را نشان می‌دهد که البته چون جابجایی‌ها نسبت به سقف در کف تونل کمتر است؛ بنابراین این مقدار افزایش (در نقطه ۱۸۰ درجه) نسبت به سقف کمتر است.

### ۵-۱۲- مقایسه مقدار تنش‌های ایجاد شده در حالت حلقه پیوسته و سگمندی

از مقایسه تنش‌های ایجاد شده در حالت حلقه پیوسته با حلقه سگمندی که از نمودارهای ارائه شده زیر برمی‌آید، مشخص می‌گردد که تنش‌ها بطور کلی در حالت پیوسته بیشتر از حالت حلقه سگمندی است، اما این بحث استثناهایی به دنبال دارد که در نمودارها مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۱۷- مقایسه تنش اصلی حداکثر در حالت پیوسته و حلقه سگمندی



شکل ۵-۱۸- مقایسه حداکثر تنش برشی در حالت پیوسته و حلقه سگمنتی

از بررسی نمودارهای ارائه شده، در سقف و کف تونل میزان تنش در حالت حلقه سگمنتی نسبت به حلقه پیوسته مقداری اختلاف را نشان می‌دهد. در بررسی‌های صورت گرفته نسبت به هندسه مسئله این اختلاف قابل بحث است، زیرا این نواحی نواحی اتصالی سگمنتی است. همان‌طور که در فصل سوم در بحث رفتار اتصالات سگمنتی نیز بیان شده است، در این نواحی به دلیل تمرکز تنش، میزان تنش‌ها در حالت حلقه سگمنتی بیشتر بدست آمده است. این پدیده بدان معناست که در مدل-سازهای گذشته که توسط پژوهشگران مختلف، بدون در نظر گرفتن اتصالات صورت گرفته است، تاثیر این تمرکز تنش که به دلیل چرخش و لهیدگی قطعه بتنی در این نواحی ضعیف اتصالی است، نادیده گرفته شده است و مدل‌سازی با در نظر گرفتن این اتصالات، در دقت و صحت نتایج بدست آمده بسیار موثر است. در پیوست ۱ مقایسه سایر تنش‌های ایجاد شده در حالت حلقه پیوسته و سگمنتی ارائه شده است.

## ۵-۱۳ - خلاصه فصل

در این فصل به مدل‌سازی رفتار سامانه نگهداری تونل‌های حفاری مکانیزه تمام‌مقطع در دو حالت حلقه پیوسته و حلقه سگمندی (در نظر گرفتن اتصالات) و مقایسه نتایج حاصله پرداخته شد که به صورت خلاصه به شرح زیر است:

- با توجه به ماهیت مساله و محیط زمین‌شناسی تونل مورد مطالعه (تونل انتقال آب سد چمشیر) که محیطی سنگی شامل دسته درزه‌های تعریف شده در فصل سوم است، استفاده از روش‌های محیط ناپیوسته مدنظر قرار گرفت. بنابراین در این مدل‌سازی از روش عددی اجزای مجزا و با استفاده از نرم افزار مکانیک سنگی سه‌بعدی 3DEC صورت گرفت.
- مدل‌سازی شامل دو مرحله حلقه پیوسته و حلقه سگمندی بود که برای تعریف اتصالات سگمندی از ویژگی‌های درزه استفاده شد. در بررسی نتایج تحلیل مشخص شد که بادر نظر گرفتن اتصالات در پوشش تونل بر مقدار جابجایی‌ها نسبت به مدل‌سازی حلقه پیوسته افزوده می‌شود. مقدار تنش‌ها به جز در نواحی اتصالی در حلقه پیوسته بیشتر از حلقه سگمندی است که دلیل آن تمرکز تنش در محل اتصالات است.
- باتوجه به اینکه در محل اتصالات تمرکز تنش صورت می‌گیرد، بنابراین در طراحی‌ها این نواحی را باید جزو مناطق بحرانی به حساب آورد و آنرا نیازمند بررسی بیشتر می‌نماید.

## فصل ششم

### نتیجه گیری و پیشنهاد

## ۶-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، بررسی و مقایسه رفتار سامانه نگهداری تونل‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع در حالت مدل‌سازی با حلقه پیوسته، در مقایسه با حالت سگمندی توسط روش عددی و با نرم افزار اجزای مجزا، 3DEC صورت گرفت که نتایج آن به شرح زیر است:

۱- اتصالات موجود در بین سگمنت‌ها، بر روی رفتار و الگوی واقعی تنش تاثیر خواهد-

گذاشت، لیکن اتصالات سگمندی در تعیین نیروها و رفتار سگمنت نقش مهمی را ایفا

می‌کنند. بنابراین در نظر گرفتن اتصالات در طراحی‌ها امری مهم و ضروری است.

۲- از آنالیز نتایج بدست آمده، میزان جابجایی‌ها در حالت حلقه سگمندی نسبت به حالت

حلقه پیوسته بیشتر است. این پدیده بیانگر آنست که به دلیل وجود قطعات بتنی در

پوشش تونل، میزان گیرداری در حالت سگمندی کاهش یافته و هرکدام از این قطعه-

ها خود نقش بلوکی با قابلیت تحرک را ایفا می‌کنند و به همین دلیل حرکت‌ها و

جابجایی‌ها افزایش می‌یابد که در سقف تونل بیشترین مقدار اختلاف و در کف

کمترین مقدار مشاهده شده است.

۳- مقدار تنش‌ها در حالت کلی در مدل‌سازی حلقه پیوسته بیشتر از حالت سگمندی

است، اما این بحث با توجه به نمودارهای ارائه شده استثناهایی را از جمله افزایش

مقدار تنش در سقف و کف رینگ دوم مدل‌سازی شده در حالت سگمندی نسبت به

پیوسته است، که با توجه به هندسه این حلقه، این نقاط محل اتصالات سگمندی

سامانه نگهداری است و با در نظر گرفتن بحث‌های ارائه شده در فصل سوم در ارتباط

با رفتار اتصالات سگمندی، دلیل اصلی این پدیده تمرکز تنش در این نواحی ضعیف

اتصال است که همین امر سبب تخریب بتن در این نواحی است.

- ۴- استفاده از نرم‌افزار مکانیک سنگی اجزای مجزا 3DEC در این پژوهش سبب در نظر گرفتن شرایط نزدیک به واقعیت توده‌سنگ و محیط دربرگیرنده تونل است.
- ۵- محل اتصالات، از نواحی ضعیف در نگهداری سگمننتی است، چرا که محل اتصالات از لحاظ پایداری از استحکام کمتری برخوردار بوده و توانایی تحمل تنش و گشتاور خمشی برابر با دیگر قسمت‌های پوشش را ندارند. لذا در اکثر موارد پوشش از محل اتصالات به دلیل ایجاد چرخش و تمرکز تنش دچار آسیب دیدگی می‌شود.

## پیشنهاد

با توجه به ایجاد تمرکز تنش در نواحی اتصالی در نگهداری سگمننتی که باعث ایجاد ناحیه بحرانی در طراحی‌ها می‌شود، بررسی بیشتر در این نواحی با مدل‌سازی جزئی‌تر از محل اتصالات ضروری می‌نماید. براین اساس در پژوهش‌های آینده افزایش دقت در مدل‌سازی‌ها در محل اتصالات پیشنهاد می‌شود.

## فهرست منابع

- Arnau Delgado, O. (2012). "Structural response of precast concrete segmental tunnel linings". Doctoral Thesis, Catalonia University
- Arnau, O., & Molins, C. (2012). "Three dimensional structural response of segmental tunnel linings". *Engineering Structures*, 44, 210-221.
- Azadi, M., & Mir Mohammad Hosseini, S. M. (2010)." The uplifting behavior of shallow tunnels within the liquefiable soils under cyclic loadings". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(2), 158-167.
- Blom, C. B. M. (2002). "Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils".
- Chen, N.(2007) " One-pass and Two-pass Precast Segmental Linings", UT Austin Seminar
- De Waal, R. V. (1999). "Steel fibre reinforced tunnel segments" (Doctoral dissertation, Ph.D. Thesis, Delft University).
- Ding, W. Q., Yue, Z. Q., Tham, L. G., Zhu, H. H., Lee, C. F., & Hashimoto, T. (2004). "Analysis of shield tunnel". *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 28(1), 57-91.
- Duddeck, h., J. Erdmann., 1982, "structural design models for tunnels", proceeding of the international symposium on tunneling, London, United Kingdom, institution of mining and metallurgy (p83-91)
- Erdmann, J., (1983). "Comparison of plain and the development of multidimensional tunnel design methods"., dissertation, braunschweig University of technology
- Gruebl, F. (2012). "Segmental Ring Design–New Challenges with high Tunnel Diameters". *TAI Journal (A Half Yearly Technical Journal of Indian Chapter of TAI)*, 1(2), 4-9.
- Gruebl, F.(2009) "Design criteria for segmental linings in soft ground". ITA/AITES-training course, Budapest



- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (Eds.). (2007). "Mechanized tunnelling in urban areas". Psychology Press.
- Hefny, A. M., & Chua, H. C. (2006). "An investigation into the behaviour of jointed tunnel lining". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3), 428-428.
- Hefny, A.M. & Macalevey N.F. (2004), "Numerical Study on the Behavior of Jointed Tunnel Lining" . *Journal of the Institution of Engineers, Singapore*, Vol. 44, Issue. 1, pp.108-118
- Iftimie, T. E. O. D. O. R. A contribution to the concept and structural analysis of precast circular linings for shield driven tunnels. Diss. Ph. D. Thesis, Bucharest, Romania, 1996.
- ITA-WG2, (2000) "Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining", International Tunnelling Association, Working Group No. 2 - Research.
- Kasper, T., Edvardsen, C., Wittneben, G., & Neumann, D. (2008). "Lining design for the district heating tunnel in Copenhagen with steel fibre reinforced concrete segments". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23(5), 574-587.
- Klappers, C., Grubl, F., & Ostermeier, B. (2006). "Structural analyses of segmental lining- coupled beam and spring analyses versus 3D-FEM calculations with shell elements". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3), 254-255.
- Klappers, C., Grubl, F., & Ostermeier, B. (2006)."Structural analyses of segmental lining- coupled beam and spring analyses versus 3D-FEM calculations with shell elements". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 21(3), 254-255.
- Koyama, Y. (2003). "Present status and technology of shield tunneling method in Japan". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(2), 145-159.
- Luttikholt, A. (2007). "Ultimate Limit State Analysis of a Segmented Tunnel Lining" (Doctoral dissertation, MSc thesis, Delft University of Technology).
- Maidl, B .Herrenknecht, M .Maidl, U .Wehrmeyer, G ,(2011) "Mechanised Shield Tunnelling", 2nd Edition Ernst & Sohn, Berlin
- Mo, H. H., & Chen, J. S. (2008). "Study on inner force and dislocation of segments

- caused by shield machine attitude". *Tunnelling and underground space technology*, 23(3), 281-291.
- Ozgen, C. (2010). "Evaluation of structural analysis methods used for the design of TBM segmental lining" (Doctoral dissertation, Middle EAST Technical University).
- Panet, M., (2001), "Recommendations on the Convergence-Confinement Method", AFTES, Approved by Technical Committee on 14/11/2001
- Plizzari, G.A & Tiberti, G. (2006), "Steel Fibers as Reinforcement for Precast Tunnel Segment", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Volume 21, Issues 3-4, May-July 2006, Pages 438-439
- Ramoni, M., & Anagnostou, G. (2010). "Tunnel boring machines under squeezing conditions". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(2), 139-157.
- Sinha, R.S, (1989), "Underground Structures Design and instrumentation", Amsterdam, Netherlands, Elsevier
- Sugimoto, M. (2006) "Causes of shield segment damages during construction". In *International Symposium on Underground Excavation and Tunnelling*, Bangkok, Thailand (pp. 67-74).
- Teachavorasinskun, S., & Chub-uppakarn, T. (2010). "Influence of segmental joints on tunnel lining". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4), 490-494.
- Toan, N. D. (2006). "TBM and lining: Essential Interfaces " , Politecnico di Torino, Consortium for the Research and Permanent Education (COREP), Ms Thesis
- Zhang, W., & Koizumi, A. (2007). "A study of the localized bearing capacity of reinforced concrete K-segment". *Tunnelling and underground space technology*, 22(4), 467-473.
- شرکت مهندسين مشاور پاراب فارس، (دهکردی و همکاران) " گزارش زمین‌شناسی مهندسی مسیر تونل انتقال آب

چمشیر"، جلد پنجم، تابستان ۱۳۹۱

مدنی، حسن، " زمین‌شناسی ساختمانی و تکتونیک " انتشارات جهاد دانشگاهی، ۱۳۸۵

- شهریار، کوروش، " مکانیک سنگ "، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۹۰
- میردار منصورپناهی، علی، " برداشت و پردازش اطلاعات ناپیوستگی ها و آموزش نرم افزار Dips "، وزارت صنایع و معادن، ویرایش اول، ۱۳۸۳
- فرخ، ابراهیم، " قطعات بتنی پیش ساخته "، انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیر کبیر، ویرایش اول، ۱۳۸۶
- اسماعیلی، مرتضی، زمانی، حسین، " تحلیل و طراحی سگمنت تونل انتقال آب سیروان "، دومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، ۲۴ الی ۲۶ آذر ماه، ۱۳۸۳
- جان نثاری، علیرضا، " تخمین بارهای وارده بر سازه سگمنت تونل انتقال آب کرج.. "، پایان نامه کارشناسی ارشد، گروه معدن، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۶
- مختاریان اصل، مجتبی، " طراحی پوشش بتنی تونل انتقال آب نوسود- قطعه ۲ با نگاهی ویژه به تأثیر مفاصل قطعات پوشش "، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی . گروه مهندسی معدن . رشته معدن مکانیک سنگ، دانشگاه تهران، ۱۳۸۵
- عجم زاده، حامد، " بهینه سازی تعداد سگمنت های بتنی بعنوان پوشش نگهداری تونل در یک رینگ و ارزیابی اتصالات بین سگمنتی و بین رینگی در ظرفیت باربری تونل ها با تمرکز به تونل خط ۴ متروی تهران "، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی . گروه مهندسی معدن . رشته معدن مکانیک سنگ، دانشگاه تهران، ۱۳۸۹
- جعفری، مهران، صافی، محمد، " اثر ابعاد و نحوه قرارگیری در رفتار قطعات بتنی پیش ساخته پوشش تونل ها "، اولین کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس سد و نیروگاه برق آبی، ۱۳۹۰
- آزادی، محمد، احرامی، امید، سید رزاقی، مهران، " ارزیابی تاثیر میزان گیرداری بین سگمنت های بتنی پوشش تونل بر عملکرد تونل تحت بارهای بهره برداری "، نهمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۱
- صادقی، مسعود، موسوی، مهدی، " ارزیابی نیروهای وارد بر پوشش سگمنتی تونل با تکیه بر داده های ابزار دقیق "، مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس تونل، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۸

قربان بیگی، سعید، کریمی، فرشید، " استفاده از بتن الیافی در پوشش قطعه‌ای تونل‌ها"، دومین کنفرانس ملی بتن  
ایران، ۱۳۸۹

درویشی، مهدی، کیانی، مجید، امین‌فر، محمدحسین، " الزامات طراحی سازه ای پوشش بتنی سگمنتال در تونل‌های  
حفاری مکانیزه "، ۱۳۸۸

سعیدی، مهدی، طارمی، مجید، " طبقه‌بندی انواع آسیب‌های وارده به سگمنت‌های بتنی در حفاری مکانیزه "، اولین  
کنفرانس بین المللی و سومین کنفرانس سد و نیروگاه برق آبی، ۱۳۹۰

کیانی، مجید، " بررسی امکان سنجی کاربرد الیاف فولادی در تولید قطعات بتنی پروژه تونل قمرود "، یازدهمین  
کنفرانس دانشجویان عمران سراسر کشور، دانشگاه هرمزگان، ۱۳۸۳

قاسمی، امیر، " تجهیز تخصصی کارگاه TBM پروژه قطار شهری اهواز "، فصلنامه کیسون، ۱۳۸۹

مختاریان اصل، مجتبی، جعفری، احمد، اسماعیلی، مرتضی، " تحلیل پایداری پوشش سگمنتی تونل خط ۲ قطار  
شهری تبریز "، مجموعه مقالات هشتمین کنفرانس تونل، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۸

یوسفیان دارایی، علیرضا، رحمان‌نژاد، رضا، گل‌پیرایی، وحید، " تحلیل ساختاری پوشش سگمنتال با استفاده از مدل-  
سازی عددی سه بعدی توسط المان‌های پوسته (مطالعه‌ی موردی قطعات ۳ و ۴ تونل انتقال آب قمرود) "،  
اولین همایش ملی سازه - زلزله - ژئوتکنیک، مازندران، ۱۳۸۹

گروه کنترل و دفتر فنی شرکت ساختمانی بام‌راه، " گزارشات و طراحی‌های گذر TBM های متروی شیراز از  
ایستگاه ۲، ۱۳۸۴

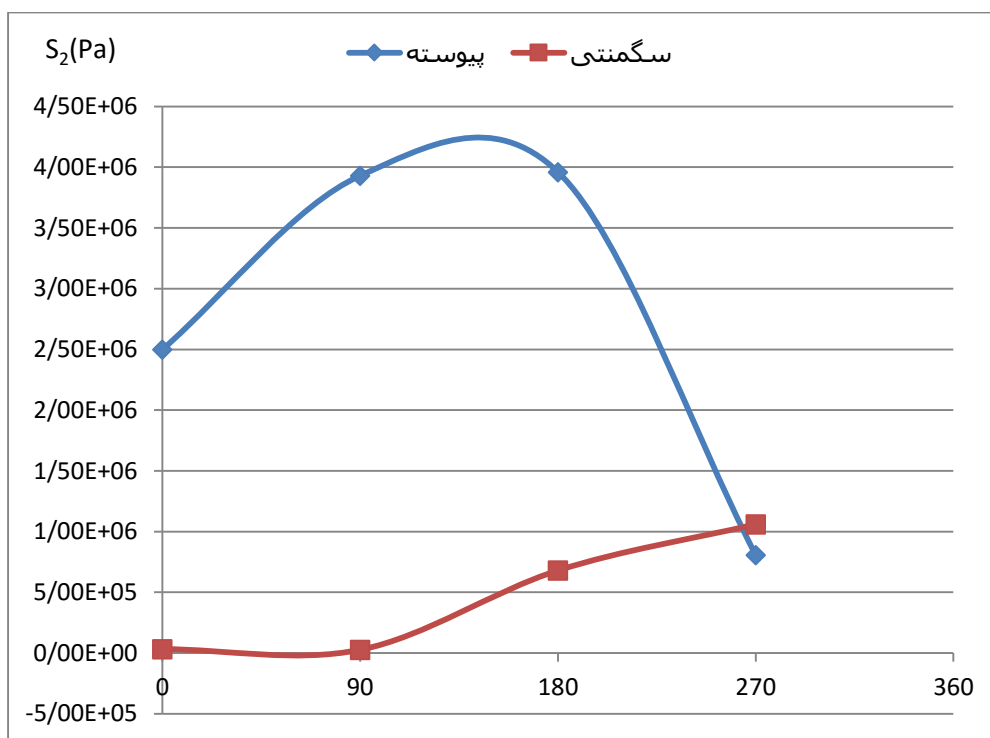
شهباز، بهاره، جعفری، صمد، " روند تولید قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت) در پروژه قطار شهری اهواز "، فصلنامه  
کیسون، ۱۳۸۹

واحدی، علی اکبر، همتی، پژمان، " طراحی پوشش بتنی تونل انتقال آب گلاب " ششمین کنفرانس تونل ایران؛ دانشگاه  
علم و صنعت ایران، ۱۳۸۲

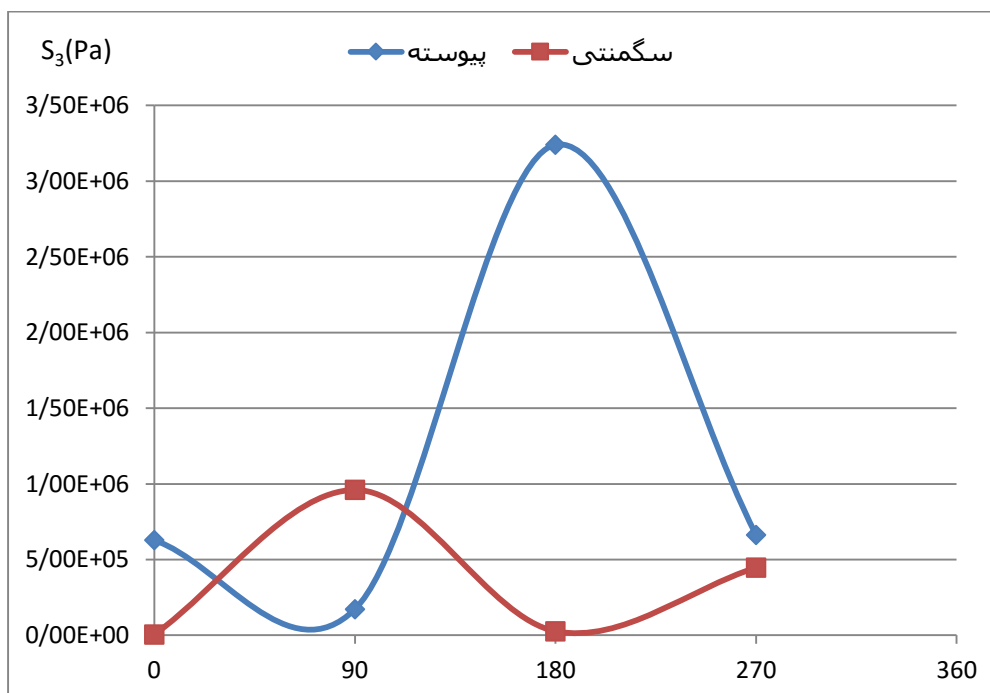
## پیوست‌ها

در ادامه برای درک بیشتر پیوست‌هایی آمده‌است که شامل:

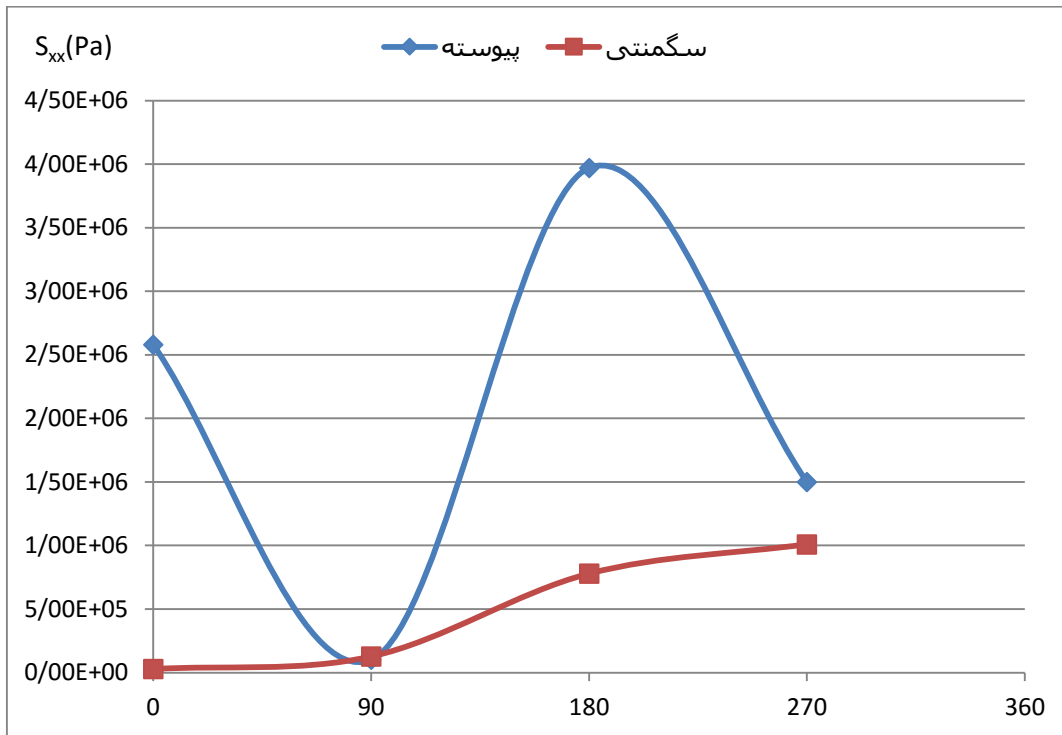
- در نمودارهای پیوست ۱ مقایسه‌ی تنش‌ها در جهات مختلف در حالت حلقه پیوسته در مقابل حلقه سگمندی ارایه شده است.
- در نمودارهای پیوست ۲ تاریخچه‌ی جابجایی‌ها و تنش‌ها در جهات مختلف در نقطه (۲۰/۰،۵) واقع در سقف تونل در حالت حلقه سگمندی نشان داده شده‌است.
- در نمودارهای پیوست ۳ تاریخچه‌ی جابجایی‌ها و تنش‌ها در جهات مختلف در نقطه (۲۰/۰،۵) واقع در سقف تونل در حالت حلقه پیوسته نشان داده شده‌است.



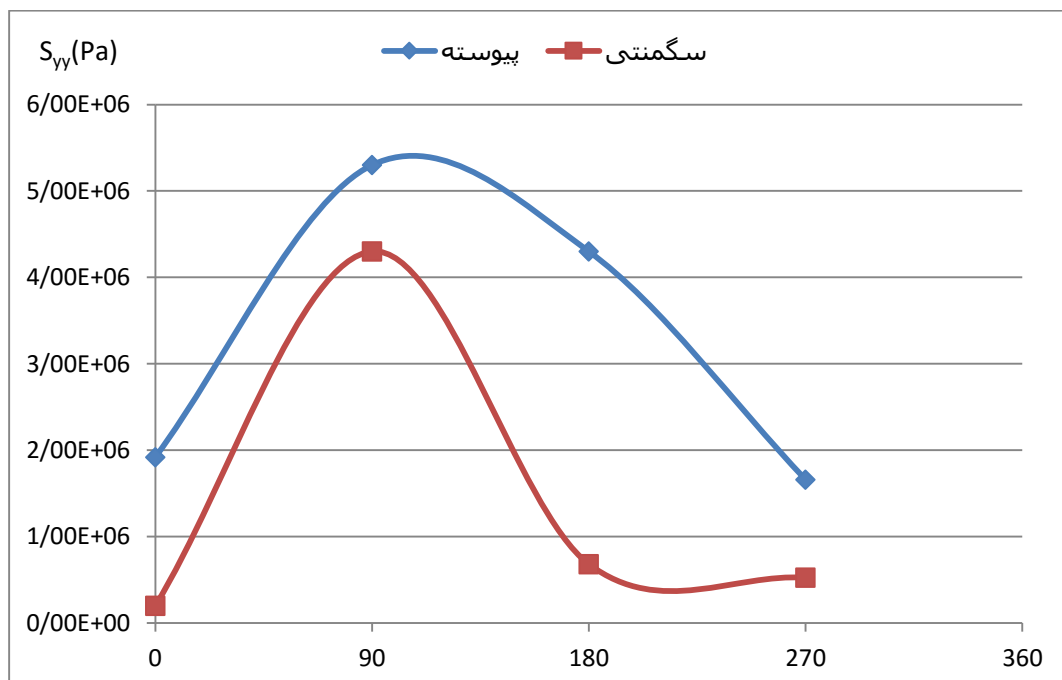
شکل ۱- مقایسه تنش متوسط (S<sub>2</sub>) در حالت حلقه پیوسته و حلقه سگمنتی



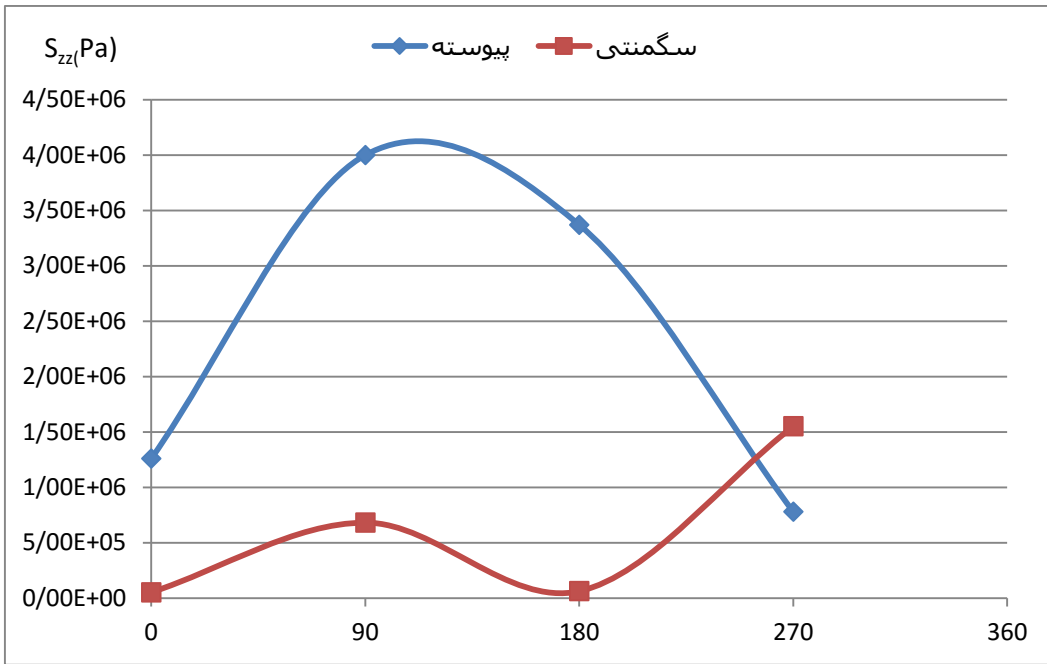
شکل ۲- مقایسه تنش حداقل (S<sub>3</sub>) در حالت حلقه پیوسته و حلقه سگمنتی



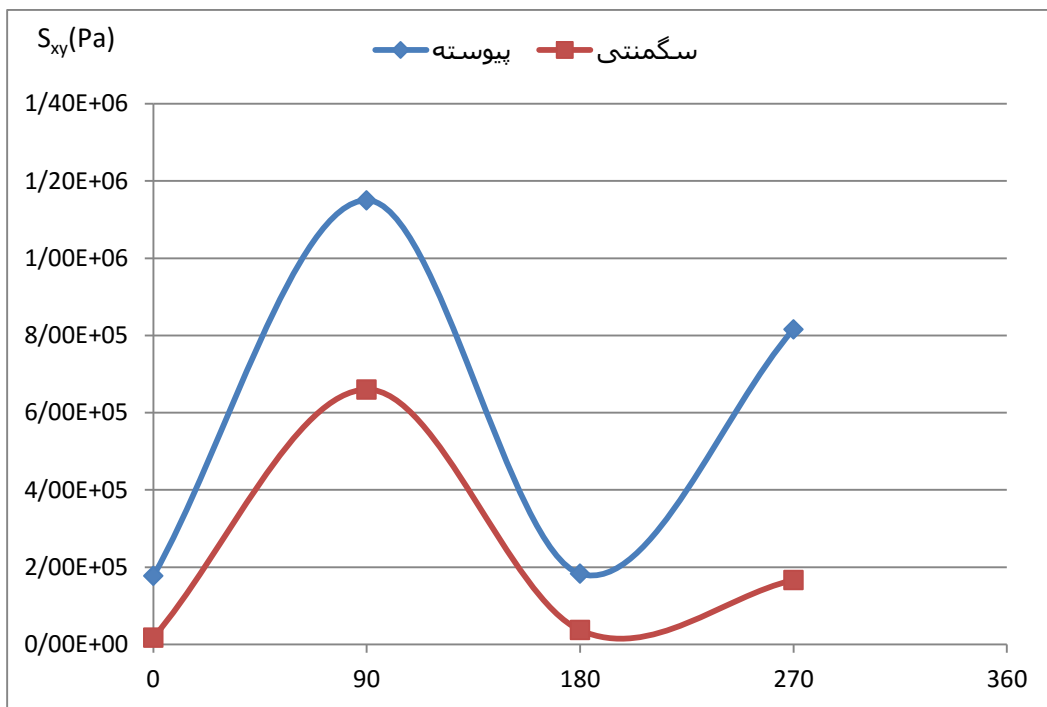
شکل ۳- مقایسه تنش  $S_{xx}$  در حالت حلقه پیوسته و حلقه سگمنتی



شکل ۴- مقایسه تنش  $S_{yy}$  در حالت حلقه پیوسته و حلقه سگمنتی

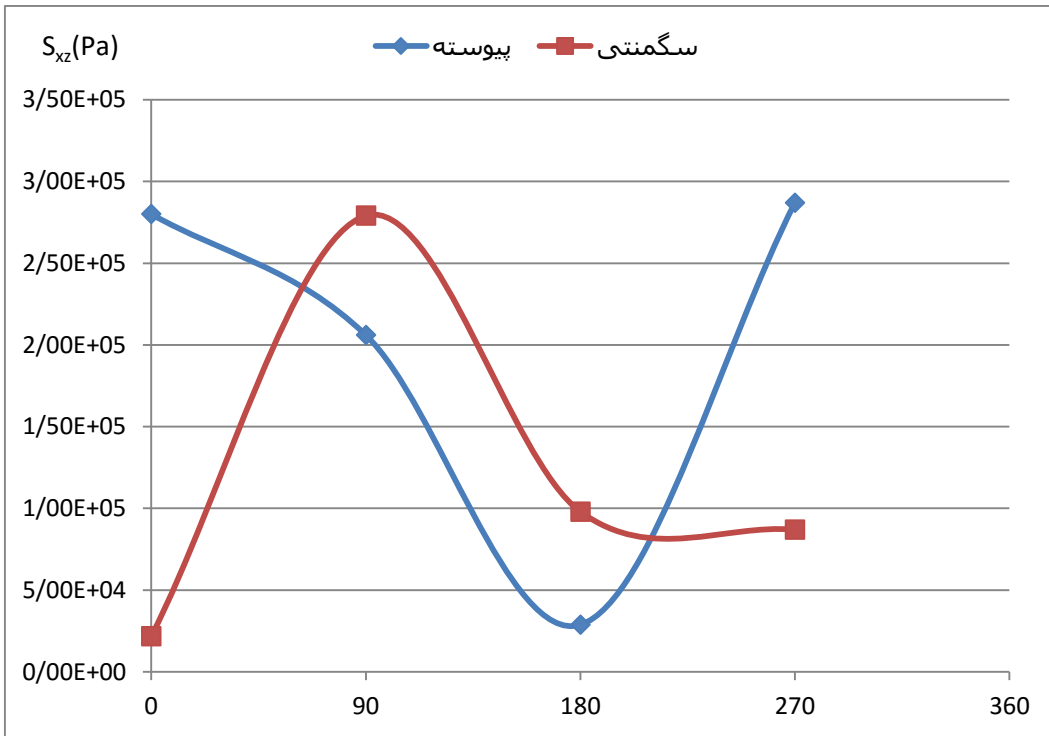


شکل ۵- مقایسه تنش  $S_{zz}$  در حالت حلقه پیوسته و حلقه سگمنتی

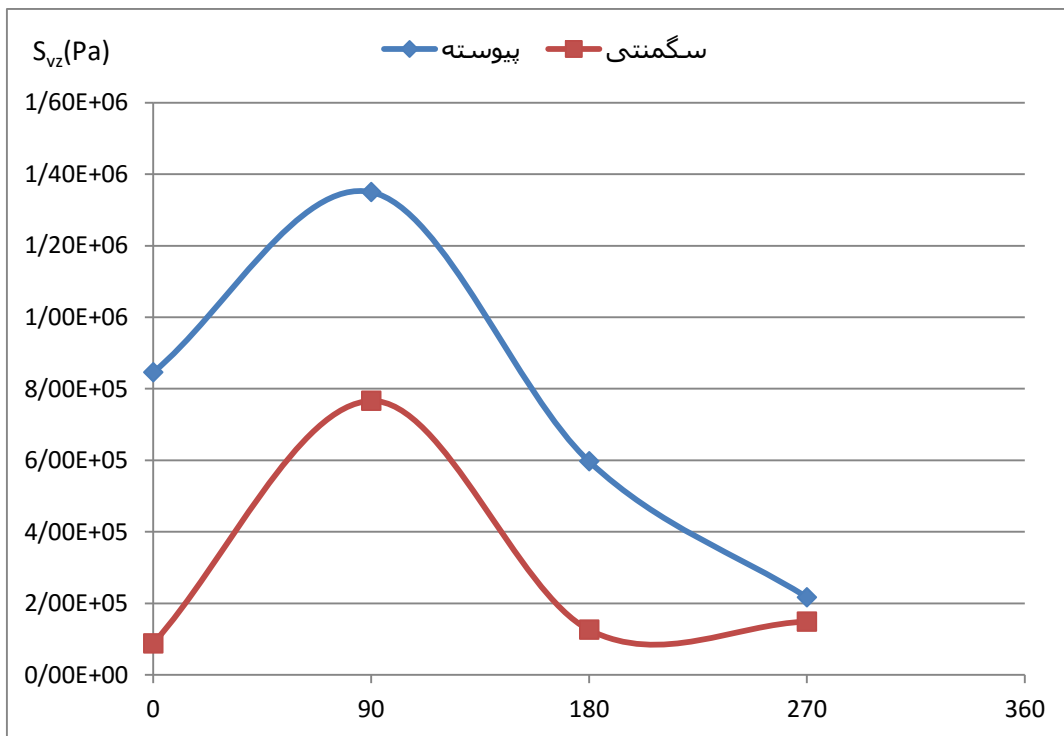


شکل ۶- مقایسه تنش  $S_{xy}$  در حالت حلقه پیوسته و حلقه سگمنتی

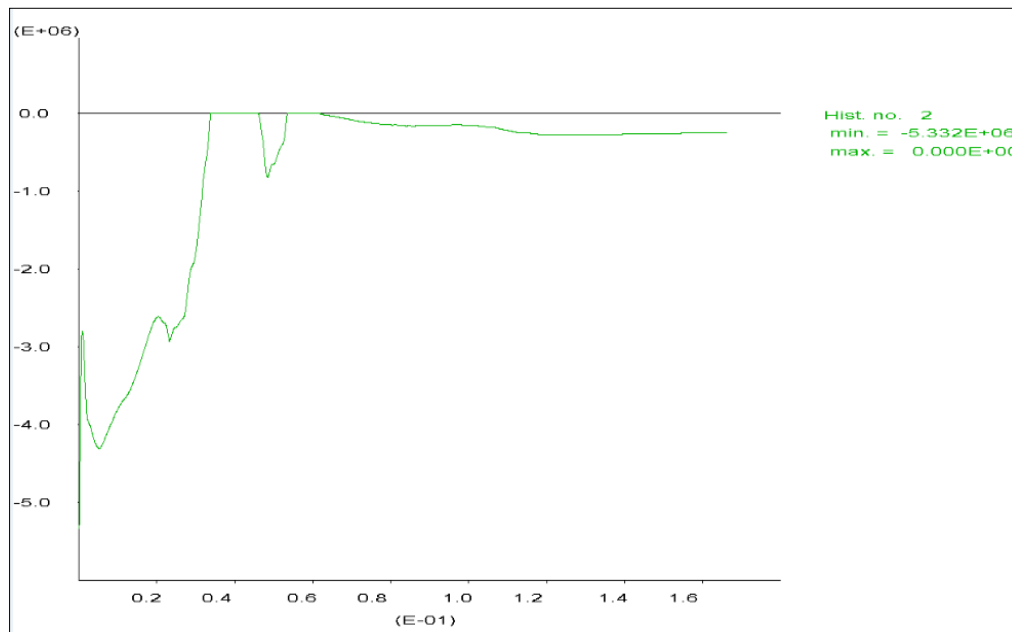




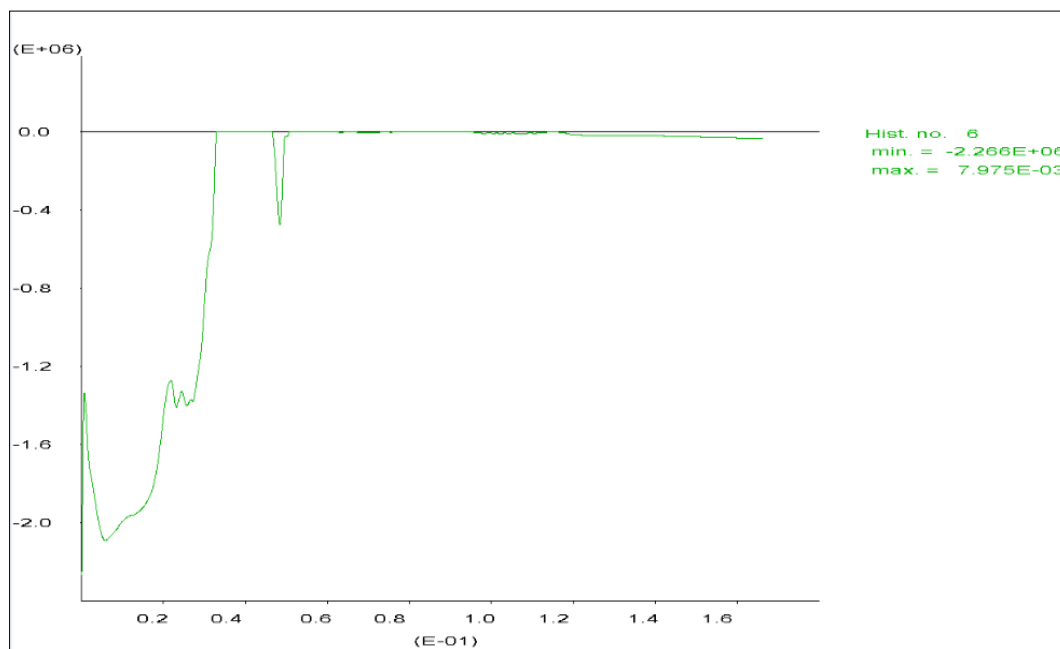
شکل ۷- مقایسه تنش  $S_{xz}$  در حالت حلقه پیوسته و حلقه سگمنتی



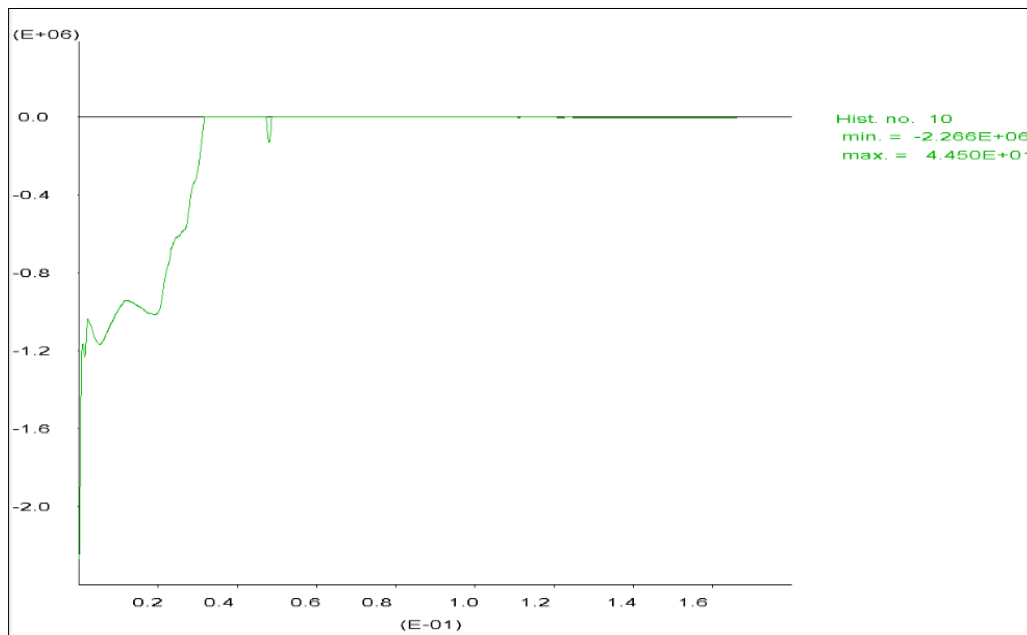
شکل ۸- مقایسه تنش  $S_{yz}$  در حالت حلقه پیوسته و حلقه سگمنتی



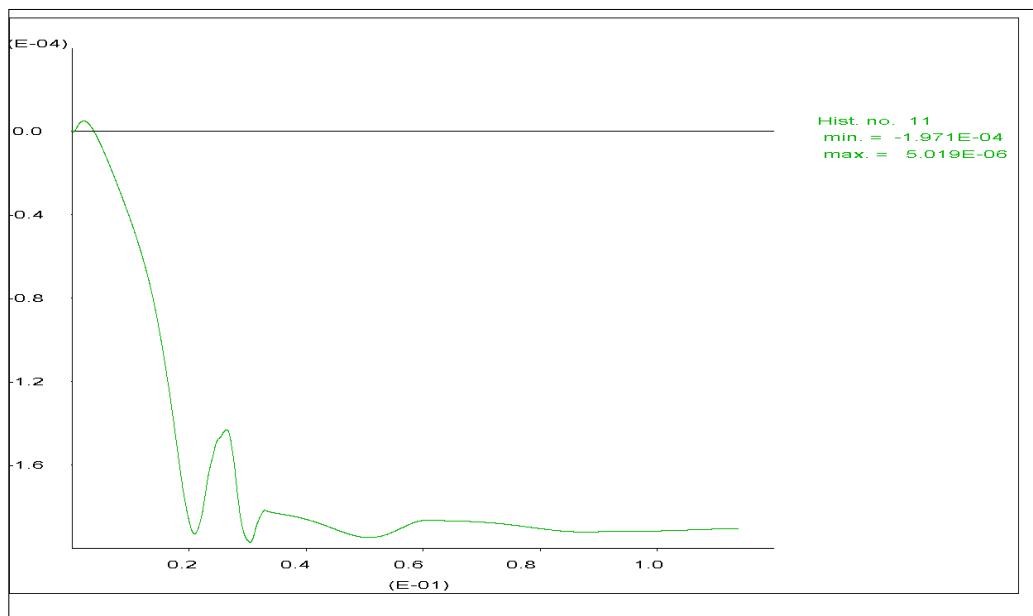
شکل ۹- تاریخچه‌ی تنش حداکثر در نقطه (۵، ۰/۰، ۲) واقع در سقف تونل، در حالت حلقه سگمندی



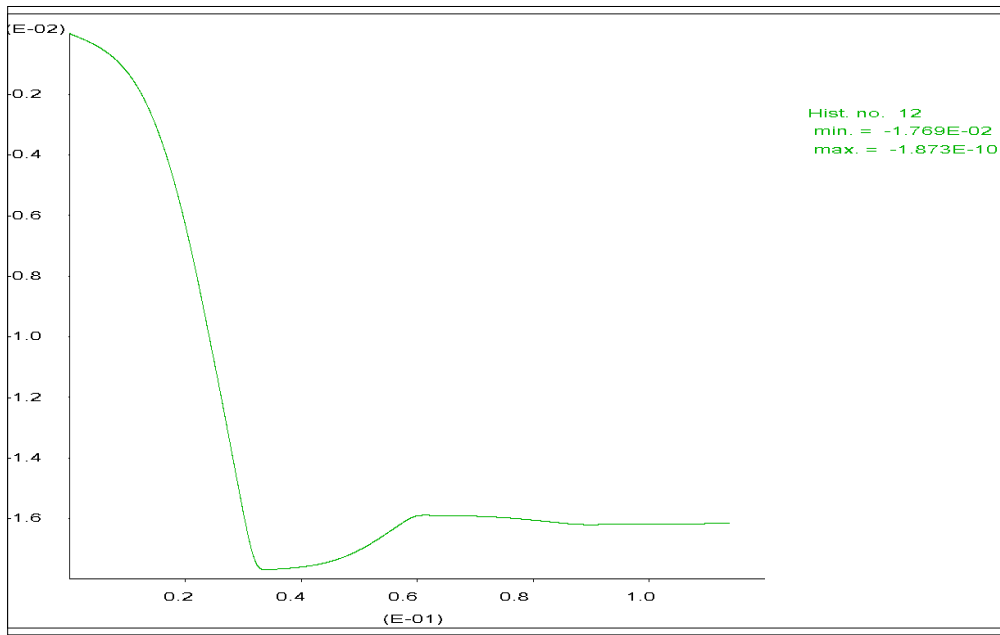
شکل ۱۰- تاریخچه‌ی تنش متوسط (S2) در نقطه (۵، ۰/۰، ۲) واقع در سقف تونل، در حالت حلقه سگمندی



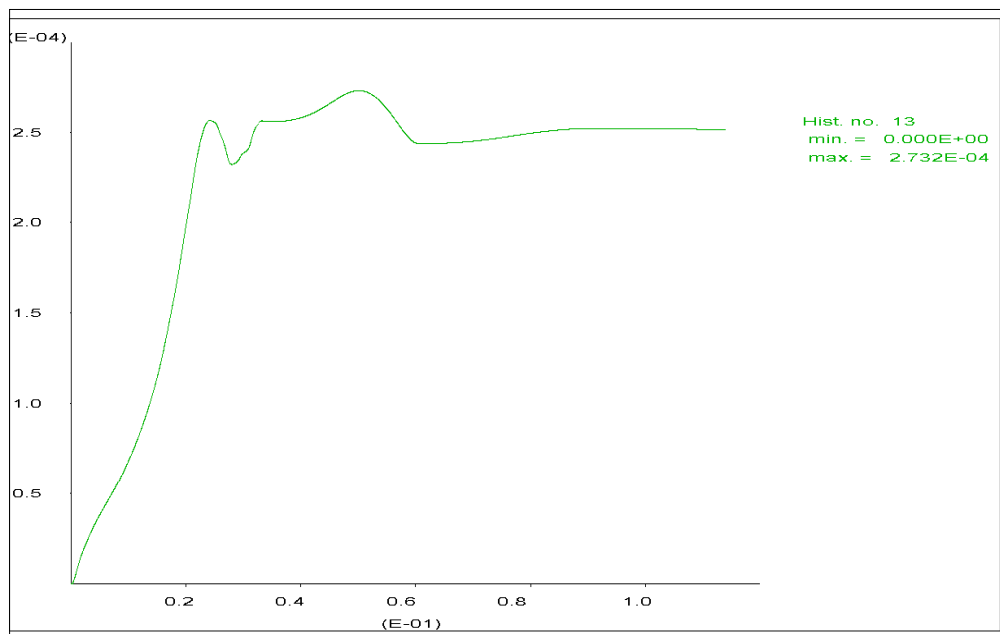
شکل ۱۱- تاریخچه‌ی تنش حداقل (S3) در نقطه (۵، ۰/۰، ۲) واقع در سقف تونل در حالت حلقه سگمنتی



شکل ۱۲- تاریخچه‌ی جابجایی شعاعی در نقطه (۵، ۰/۰، ۲) واقع در سقف تونل در حالت حلقه سگمنتی

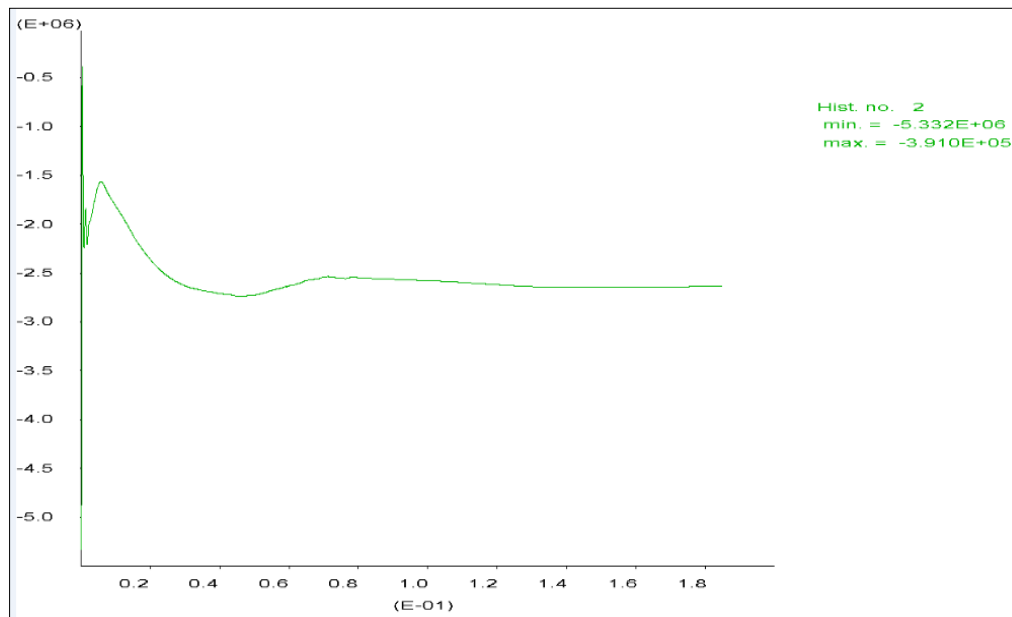


شکل ۱۳- تاریخچه‌ی جابجایی قائم در نقطه (۵، ۲۰/۰) واقع در سقف تونل در حالت حلقه سگمندی

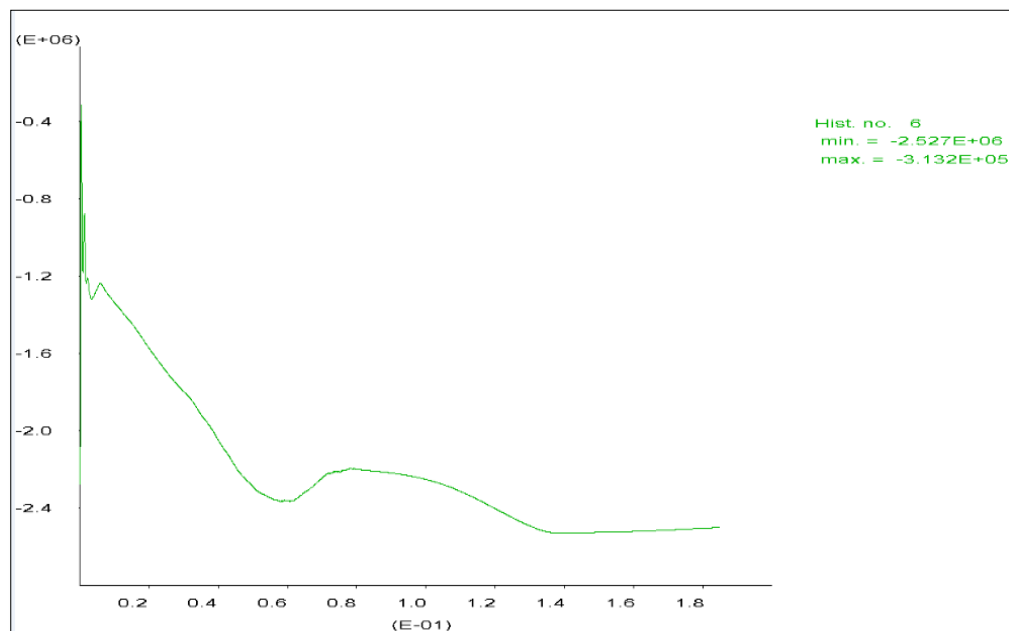


شکل ۱۴- تاریخچه‌ی جابجایی محوری در نقطه (۵، ۲۰/۰) واقع در سقف تونل در حالت حلقه سگمندی

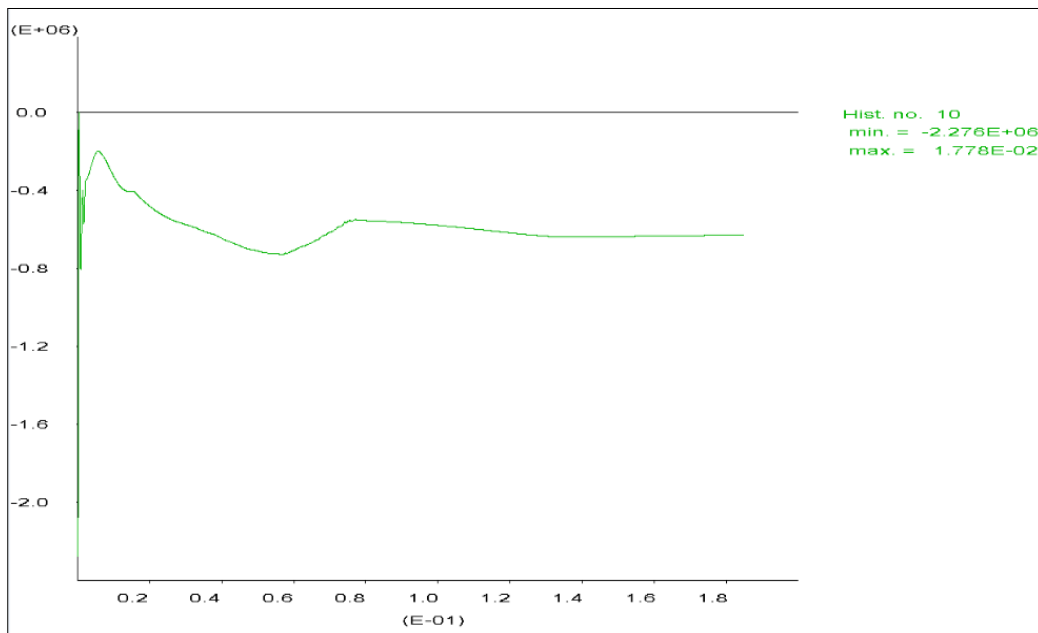
### پیوست ۳-



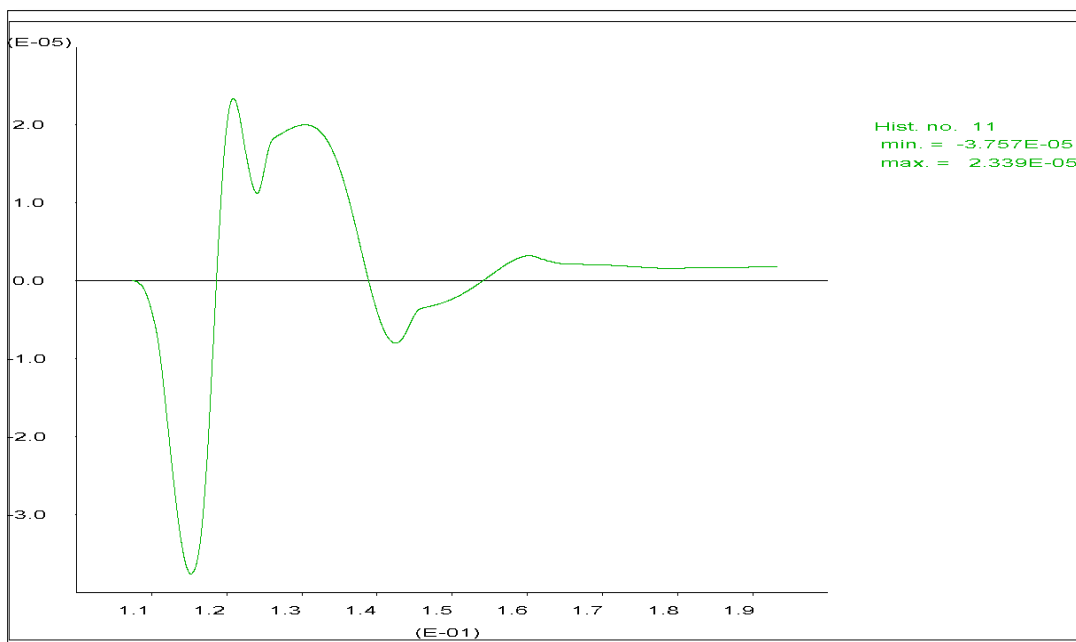
شکل ۱۵- تاریخچه‌ی تنش حداکثر در نقطه (۵، ۰، ۲۰) واقع در سقف تونل، در حالت حلقه پیوسته



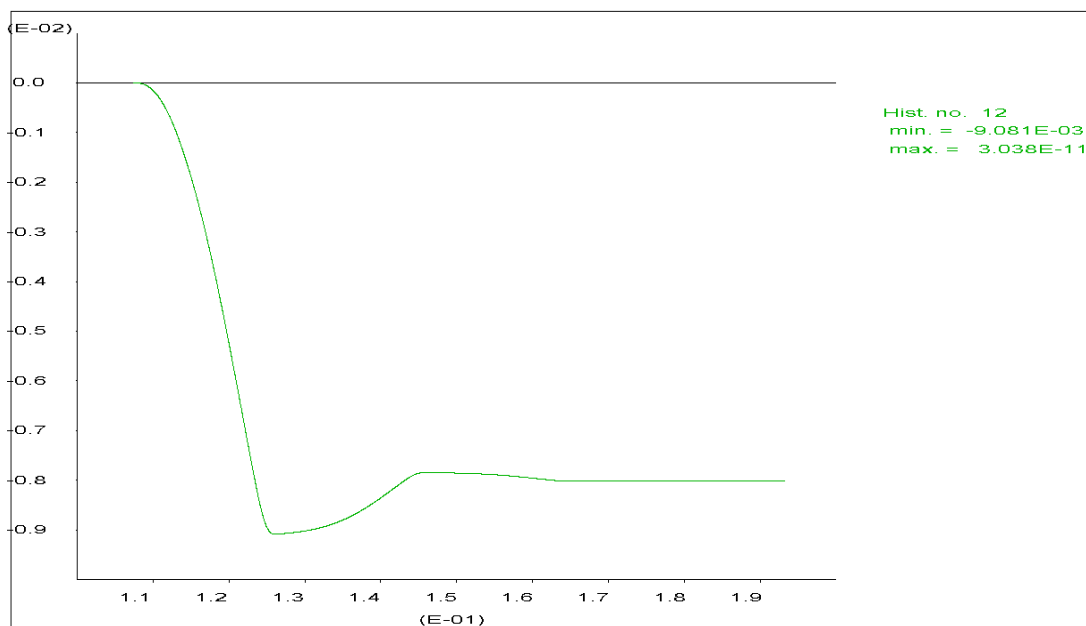
شکل ۱۶- تاریخچه‌ی تنش متوسط (S2) در نقطه (۵، ۰، ۲۰) واقع در سقف تونل، در حالت حلقه پیوسته



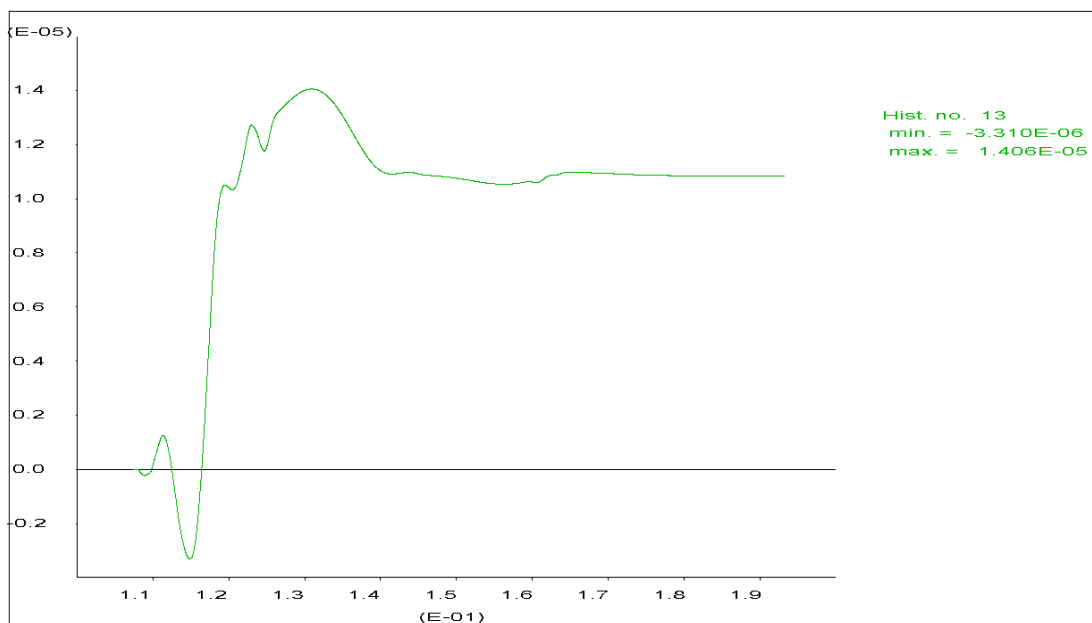
شکل ۱۷- تاریخچه‌ی تنش حداقل (S3) در نقطه (۵،۰/۰،۲) واقع در سقف تونل، در حالت حلقه پیوسته



شکل ۱۸- تاریخچه‌ی جابجایی شعاعی در نقطه (۵،۰/۰،۲) واقع در سقف تونل در حالت حلقه پیوسته



شکل ۱۹- تاریخچه‌ی جابجایی قائم در نقطه (۵، ۰/۰، ۲) واقع در سقف تونل در حالت حلقه پیوسته



شکل ۲۰- تاریخچه‌ی جابجایی محوری در نقطه (۵، ۰/۰، ۲) واقع در سقف تونل در حالت حلقه پیوسته