بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

بررسی تاثیر آرایش درزهای طولی بین سگمنت‌ها و مشخصات مکانیکی دوغاب بر پوشش بتنی تونل با روش مدل‌سازی عددی-مطالعه موردی: خط ۲ مترو تبریز

نگارنده:

محسن بختیاری

استاد راهنما:

دکتر شکراله زارع

تیر ۹۷

شماره: ۶۹۷/۳۰۴۳
تاریخ: ۹۷/۴/۳۱

باسمه‌تعالی

دانشگاه صنعتی شاهرود

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای محسن بختیاری با شماره دانشجویی ۹۴۰۳۴۲۴ رشته مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ تحت عنوان بررسی تاثیر آرایش درزهای طولی بین سگمنت‌ها و مشخصات مکانیکی دوغاب بر پوشش بتنی تونل با روش مدلسازی عددی- مطالعه موردی: خط ۲ مترو تبریز که در تاریخ ۱۳۹۷/۴/۲۵ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: خیلی خوب) ☑ **مردود ☐**

نوع تحقیق: نظری ☑ **عملی ☐**

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنمای اول	دکتر شکراله زارع	دانشیار	
۲- استادراهنمای دوم	—	—	—
۳- استاد مشاور	—	—	—
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر مهدی نوروزی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر مجید نیکخواه	استادیار	
۶ـ استاد ممتحن دوم	دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدده نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تقدیم به

پدر و مادر عزیز و مهربانم

که هر لحظه وجودم را از چشمه سار پر از عشق چشمانشان سیراب می‌کنند...

و در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یاوری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

سپاسگزاری

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان‌نامه را به پایان برسانم. از استاد فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر شکراله زارع به‌عنوان استاد راهنما که همواره اینجانب را مورد لطف و محبت خود قرار داه‌اند، کمال تشکر را دارم.

تعهدنامه

اینجانب **محسن بختیاری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک سنگ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با موضوع **بررسی تاثیر آرایش درزهای طولی بین سگمنت‌ها و مشخصات مکانیکی دوغاب بر پوشش بتنی تونل با روش مدل‌سازی عددی- مطالعه موردی: خط ۲ مترو تبریز** تحت راهنمایی دکتر شکراله زارع متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام‌شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورداستفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود است 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 پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده(یا بافت‌های آن‌ها) استفاده‌شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده‌شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ :

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

حمل‌ونقل شهری یکی از مهم‌ترین مسائلی است که در همه دوره‌ها در برنامه‌ریزی شهری موردتوجه قرارگرفته است. یکی از شبکه‌های حمل‌ونقل عمومی شبکه مترو است. با افزایش کاربرد تونل‌ها، ماشین-های حفاری تونل نیز توسعه قابل‌ملاحظه‌ای یافته‌اند. یکی از روش‌های متداول برای حفاری و نصب سیستم نگهداری تونل، ماشین‌های تمام مقطع است. دامنه کاربرد پوشش‌های سگمنتی در حفاری مکانیزه بیشتر شده است. یکی از فاکتورهای بسیار مهم در طراحی پوشش‌های سگمنتی تونل، تاثیر درزهای سگمنت بر روی عملکرد پوشش بتنی است. مطالعات صورت گرفته در زمینه تحلیل عددی رفتار پوشش تونل‌های حفاری مکانیزه تمام مقطع، نشان می‌دهد که اکثر پژوهشگران از مدل‌های ساده‌شده‌ای استفاده کرده‌اند. بررسی پایداری سیستم‌های قطعات بتنی پیش‌ساخته اغلب بدون در نظر گرفتن درزهای موجود مابین سگمنت‌های بتنی و به‌صورت پیوسته صورت گرفته است. که این امر سبب ایجاد خطای زیادی در نتایج خواهد شد. جانمایی سگمنت در رینگ‌های متوالی و وضعیت اتصال درزها دو پارامتر مهم هستند که نیروهای سازه‌ای و تغییر شکل پوشش را تحت تاثیر قرار می‌دهند. به همین دلیل باید درزها در پوشش تونل برای اطمینان از تخمین دقیق نیروهای سازه‌ای شبیه‌سازی شوند. یکی دیگر از عملیات بسیار مهم حفاری مکانیزه تزریق دوغاب پشت پوشش بتنی بوده که هدف اصلی آن به حداقل رساندن نشست در سطح زمین است.

در این تحقیق برای پوشش بتنی مترو تبریز شش آرایش در نظر گرفته‌شده است که برای این شش حالت نیروهای وارد بر پوشش بتنی، جابجایی پوشش و نشست سطح زمین به دست آورده شده است. آرایش درز تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر گشتاور خمشی وارد بر پوشش بتنی دارد. حداکثر اختلاف گشتاور خمشی بین دو رینگ برای آرایش‌های مختلف ۶۸/۵ درصد است. با این‌حال حداکثر اختلاف نیروهای برشی، طولی و جابجایی‌های قائم وارد بر پوشش بتنی بین دو رینگ متوالی در یک محدوده مشابه به ترتیب ۳۶/۹، ۲۰/۹و۶/۲۵ درصد است. همچنین به‌منظور بررسی تاثیر مشخصات مکانیکی دوغاب بر پوشش بتنی سه حالت در نظر گرفته‌شده است. که با افزایش مدول یانگ ترخیص تنش کمتر بوده و

درنتیجه گشتاور خمشی وارد بر پوشش بتنی افزایش پیدا می‌کند این در حالی است که تغییرات نیروی برشی کوچک بوده است.

کلمات کلیدی : ماشین‌های تمام مقطع، سگمنت، مترو تبریز، پوشش بتنی

لیست مقالات مستخرج از پایان‌نامه:

۱- " مدل‌سازی سه‌بعدی حفاری مکانیزه و تاثیر مشخصات مکانیکی دوغاب سخت شده بر پوشش بتنی تونل- خط ۲ مترو تبریز ". دومین کنفرانس ملی پژوهش‌های کاربردی در مهندسی سازه و مدیریت ساخت. اسفندماه ۱۳۹۶،تهران-ایران.

فهرست مطالب

فصل اول : کلیات ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ بیان مسئله ۲

۱-۳ ضرورت انجام تحقیق ۳

۱-۴ روش تحقیق ۴

۱-۵ ساختار پایان‌نامه ۵

فصل دوم : مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده ۷

۲-۱ مقدمه ۸

۲-۲ پوشش های سگمنتی ۸

۲-۳ تاریخچه قطعات بتنی پیش‌ساخته ۱۰

۲-۴ انواع قطعات بتنی پیش‌ساخته ۱۱

۲-۴-۱ قطعات توپر ۱۱

۲-۴-۲ قطعات حفره‌دار ۱۲

۲-۵ انواع شکل هندسی ۱۲

۲-۶ طراحی پوشش سگمنتال تونل ۱۳

۲-۷ مراحل طراحی پوشش بتنی تونل ۱۴

۲-۸ تحلیل سازه‌ای قطعات بتنی پیش‌ساخته ۱۶

۲-۸-۱ روش معادله الاستیک ۱۷

۲-۸-۲ مدل شولز و دودک ۲۱
۲-۸-۳ روش مویرووود ۲۲
۲-۸-۴ روش تیر و فنر ۲۴
۲-۸-۵ روش عددی (اجزا محدود) ۲۷
۲-۹ تاریخچه کارهای ۲ بعدی انجام‌شده ۲۹
۲-۱۰ تاریخچه کارهای ۳ بعدی انجام‌شده ۳۴
۲-۱۱ مطالعات صورت گرفته درزمینه تاثیر دوغاب بر پوشش بتنی تونل ۴۳
۲-۱۲ جمع بندی فصل ۴۴
فصل سوم : زمین شناسی منطقه و معرفی پروژه قطار شهری تبریز ۴۵
۳-۱ مقدمه ۴۶
۳-۲ زمین‌شناسی عمومی منطقه ۴۸
۳-۳ بررسی ساختاری مسیر ۵۰
۳-۴ نحوه انتخاب مقطع طراحی ۵۱
۳-۵ جمع بندی فصل ۵۴
فصل چهارم : مدل‌سازی عددی ۵۵
۴-۱ مقدمه ۵۶
۴-۲ روش‌های عددی ۵۷
۴-۳ انتخاب روش عددی مناسب ۵۷
۴-۴ روش تفاضل محدود ۵۷

۴-۵ معرفی نرم‌افزار Flac3d ۵۸

۴-۶ مدل‌سازی عددی محدوده موردمطالعه ۵۹

۴-۶-۱ هندسه کلی مدل ۵۹

۴-۶-۲ انتخاب مدل رفتاری ۶۰

۴-۶-۳ تعیین شرایط اولیه و مرزی حاکم بر منطقه ۶۱

۴-۶-۴ حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری ۶۲

۴-۶-۵ مدل‌سازی سپر ماشین ۶۴

۴-۶-۶ مدل‌سازی فشار سینه‌کار و تزریق ۶۵

۴-۶-۷ مدل‌سازی پوشش سگمنتی و درزهای آن ۶۶

۴-۶-۸ مدل‌سازی دوغاب سخت شده (گروت) پشت سگمنت ۶۹

۴-۶-۹ مدل‌سازی فرآیند حفاری تونل ۷۰

۴-۷ جمع بندی فصل ۷۰

فصل پنجم : بررسی تاثیر مشخصات مکانیکی دوغاب و آرایش درزهای طولی ۷۱

۵-۱ مقدمه ۷۲

۵-۲ دوغاب سخت شده ۷۲

۵-۳ تاثیر مشخصات مکانیکی دوغاب بر پوشش بتنی ۷۵

۵-۴ تاثیر مشخصات دوغاب بر نشست زمین ۷۷

۵-۵ درز ۷۸

۵-۶ تاثیر آرایش درزها ۸۲

۵-۷ تحلیل حساسیت بر روی خصوصیات درزهای سگمنت ۸۸

۵-۸ تحلیل حساسیت بر روی تعداد سگمنت‌های یک رینگ ۹۳

۵-۹ جمع بندی فصل ۹۴

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها ۹۵

۶-۱ نتیجه‌گیری ۹۶

۶-۲ پیشنهادات ۹۷

منابع ۹۸

فهرست شکل‌ها

شکل ۲–۱: موقعیت درزهای طولی و محیطی ۹

شکل ۲–۲: سختی K_A, K_R, K_{RO} درز در راستای محوری، شعاعی و چرخشی ۱۰

شکل ۲–۳: نمودار طراحی پوشش داخلی تونل‌ها ۱۶

شکل ۲–۴: شرایط بار در روش معادله الاستیک ۱۹

شکل ۲–۵ : مدل خمیده حلقه بدون خمیدگی تاج ۲۲

شکل ۲–۶ : مدل پیوسته با کرنش صفحه‌ای ۲۴

شکل ۲–۷ : مدلی از روش تیر – فنر ۲۵

شکل ۲–۸ : مدل سه‌بعدی تیر – فنر ۲۶

شکل ۲–۹ : روش المان محدود برای مهندسی تونل ۲۹

شکل ۲–۱۰ : مقطع عرضی مدل سگمنت ۳۰

شکل ۲–۱۱: تاثیر گشتاور خمشی ماکزیمم با تعداد و جهت‌گیری درزها ۳۱

شکل ۲–۱۲: فاکتور کاهشی گشتاور در مقابل سختی زاویه‌ای درز ۳۱

شکل ۲–۱۳: تغییرات ماکزیمم گشتاور خمشی با تغییر تعداد و جهت‌گیری درز ۳۲

شکل ۲–۱۴: تغییرات حداکثر گشتاور خمشی (بحرانی‌ترین جهت‌گیری درز با الف) مقدارK_0 ؛ ب)عمق تونل و ج) نسبت انعطاف‌پذیری ۳۴

شکل ۲–۱۵: تنش‌های قائم به‌صورت یکنواخت در جهت‌های شعاعی، محوری، مماسی توزیع نشده‌اند ۳۶

شکل ۲–۱۶: خروج از مرکز نیروهای قائم محوری ۳۷

شکل ۲–۱۷: ساختارهای تغییر شکل ۳۸

شکل ۲–۱۸: مدل محاسباتی پوشش باربر، دوره تغییر شکل W ،گشتاور خمشی M ، نیروهای قائم N ؛ الف) پوشش پیش‌ساخته بتنی مسلح، درزهای طولی پیوسته(متوالی) در تاج تونل؛ ب) پوشش

پیش‌ساخته بتنی مسلح، درزهای طولی پیوسته در خارج از تاج تونل؛ ج) پوشش بتنی یکپارچه؛ د) سه رینگ با یک درز در تاج؛ ه) سه رینگ با دو درز در تاج تونل ۳۸

شکل ۲–۱۹:تغییر شکل و گشتاور خمشی محیطی الف)برای سیستم جفت شده (۴۰MN = نیروی جک) E_S=۲۵ mpa , k_0=۰.۵ ؛ ب) سیستم جفت نشده (۱۸= ضریب تقویت تغییر شکل) ۴۰

شکل ۲–۲۰: گشتاور خمشی رینگ مرکزی برای E_S=۵۰ mpa , k_0= ۰.۴ در سیستم جفت شده (۴۰MN = نیروی جک) و رینگ مجزا ۴۰

شکل ۲–۲۱ : مدل‌های پوشش. الف) مدل M1 – پوشش پیوسته (یکپارچه) . ب) مدل M2 – رینگ‌های مستقیم - آرایش درز نوع ۱. ج) مدل M3 (مدل مرجع) – رینگ‌های متناوب – آرایش درز نوع ۲. د) مدل M4 – رینگهای متناوب – آرایش درز نوع ۳. ه) مدل M5 – رینگهای متناوب – آرایش درز نوع ۲ ، اتصال (پیوند) صلب در درز رینگ. و) مدل M6-رینگهای متناوب- آرایش درز نوع ۲ ، اتصال آزاد در درز رینگ. ۴۱

شکل ۲–۲۲ : شکل ۱-۱۴ : تاثیر آرایش درز بر روی نشست ناشی از سطح زمین و نیروهای ساختاری توسعه‌یافته در پوشش تونل. a) نشست طولی سطح . b) گشتاور خمشی در رینگ ۳۰. c) نیروی نرمال (قائم) در رینگ d.۳۰) نیروی طولی در رینگ ۳۰. e) جابجایی قائم در رینگ ۳۰ .... ۴۲

شکل ۳–۱ : مسیر خط ۲ قطار شهری تبریز ۴۷

شکل ۳–۲ : مسیر خط دو قطار شهری تبریز بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰منطقه........... ۴۹

شکل ۳–۳ : ستون چینه‌شناسی محدوده شهر تبریز ۵۰

شکل ۳–۴ : مقطع بحرانی ۵۳

شکل ۳–۵ : موقعیت تونل در مقطع بحرانی ۵۳

شکل ۴–۱: هندسه و ابعاد مدل ۶۰

شکل ۴–۲ : شرایط مرزی مترو تبریز در نرم افزار Flac3d..۶۲

شکل ۴–۳ : نمودار مربوط به حداکثر نیروی نامتعادل...۶۳

شکل ۴–۴ : جابجایی قائم در مدل عددی بعد از رسیدن به تعادل ۶۳
شکل ۴–۵ : تنش قائم در مدل عددی بعد از رسیدن به تعادل ۶۴
شکل ۴–۶ : طرح اتصال درز ۶۶
شکل ۴–۷ : سختی K_{RO} ,K_R ,K_A در راستای محوری، شعاعی و چرخشی درز ۶۷
شکل ۴–۸ : طرح هندسی پوشش سگمنتال پروژه خط ۲ مترو تبریز ۶۸
شکل ۴–۹: طرح کلی TBM و جزئیات سیستم تزریق ۶۹
شکل ۵–۱: رابطه بین مقیاس جابجایی شعاعی و فاصله از ابتدای تونل ۷۴
شکل ۵–۲ : کانتورهای جابجایی های قائم بعد از حفاری ۷۴
شکل ۵–۳ : کانتورهای تنش قائم بعد از حفاری ۷۵
شکل ۵–۴ : گشتاور خمشی برای مدول یانگ‌های مختلف در رینگ ۲۰ ۷۶
شکل ۵–۵ : نیروی برشی برای مدول یانگ‌های مختلف در رینگ ۲۰ ۷۷
شکل ۵–۶ : نیروی محوری برای مدول یانگ‌های مختلف در رینگ ۲۰ ۷۷
شکل ۵–۷ : نشست سطح زمین برای مدول یانگ‌های مختلف در طول محور تونل ۷۸
شکل ۵–۸ : شماتیک درزهای رینگی ۷۹
شکل ۵–۹ : آرایش‌های مختلف پوشش بتنی ۸۱
شکل ۵–۱۰ : گشتاور خمشی برای آرایش‌های مختلف پوشش بتنی در رینگ ۲۰ ۸۲
شکل ۵–۱۱ : نیروی برشی برای آرایش‌های مختلف پوشش بتنی در رینگ ۲۰ ۸۳
شکل ۵–۱۲: نیروی طولی برای آرایش‌های مختلف پوشش بتنی در رینگ ۲۰ ۸۳
شکل ۵–۱۳: جابجایی قائم برای آرایش‌های مختلف پوشش بتنی در رینگ ۲۰ ۸۴
شکل ۵–۱۴: نشست سطح زمین برای آرایش‌های مختلف پوشش بتنی در رینگ ۲۰ ۸۴
شکل ۵–۱۵: تغییرات سختی درزها بر روی گشتاور خمشی ۹۱
شکل ۵–۱۶ : تغییرات سختی درزها بر روی نیروی طولی ۹۲

شکل ۵–۱۷ : تغییرات سختی درزها بر روی نیروی برشی ۹۲
شکل ۵–۱۸ : حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای تعداد سگمنت‌های یک رینگ ۹۳
شکل ۵–۱۹: نیروهای وارد بر لاینینگ به ازای تعداد سگمنت‌های مختلف ۹۴

فهرست جداول

جدول ۲-۱: شکل‌های مختلف هندسی برای سگمنت‌ها ۱۳

جدول ۲-۲: معادلات نیروی اعضا برای روش معادله الاستیک ۲۰

جدول ۲-۳ : نتایج مقایسه‌ای محاسبات استاتیکی پوشش بتنی باربر ۳۹

جدول ۳-۱: پارامترهای ژئوتکنیکی مقطع بحرانی ۵۲

جدول ۴-۱: مشخصات سپر استفاده‌شده در تحلیل عددی ۶۴

جدول ۴-۲ : مقادیر فشار جبهه کار و تزریق ۶۵

جدول ۴-۳ : مشخصات پوشش سگمنتی ۶۸

جدول ۴-۴ : پارامترهای مربوط به درز ۶۸

جدول ۴-۵ : مشخصات دوغاب استفاده‌شده ۶۹

جدول ۵-۱ : تحلیل حساسیت دوغاب ۷۶

جدول ۵-۲ : محل قرارگیری سگمنت‌ها در یک رینگ برحسب زاویه θ ۸۱

جدول ۵-۳: نیروهای ساختاری(سازه‌ای) بین رینگ‌های متوالی در مدل M۳ .... ۸۵

جدول ۵-۴: نیروهای سازه‌ای بین رینگ‌های متوالی در مدل M۴ .... ۸۶

جدول ۵-۵: نیروهای سازه‌ای بین رینگ‌های متوالی در مدل M۵ .... ۸۶

جدول ۵-۶: مقایسه نتایج محاسبه‌شده برای پنج مدل مختلف پوشش بتنی ۸۷

جدول ۵-۷: تاثیر اثر اتصال (جفت‌شدگی) بر روی رفتار تونل ۸۸

جدول ۵-۸ : تحلیل حساسیت بر روی مقادیر سختی درزها ۸۹

جدول ۵-۹ : مقدار نیروهای سازه‌ای وارد بر لاینینگ (رینگ۲۰) به ازای مقادیر مختلف سختی شعاعی ۹۰

جدول ۵-۱۰ : مقدار نیروهای سازه‌ای وارد بر لاینینگ (رینگ۲۰) به ازای مقادیر مختلف سختی محوری ۹۰

جدول ۵-۱۱: مقدار نیروهای سازه‌ای وارد بر لاینینگ (رینگ۲۰) به ازای مقادیر مختلف سختی چرخشی ۹۱
جدول ۵-۱۲: نیروهای وارد بر لاینینگ به ازای تعداد سگمنت‌های مختلف ۹۳

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

در سال‌های اخیر تونل‌سازی به روش حفاری مکانیزه، پیشرفت قابل‌ملاحظه‌ای داشته است. درگذشته تونل‌سازی سپری بیشتر در محیط‌های خاکی اجرا می‌گردید. در حال حاضر استفاده از ماشین‌های حفر تونل سپری هم در محیط‌های سنگی و هم خاکی افزایش پیداکرده است. گسترش بازه کاربری این ماشین‌ها منجر به پیشرفت جنبه‌های مختلف در ساخت و تولید آن شده است. سیستم نگهداری این ماشین‌ها متشکل از تعدادی قطعات پیش‌ساخته بتنی است که توسط یکسری قالب‌های خاص تولید می‌شوند.

استفاده از اولین پوشش قطعه‌ای بتنی به سال ۱۹۰۳ میلادی مربوط می‌شود که در گلاسگو اسکاتلند توسط یک پیمانکار انگلیسی ساخته شد. انگیزه اصلی در گسترش پوشش‌های بتنی پیش‌ساخته، کمبود مواد خام، قبل از جنگ جهانی دوم برای چدن بود. اکنون ثابت‌شده است که پوشش‌های متشکل از قطعات بتنی پیش‌ساخته ازنقطه‌نظر اقتصادی و تکنیکی، بسیار مناسب هستند و جانشین خوبی برای پوشش‌های چدنی می‌باشند. البته پوشش‌های چدنی هنوز هم در پروژه‌های زیرآبی که مسئله آب‌بندی از اهمیت زیادی برخوردار است، استفاده می‌شوند. (فرخ‌ا ۱۳۸۶)

۱-۲ بیان مسئله

پوشش نگهداری، سازه‌ای است که برای اطمینان از پایداری تونل در مقابل نیروهایی که از طرف زمین و آب به آن وارد می‌شود، ساخته می‌شود (Wittke,2007). اتصالات موجود بین سگمنت‌های یک رینگ ، اتصالات سگمنتی نامیده می‌شود و اتصالات موجود بین دو رینگ اتصالات رینگی نامیده می‌شود. یکی از مهم‌ترین عامل‌های طراحی پوشش تونل با قطعات بتنی پیش‌ساخته (سگمنت)، تاثیر مفاصل سگمنت روی گشتاور خمشی است. این امر ناشی از تفاوت سختی مفاصل با سختی سگمنت اصلی است. تحقیقات نشان می‌دهد که مفاصل سگمنت علاوه بر سختی کمتر، بیشترین تغییر شکل را نسبت به

بخش اصلی متحمل می‌شوند؛ به همین دلیل مفاصل سگمنت بحرانی‌ترین قسمت پوشش را تشکیل می‌دهند. ازاین‌رو بررسی دقیق محل اتصالات در رینگ‌های بتنی از اهمیت بالایی برخوردار است، چراکه محل اتصالات ازلحاظ پایداری از استحکام کمتری برخوردار بوده و توانایی تحمل تنش و ممان خمشی برابر با دیگر قسمت‌های لاینینگ را ندارند. لذا در اکثر موارد لاینینگ از محل اتصالات دچار آسیب‌دیدگی می‌شود.

یکی دیگر از ملزومات بسیار مهم در حفاری مکانیزه تزریق دوغاب سیمان در پشت فضای سگمنت‌ها است. این تزریق به‌منظور پر کردن فضای خالی بین رینگ سگمنتی و سازند اطراف آن، هدایت رینگ سگمنتی در تراز و امتداد واقعی و جلوگیری از انحراف آن، یکپارچگی و تحکیم پوشش سگمنتی و اعمال بار به‌صورت همگن بر تمام مقطع رینگ و جلوگیری از اعمال بار نامتقارن انجام می‌شود.

شبکه قطار شهری تبریز شامل ۵ خط (شامل ۴ خط شهری و ۱ خط حومه) است. محدوده مطالعاتی خط دوم قطار شهری تبریز است که درمجموع ۲۲٫۴ کیلومتر و شامل ۲۰ ایستگاه از محدوده زمین‌های قراملک (کارخانه کود آلی) شروع‌شده، از طریق خیابان وحدت و میدان قراملک (اولین ایستگاه) و پس از عبور از زیر خیابان آخونی، خیابان قدس، میدان دانشسرا، وارد خیابان عباسی شده و تا میدان شهید فهمیده امتدادیافته و در ادامه مسیر به سمت سه‌راهی ولیعصر، میدان استاد معین و درنهایت در میدان بسیج خاتمه می‌یابد. قطر حفاری این تونل ۹.۵ متر است که دو خط رفت‌وبرگشت به‌طور موازی در کنار یکدیگر قرار دارد. این تونل در محیط خاکی حفرشده است و تاکنون این موضوع برای این تونل بررسی نشده است.

۱-۳ ضرورت انجام تحقیق

اتصالات بین سگمنتی نقش مهمی در نحوه رفتار پوشش نگهداری بتنی دارند. درک صحیح رفتار این نوع اتصالات به درک بهتر نتایج آزمایشگاهی کمک نموده و باعث می‌شود مدل‌های تحلیلی و عددی دقیق‌تری توسعه یابند. با افزایش تعداد مفاصل (کاهش ابعاد سگمنت‌ها) مقدار خمش و برش کاهش

می‌یابد ولی ممکن است که سبب افزایش تغییر شکل‌ها در محل مفاصل گردد که این موضوع باعث ایجاد مشکلات آب‌بندی و کنترل درزهای تونل خواهد شد پس نیاز به مدل‌سازی مقاطع و ارائه بهینه‌ترین حالت برای هر یک از قطرهای متداول است.

در آرایش‌های متفاوت مفاصل[۱] لاینینگ که در آن طرح سگمنت‌ها در رینگ‌های متوالی و وضعیت اتصال درزها مشخص‌شده سه پارامتر مهم که بر نیروهای ساختاری و تغییر شکل لاینینگ تاثیر می‌گذارند عبارت‌اند از نیروهای قائم، ممان خمشی و سختی بین دو رینگ که باید بررسی شوند، به این دلایل درزها در لاینینگ و جانمایی سگمنت‌ها باید شبیه‌سازی شوند.

تحلیل‌های قبلی معمولاً با روش پیوسته بوده و تاثیر درزهای طولی با الگوهای مختلف و همچنین تاثیر اتصال درز تاکنون بررسی نشده است. در این تحلیل برای پروژه خط ۲ متروی تبریز این کار انجام خواهد شد. از مشکلاتی که در حین اجرای قطعات سگمنت ایجاد می‌شود عدم ایجاد پیوستگی بین سنگ و سگمنت‌ها است، معمولاً برای حل این مشکل از تزریق در این فاصله استفاده می‌شود که به علت کامل صورت نگرفتن آن می‌تواند سبب بروز ترک‌خوردگی و حتی خردشدگی در سگمنت‌ها گردد، ازاین‌رو لازم است با تغییر مقادیر پارامترهای ورودی خواص مکانیکی مخلوط دوغاب سیمان در مدل عددی، تاثیر آن بر جابجایی و نیروهای وارد بر پوشش بتنی و غیره بررسی شود.

۴-۱ روش تحقیق

ابتدا مطالعات کتابخانه‌ای انجام و منابع و اطلاعات موردنیاز گردآوری می‌شود عوامل موثر بر پوشش تونل ازجمله جهت‌گیری سگمنت، الگوهای مختلف درزهای طولی، اتصال درزها و مشخصات مکانیکی دوغاب بررسی می‌شود. در مرحله بعد با توجه به این‌که تونل در محیط خاکی حفرشده و محیط پیوسته

---

[۱] joint pattern

است مدل‌سازی عددی سگمنت و دوغاب با استفاده از نرم‌افزار Flac3d انجام می‌گیرد. در ادامه ویژگی‌های هندسی درز سگمنت و ویژگی‌های مکانیکی دوغاب پشت سگمنت شامل مدول یانگ را تغییر داده و نتایج حاصل از مدل‌سازی تفسیر و تحلیل می‌شود و در پایان، گزارشی از کار انجام‌شده ارائه می‌شود. به‌طور مختصر مراحل انجام کار به‌صورت زیر است:

۱) مطالعات کتابخانه‌ای
۲) جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های موردنیاز تونل موردنظر
۳) مدل‌سازی عددی سگمنت و دوغاب با ویژگی‌های هندسی و مکانیکی متفاوت آن‌ها
۴) بررسی تاثیر الگوهای مختلف درزهای طولی و اتصال درزها
۵) بررسی تاثیر دوغاب پشت سگمنت
۶) تحلیل حساسیت نسبت به پارامترهای موثر در سگمنت و دوغاب
۷) اعتبار سنجی مدل
۸) ارائه گزارش

۱-۵ ساختار پایان‌نامه

پایان‌نامه حاضر در ۶ فصل نگارش شده است:

در فصل اول کلیات، اهداف و ضرورت انجام پایان‌نامه و روش تحقیق بیان‌شده است. در فصل دوم مروری بر مطالعات و تحقیقات صورت گرفته در زمینه تاثیر آرایش درزهای طولی بین سگمنت‌ها و مشخصات مکانیکی دوغاب بر روی پوشش بتنی تونل با استفاده از مدل‌سازی عددی، ارائه‌شده است.

در فصل سوم ابتدا مقدمه‌ای در رابطه مترو تبریز ارائه‌شده سپس زمین‌شناسی عمومی منطقه و نحوه انتخاب مقطع طراحی آورده شده است. در فصل چهارم به معرفی نرم‌افزار مربوطه و دلیل انتخاب آن، روش عددی مورداستفاده در نرم‌افزار پرداخته و در آخر مراحل مدل‌سازی عددی به‌طور کامل توضیح داده‌شده است.

در فصل پنجم بر روی پارامترهای مکانیکی دوغاب و پارامترهای سگمنت تحلیل حساسیت انجام‌گرفته و همچنین تاثیر آرایش درزهای طولی بین سگمنت‌ها بر روی نیروهای وارد بر پوشش بتنی تونل

بررسی‌شده است. درنهایت در فصل ششم نتایج و یافته‌های تحقیق به بحث گذاشته‌شده و پیشنهادهایی برای تحقیقات تکمیلی ارائه‌شده است.

فصل دوم

مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده

۲-۱ مقدمه

طراحی و اجرای سامانه نگهداری از مهم‌ترین مسائل در احداث تونل‌ها است. تطابق مناسب سامانه نگهداری بکار رفته در تونل با شرایط محیطی، می‌تواند عملکرد این سامانه را افزایش دهد. یکی از روش‌های متداول حفر تونل در نواحی شهری، حفاری به کمک ماشین‌های تمام مقطع[1] است. یکی از مزایای مهم این روش اجرای سامانه نگهداری دائمی تونل با استفاده از قطعات پیش‌ساخته بتنی[2] به‌صورت هم‌زمان با حفاری است. امروزه دامنه کاربرد پوشش سگمنتی تونل به‌خصوص در حفاری مکانیزه بیشتر شده است. بررسی پایداری سیستم‌های قطعات بتنی پیش‌ساخته اغلب بدون در نظر گرفتن درزه‌های موجود مابین رینگ‌های بتنی صورت می‌پذیرد. که این امر سبب می‌شود تا شکست‌های به وجود آمده در رینگ بتنی ناشی از اعمال نیروی فشاری بالاتر از مقاومت فشاری بتن ایجاد شود. درحالی‌که با توجه به مشاهدات صورت گرفته در محیط‌های اجرایی شکست در این رینگ‌های بتنی در فشاری کمتر از مقاومت‌های بتنی و در محل تماس درزه‌ها مشاهده می‌شود.

۲-۲ پوشش های سگمنتی

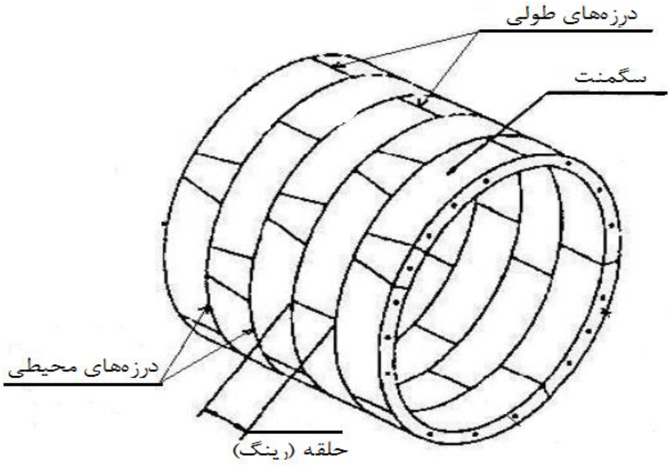
یکی از فاکتورهای بسیار مهم در طراحی پوشش‌های سگمنتی تاثیر درزهای سگمنت بر روی پوشش است. روش‌های مطالعه پوشش سگمنتی عبارت است از روش تحلیلی، روش عددی و آزمایشگاهی. وجود درزهای بین سگمنت از مشخصه‌های اصلی پوشش سگمنتی است. در پوشش‌های سگمنتی (شکل۲-۱) دو نوع درز وجود دارد:

الف: درزهای رینگی یا محیطی بین دو رینگ متوالی

ب: درزهای سگمنتی یا طولی بین سگمنت‌ها در یک رینگ

[1] TBM

[2] Segment



شکل ۲–۱: موقعیت درزهای طولی و محیطی (Do et al,2013)

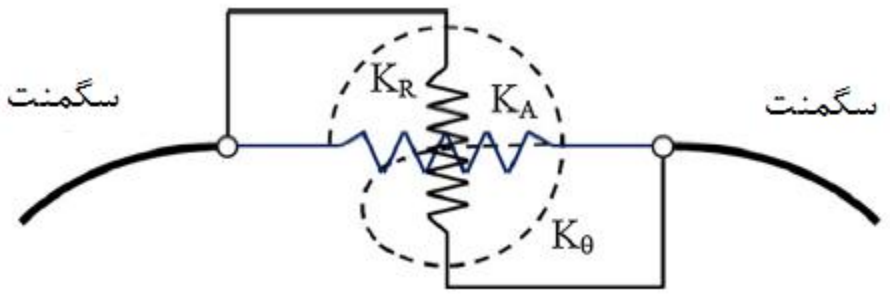
توسعه یک مدل محاسباتی واقعی برای پوشش بتنی پیش‌ساخته نیازمند مدل‌سازی درست درزهای بین سگمنت است که تأثیرشان بر روی ابعاد مقطع[۱] بسیار مهم است. حالت استاتیکی پوشش در مقیاس بزرگ به‌وسیله‌ی صلبیت[۲] (سختی) تعیین می‌شود، یعنی به‌وسیله‌ی ظرفیت کلی[۳] مقاومت در برابر تغییر شکل ، اثر ترکیبی تغییر شکل سگمنت‌ها و تغییر شکل در هر درز تعیین می‌شود.

در اکثر پوشش‌های بتنی مسلح ، تغییر شکل درزها تاثیر قابل‌توجهی بر روی تغییر شکل سگمنت دارد. بنابراین اندازه و توزیع نیروهای داخلی تا حد زیادی به توزیع و مشخصات درزها بستگی دارد. درنتیجه یکی از عوامل مهم در طراحی پوشش سگمنتی تونل تاثیر درزهای سگمنت بر روی رفتار کلی سگمنت است.

در تحلیل‌های سازه‌ای درز سگمنتی را می‌توان به‌عنوان یک پین الاستیک در نظر گرفت و مشخصات سختی‌شان تحت تاثیر سختی چرخشی (K_{RO})، سختی محوری (نرمال)(K_A) و سختی شعاعی (برشی)-(K_R) قرار می‌گیرند. مقدار K_{RO} به‌عنوان گشتاور خمشی مورد نیاز بر واحد طول، که برای ایجاد یک زاویه چرخش واحد در طول درزهای سگمنتی نصب شده، تعریف می‌شود؛ به‌طور مشابه سختی محوری

[۱] Sectional dimensions
[۲] Rigidity
[۳] Overall capacity

K_A، و سختی شعاعی، K_R، به ترتیب به‌عنوان نیروی محوری و نیروی برشی بر واحد طول، موردنیاز برای ایجاد جابجایی‌های محوری و شعاعی واحد در درز مورد نظر تعریف‌شده است (شکل۲-۲) (Do et al,2013).



شکل ۲–۲: سختی K_A, K_R, K_{RO} درز در راستای محوری، شعاعی و چرخشی (Do et al,2013)

۲-۳ تاریخچه قطعات بتنی پیش‌ساخته

تاریخ استفاده از قطعات بتنی پیش‌ساخته به سال ۱۸۶۰ میلادی برمی‌گردد، این پوشش‌ها شامل تعدادی قطعات چدنی قالب‌ریزی شده بود که در تونل بزرگراه لندن استفاده شد. تا سال ۱۹۳۰، سیستم نگهداری غالب تونل‌های حفرشده با ماشین‌های بزرگ تونل‌بری، متشکل از قطعات بتنی پیش‌ساخته بود. پس‌ازآن به‌تدریج پوشش‌های بتنی ساخته‌شده گسترش یافتند. پوشش‌های بتنی پیش‌ساخته در ابتدا در انگلیس برای تونل‌های فاضلاب با قطر کم (۱/۵تا ۳ متر) که در لندن حفر می‌شدند به کار گرفته شدند. پس‌ازآن مسیرهای طولانی، با قطر کم حفرشده در لندن با انواع مختلفی از شکل‌های بتنی پیش‌ساخته، نگهداری می‌شدند. پیمان‌کاران انگلیسی نوع پوشش را برای تونل‌های با قطر ۶ متر گسترش دادند.

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های این نوع قطعات، کوچک بودن ابعاد آن‌ها و کم بودن وزن آن‌ها (۱۰۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم برای هر قطعه) بود که در تونل‌های با قطر زیاد تعداد المان‌های یک حلقه پوشش (۱۲ المان برای تونل با قطر ۶ متر) بیشتر می‌شد، مزیت مناسبی به‌حساب می‌آمد. پس‌ازآن با توسعه

ماشین‌های TBM برای حفاری تونل‌هایی با قطر زیاد (۵ تا ۱۰ متر)، قطعات بتنی پیش‌ساخته با ابعاد بزرگ و با رواداری ساخت خیلی کم، توسعه یافتند. استفاده از اولین پوشش‌های بتنی به سال ۱۹۰۳ میلادی مربوط می‌شود که در گلاسکو اسکاتلند توسط پیمانکار انگلیسی ساخته شد. انگیزه اصلی در گسترش پوشش‌های بتنی قطعه‌ای، کمبود مواد خام قبل از جنگ جهانی دوم برای چدن بود و به‌جای قطعات چدنی، از قطعات بتنی مشابه که پشت آن تزریق انجام می‌شد و به هم پیچ می‌شدند، استفاده شد. اکنون ثابت‌شده است که پوشش‌های بتنی ازنقطه‌نظر اقتصادی و تکنیکی بسیار مناسب و جانشین خوبی برای پوشش‌های چدنی است. البته پوشش‌های چدنی هنوز هم در پوشش‌های زیرآبی که مسئله آب‌بندی مهم است، استفاده می‌شوند چراکه آب‌بندی پوشش‌های بتنی از چدنی مشکل‌تر است.

۲-۴ انواع قطعات بتنی پیش‌ساخته

طی اجرای پروژه‌های متعدد تونل سازی در سراسر دنیا برای نیازهای مختلف شامل تونل‌های مترو، راه‌آهن، تونل‌های انتقال آب، تونل‌های فاضلاب، اشکال مختلفی از قطعات پیش‌ساخته ابداع شد. پوشش دائم در سیستم حفاری مکانیزه اصطلاحا پوشش بتنی سیستم سگمنتال نامیده می‌شود و متشکل از قطعات بتنی پیش‌ساخته در شرایط خاصی است. هندسه قطعات به‌طور اساسی به نوع سیستم نصب قطعات مرتبط می‌شود و بر این اساس اشکال زیر گسترش‌یافته‌اند.

۲-۴-۱ قطعات توپر[1]

این نوع قطعات امروزه بسیار مورداستفاده هستند. این قطعات حاوی یکسری حفرات کوچک برای جایگیری سیستم اتصالات شامل بولت‌ها و داول‌ها و غیره می‌باشند. به‌واسطه‌ی توپر کردن، این قطعات از مقاومت مناسبی برخوردار هستند.

[1] Solid Segment

۲-۴-۲ قطعات حفره‌دار [1]

این قطعات غالباً درگذشته مورداستفاده قرار می‌گرفتند و امروزه کاربرد آن‌ها تنها به سازه‌هایی همانند پوشش چاه‌ها محدودشده است. این قطعات نیاز به قطر حفاری بزرگ‌تری نسبت به قطعات توپر در شرایط سطح مقطع و ممان اینرسی مشابه دارند. اندازه‌ی ابعاد حفرات به‌گونه‌ای است که اجازه‌ی انجام عملیات نصب بولت‌های مستقیم (این بولت‌ها از طریق حفرات ایجادشده در سمت داخلی لاینینگ نصب می‌گردند) که نیاز به حفرات بزرگ‌تری نسبت به سایر اتصالات دارند را می‌دهد.

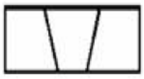
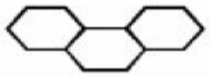
۲-۵ انواع شکل هندسی

به لحاظ هندسی و نحوه کنار هم قرار گرفتن آن‌ها جهت ایجاد یک حلقه کامل سگمنت به سیستم-های چیدمان مستطیلی، ذوزنقه‌ای، لوزی شکل (متوازی‌الاضلاع) و شش‌ضلعی تقسیم می‌شوند. در جدول شماره (۲-۱) براساس برخی پارامترهای قابل‌توجه به مقایسه اشکال مختلف این قطعات پرداخته‌شده و همچنین نحوه چیدمان سیستم‌های مذکور را نشان می‌دهد. از میان سیستم‌های مذکور سه سیستم اول به‌عنوان حلقه به حلقه و سیستم آخری به‌صورت پیوسته اجرا می‌گردند.

جهت تکمیل کردن حلقه و ایجاد اتصال فشاری میان قطعات سگمنت و ایجاد چفت‌وبست در سیستم از یک حلقه تکمیلی سگمنت بنام کلید که با توجه به جدول شماره (۲-۱) برای سیستم‌های ۱ و ۳ لازم است. علاوه بر موارد ذکرشده در جدول انواع دیگری از قطعات پیش‌ساخته که به‌صورت تخت (Flat) یا جعبه‌ای (Box) هستند نیز برای ایجاد یک سطح هموار در کف تونل و یا ... مورداستفاده قرار می‌گیرند (فرخ، ۱۳۸۶).

[1] Ribbed Segment

جدول ۲-۱: شکل‌های مختلف هندسی برای سگمنت‌ها (فرخ،ا ۱۳۸۶)

سگمنت	سیستم متعارف مستطیلی (با کلید) (شماره ۱)	سیستم ذوزنقه‌ای (شماره ۲)	سیستم لوزی شکل (شماره ۳)	سیستم شش‌ضلعی (شماره ۴)
هندسه				
مراحل نصب	حلقه به حلقه - ناپیوسته	حلقه به حلقه - ناپیوسته	حلقه به حلقه – ناپیوسته	پیوسته
سگمنت کلید	دارد	ندارد	دارد	ندارد
اجرای قوس و اصلاح مسیر	نیاز به سگمنت‌های خاص یا ذوزنقه‌ای (سیستم حلقه جهانی)	نیاز به سگمنت‌های خاص یا ذوزنقه‌ای (سیستم حلقه جهانی)	نیاز به سگمنت‌های خاص یا ذوزنقه‌ای (سیستم حلقه جهانی)	نیازمند المان‌های خاص نیست-بازشدگی‌های درزهای پیرامونی محدود می‌گردد.
آب‌بندی درز	درزهای باز یا گسکت	درزهای باز یا گسکت	درزهای باز یا گسکت	درز باز یا درزگیری شده

۲-۶ طراحی پوشش سگمنتال تونل

در ابتدا طراحی پوشش تونل به این صورت بود که پوشش را یک سازه مستقل از زمین می‌دانستند و وزن زمین روی آن را به‌عنوان بار طراحی در نظر می‌گرفتند که پوشش تونل باید توانایی تحمل آن را داشته باشد. طراحی با این روش موجب می‌شد که پوشش تونل بسیار ضخیم در نظر گرفته شود و در اعماق زمین ساخت چنین پوششی،که بتواند وزن کل توده‌های بالای خود را تحمل کند، ازنظر طراحان امری غیرممکن بود.

باگذشت زمان و اجرای چندین تونل، مهندسین دریافتند که همه وزن بالای تونل به پوشش اعمال

نمی‌شود بلکه قسمت عمده آن توسط پدیده قوس زدگی، به اطراف تونل اعمال می‌گردد. پدیده قوس زدگی ازاین‌قرار است که در اثر حفاری، توده‌ای از زمین بالای تونل تمایل به نشست دارد در اثر حرکت رو به پایین این توده، بخشی از نیروی برشی رو به بالا بسیج شده، قسمتی از وزن توده را به زمین اطراف منتقل می‌کند و درنتیجه تنها قسمتی از وزن توده باید توسط پوشش تحمل شود. در این راستا افراد مختلفی کوشیدند با ارائه روابطی، مقدار بار اعمالی به پوشش را تخمین بزنند، این روابط یا جنبه تجربی دارند و یا بر مبنای تئوری و حل تحلیلی مسئله، با در نظر گرفتن فرض‌های ساده کننده‌ای است.

با ظهور کامپیوتر و توسعه روش‌های عددی در حل معادلات دیفرانسیل، کاربرد روش‌های عددی به مهندسی تونل نیز کشیده شد و مسئله اندرکنش زمین و سازه تونل که پیش از آن یا در نظر گرفته نمی‌شد و یا به شکل تقریبی وارد محاسبات می‌شد، امکان حل یافت.

امروزه امکان لحاظ نمودن خصوصیات متنوع زمین و پوشش تونل توسط برنامه‌های کامپیوتری، مهندسین را قادر ساخته که پیش‌بینی بهتری از رفتار متقابل زمین و تونل داشته باشند. استفاده از روش‌های مکانیزه در ساخت تونل‌ها با طول زیاد و در شرایط نامناسب توده زمین اجتناب‌ناپذیر است. حفاری تونل‌ها به‌وسیله ماشین حفار علاوه بر مزایای اقتصادی از سرعت و دقت مناسبی برخوردار است.

۲-۷ مراحل طراحی پوشش بتنی تونل

مراحل طراحی پوشش بتنی شامل:

۱- تعیین پارامترهای هندسی

مسیر تونل، قطر حفاری، قطر پوشش، ضخامت پوشش، متوسط عرض یک حلقه از پوشش، نوع قطعات پوشش و اتصالات درزهای موجود بین قطعات پوشش.

۲- تعیین اطلاعات ژئوتکنیکی

وزن مخصوص، چسبندگی، زاویه اصطکاک، مدول الاستیسیته، مدول تغییر شکل‌پذیری، مقدار k_0

۳- انتخاب مقاطع بحرانی

تاثیر روباره، بارهای سطحی، آب و سازه‌های مجاور

۴- تعیین خصوصیات مکانیکی ماشین حفاری تونل

نیروی فشاری کل، تعداد نقاط فشار، تعداد کفشک‌ها، هندسه کفشک‌ها، فشار تزریق، فضای نصب

۵- تعیین خصوصیات مواد

کلاس بتن، مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، نوع فولاد، مقاومت کششی، نوع نوار آب‌بند، ظرفیت محدوده الاستیک، میزان بازشدگی مجاز

۶- تعیین بارهای وارد برپوشش

شامل بارهای استاتیکی، بارهای فشاری ناشی از جک‌های پیش برنده، بارهای سیستم پشتیبانی، بارهای ناشی از تزریق ثانویه، بار مرده و بار ناشی از سیستم نصب قطعات

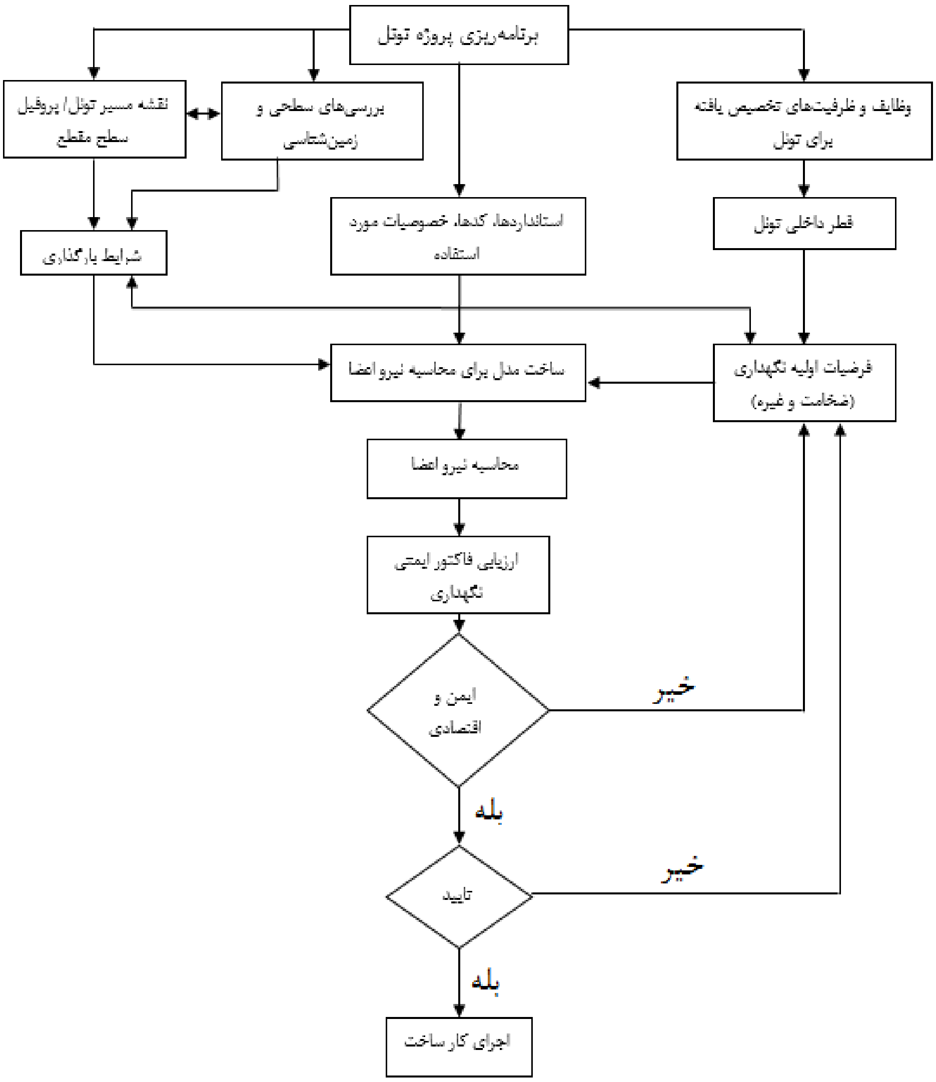
۷- مدل طراحی

شامل مدل تجربی، مدل تحلیلی و مدل عددی است.

۸- نتایج محاسبه‌شده

این نتایج در یک جدول ترتیب می‌یابند که شامل نیروهای برشی و عمودی، ممان خمشی و پیچشی، تعریف بارهای طراحی و سپس تعریف میزان تسلیحات قطعات است. (Toan,2006)

نمودار طراحی پوشش بتنی (شکل ۲-۳) به شرح زیر است:



شکل ۲–۳: نمودار طراحی پوشش داخلی تونل‌ها (ITA2000)

۲-۸ تحلیل سازه‌ای قطعات بتنی پیش‌ساخته

روش‌های سازه‌ای مورداستفاده در آنالیز پوشش سگمنتال TBM باید قادر به نشان دادن بار و تغییر شکل‌ها با توجه به شرایط زمین‌شناسی، ساخت‌وساز و همچنین تعامل بین زمین و پوشش باشند. روش‌های مختلف ساختاری برآورد کننده این معیارها عبارت‌اند از تخمین بر اساس شواهد تجربی، راه‌حل‌های تحلیلی و شبیه‌سازی عددی. برای محاسبه کردن عوامل نیروهای عضو پوشش سگمنتال TBM از شبیه‌سازی عددی استفاده می‌شود. بااین‌حال، روش‌های تحلیلی نیز معمولاً برای ارائه بررسی جمعی در نتایج مورداستفاده قرار می‌گیرد. با توجه به کارگروه شماره ۲ انجمن بین المللی تونل‌سازی

(ITA-WG2[1]) ، نیروهای عضو باید با استفاده از روش‌های ذکرشده در زیر محاسبه شود :

- روش معادله الاستیک[2]
- مدل شولز و دودک[3]
- مدل موير وود[4]
- روش تیر-فنر[5]
- روش عددی (المان محدود)

هیچ راه‌حل منحصربه‌فرد، در مهندسی تونل وجود ندارد. همه‌ی این روش‌ها دارای نقاط قوت و ضعف می‌باشند. همچنین، هر روش اشاره‌شده در فوق دارای برخی محدودیت‌ها است، که باعث محدود کردن استفاده از آن‌ها می‌شود. به دلیل همین نقاط قوت، ضعف و محدودیت‌های این روش‌ها باید قبل از انتخاب روش مناسب در طراحی به‌دقت بررسی‌شده باشند.

۲-۸-۱ روش معادله الاستیک

روش حل معادله استاتیکی یک روش ساده برای محاسبه‌ی نیروهای داخلی با استفاده از روابط ریاضی است که توسط انجمن بین‌المللی تونل سازی معرفی‌شده 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 ممان خمشی مثبت و منفی و مقطع با حداکثر نیروی محوری بررسی شود. نکته کلیدی و اساسی در این روش انتخاب یک مقطع برای آنالیز است. در این روش درزهای بین سگمنت‌ها در نظر گرفته نمی‌شود ولی مقادیر به‌دست‌آمده می‌توانند معیار مناسبی برای مقایسه با روش‌های عددی باشند. روش معادله الاستیک همچنین به‌عنوان روش محاسبه معمول، یک روش ساده برای محاسبه

---

[1] Working Group No. 2, International Tunnelling Association

[2] Elastic equation method

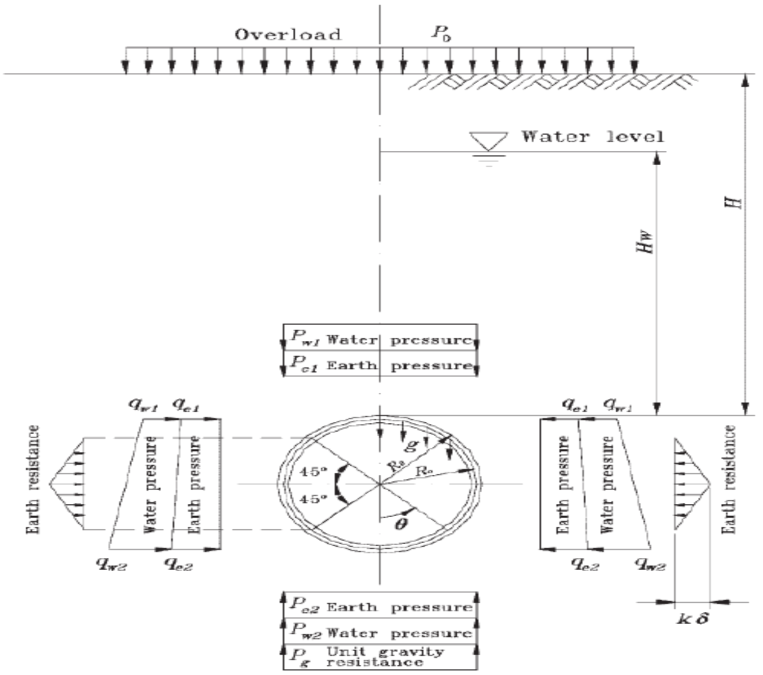
[3] Schultze and Duddeck

[4] Muir Wood

[5] Beam-Spring

نیروهای عضو تونل دایره‌ای بدون کامپیوتر است. این روش توسط استاندارد ژاپنی برای سپر تونل پیشنهادشده است و به‌طور گسترده در ژاپن استفاده می‌شود. مدل توزیع بار مورداستفاده برای این روش در شکل (۲-۴) نشان داده‌شده است. در شکل (۲-۴) ، P_0 اضافه‌بار، R_0 شعاع خارجی پوشش سپر، R_C شعاع خط واصل پوشش سپر، g گرانش پوشش، P_{e1} و P_{w1}، به ترتیب، فشار عمودی زمین و فشار آب تا سمت پوشش سپر اعمال‌شده است. فشار جانبی خاک و فشار آب خطی متفاوت که در هر دو طرف پوشش سپر عمل می‌کنند.

q_{e1} و q_{w1} در بالای پوشش سپر و q_{e2} وq_{w2} در پایین پوشش سپر برابر هستند. P_{e2} و P_{w2} به ترتیب، فشار عمودی زمین و فشار آبی است که به قسمت پایین پوشش سپر اعمال‌شده است. P_g مقاومت عمودی از وزن پوشش که به قسمت پایین پوشش سپر اعمال‌شده است. برای رس شنی، فشار زمین و فشار آب به‌طور فرضی و به‌طور جداگانه بر پوشش اعمال می‌شود. اگر ضخامت روباره دو برابر بزرگ‌تر از قطر خارجی پوشش سپر ($h_0 \geq 2D$) باشد، باید یک ضخامت روباره موثر انتخاب که با استفاده از فرمول ترزاقی پیشنهاد شده است. توزیع مقاومت افقی زمین به شکل مثلثی و محدوده کاربرد آن در شکل(۲-۴) نشان داده‌شده است.



شکل ۲–۴: شرایط بار در روش معادله الاستیک (استاندارد ژاپن ۱۹۹۶)

پس از اتمام پارامترهای تعیین‌شده، نیروهای داخلی پوشش سگمنتال به‌راحتی می‌تواند محاسبه شود. فرمول الاستیک برای محاسبه نیروهای عضو در جدول (۲-۲) نشان داده‌شده است.

جدول ۲-۲: معادلات نیروی اعضا برای روش معادله الاستیک (استاندارد ژاپن ۱۹۹۶)

نیروی برشی	نیروی محوری	ممان خمشی	بار
$-SC * R_c * P$	$S^2 * R_c * P$	$(1-2S^2) * P * R_c^2/4$	بار قائم $(P = p_{e1} + p_{w1})$
$-SC * R_c * Q$	$C^2 * R_c * Q$	$(1-2C^2) * Q * R_c^2/4$	بار افقی $(Q = q_{e1} + q_{w1})$
$(S + 8SC - 4SC^2) *$ $Q' * R_c/16$	$(C + 8C^2 - 4C^3) * Q' *$ $R_c/16$	$(6 - 3C - 12C^2 + 4C^3) * Q' *$ $R_c^2/48$	بار افقی مثلثی $(Q' = q_{e2} + q_{w2} -$ $q_{e1} - q_{w1})$
$0 \leq \theta \leq \pi/4$ $0.3536S * R_c * k\delta$ $\pi/4 \leq \theta \leq \pi$ $(SC - 0.7071C^2S) *$ $R_c * k\delta$	$0 \leq \theta \leq \pi/4$ $0.3536C{*}R_c * k\delta$ $\pi/4 \leq \theta \leq \pi$ $(-0.7071C + C^2 +$ $0.7071S^2C) * R_c * k\delta$	$0 \leq \theta \leq \pi/4$ $(0.2346 - 0/3536C) * R_c^2 *$ $k\delta$ $\pi/4 \leq \theta \leq \pi$ $(-0.3487 + 0/5S^2 +$ $0.2357C^3) * R_c^2 * k\delta$	عکس‌العمل خاک $(P_k = k.\delta_h)$
$0 \leq \theta \leq \pi/2$ $(\theta * C - 1/6S) * R_c *$ g $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ $[-(\pi - \theta) * C + \theta *$ $S + \pi * SC - 1/6S] *$ $R_c * g$	$0 \leq \theta \leq \pi/2$ $(\theta * S - 1/6C) * R_c * g$ $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ $(-\pi * S + \theta * S + \pi *$ $S^2 - 1/6C) * R_c * g$	$0 \leq \theta \leq \pi/2$ $(3/8\pi - \theta * S - 5/6C) * R_c^2 *$ g $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ $\pi - \theta)S - 5/6C - 1/2\pi * S^2] *$ $R_c^2 * g$	بار مرده $(P_g = \pi.g)$
$\delta_h = [(2P - Q') + \pi * g] * R_c^4/[24 * (EI/h + 0.045k) * R_c^4]$			تغییر شکل افقی در خط مرکزی محیط تونل (δ_h)
θ= زاویه اندازه‌گیری شده از تاج تونل، $S = \sin\theta, S^2 = sin^2\theta, S^3 = sin^3\theta, C = \cos\theta, C^2 = cos^2\theta,\ C^3 = cos^3\theta$			

حلقه سگمنتال از سگمنت‌های مختلفی که توسط پیچ و مهره و یا رولپلاک به هم متصل شده، تشکیل‌شده است. تغییر شکل در این مفاصل اتصالی، از یک سگمنت در یک حلقه با سختی یکنواخت بزرگ‌تر است، چراکه سختی مفاصل کمتر از سختی یک قسمت از سگمنت است. علاوه‌براین، به‌طورکلی اتصالات در مفاصل سگمنت متناوب[۱] است. اما در این روش فرض بر این است حلقه سگمنتال با ممان خمشی یکنواخت است و نمی‌تواند هندسه متناوب را نشان دهد. با این وجود راه‌حل‌های به‌دست‌آمده توسط این روش می‌تواند برای چک کردن نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از روش‌های عددی بسیار

[۱] staggered

کاربردی و مفید باشد. همچنین با این روش عمدتاً در طراحی اولیه و تخمین هزینه برای یک پروژه تونل جدید استفاده می‌شود. این روش باصرفه‌تر از دیگر راه‌حل‌های مشابه است، چراکه روش معادله الاستیک دارای قابلیت محاسبه ممان خمشی، نیروی برشی در هر نقطه از پوشش است. بااین‌حال راه‌حل‌های دیگر تنها می‌توانند گشتاور خمشی و نیروهای حلقه در نقطه‌ای که حداکثر مقدار نسبی رخ می‌دهد تعیین کرد.

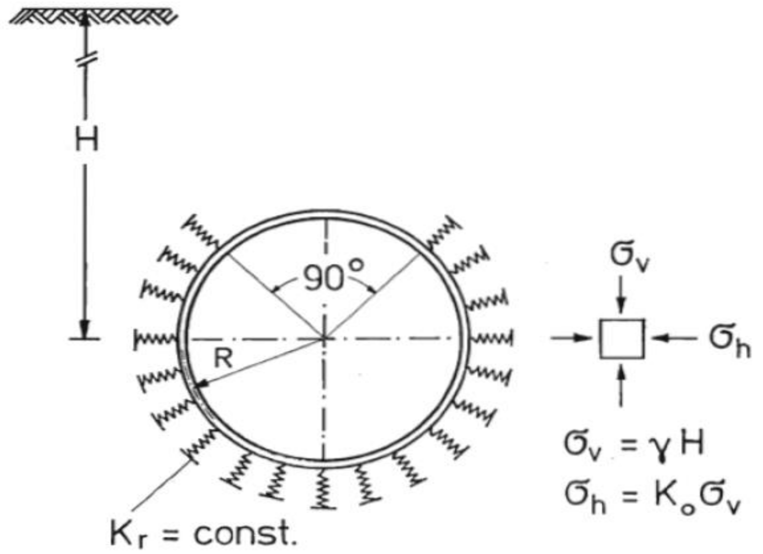
۲-۸-۲ مدل شولز و دودک

نیروی محوری و ممان خمشی در پوشش‌های دایره‌ای احاطه‌شده در یک محیط الاستیک با چند معادلات فرم بسته مانند روش شولز و دودک تعیین می‌شود. این معادلات فرم بسته تنها برای مدل‌های تونل زنی در زمین نرم و برخی از فرضیات اساسی به‌منظور نتیجه گرفتن یک مدل به‌طوری‌که سطح مقطع دایره‌ای باشد، اعمال می‌شود. رفتار مواد خاک و پوشش الاستیک، فشار خاک را بر روی پوشش به‌عنوان تنش اولیه دست‌نخورده در زمین برابر گرفته‌شده و وجود یک پیوند بین پوشش و زمینه را برای تغییر شکل شعاعی و مماسی وجود دارد.

معادلات کامل و بسته برای مدل شکل(۲-۵) برای تونل‌های کم‌عمق با روباره محدود ($H\leq6R$)، دایره‌ای شکل و در زمین‌های نرم درنظرگرفته‌شده، که به‌وسیله‌ی شولز و دودک در سال ۱۹۶۴منتشرشده است. زمین‌های اطراف به‌صورت فنرهای الاستیک و فقط به‌صورت شعاعی مدل‌سازی می‌شوند. ازآنجاکه ممکن است فنرها باعث کاهش بار شوند، از قرار دادن آن در تاج صرف‌نظر شده است. نتایج حاصل از این مطالعه به‌عنوان نمودار طراحی مستقیم برای ممان خمشی، نیروهای حلقه و جابجایی شعاعی برای سه‌نقطه از پوشش که در آن حداکثر ارزش نسبی رخ می‌دهد داده‌شده است. در این روش ضریب سختی (K_r)، یک پارامتر آزاد است و از تنش مماسی و یا بار در راستای مماسی صرف‌نظر می‌شود، سختی این فنرها از رابطه ۲-۱ به دست می‌آید.

$$k_r = \frac{E}{R(1+\nu)} \Delta S.B$$ (رابطه ۲-۱)

در این رابطه k_r : ضریب سختی فنرهای تکیه‌گاهی، ΔS: طول قوسی از پوشش که توسط یک فنر تکیه‌گاهی نگه‌داشته می‌شود (طول یک المان)، B : عرض پوشش سگمنت. (Duddek,1986)



شکل ۲–۵ : مدل خمیده حلقه بدون خمیدگی تاج (Duddek,1982)

۲-۸-۳ روش مویروود

روش مویروود یکی دیگر از معادلات فرم بسته مورداستفاده برای تعیین نیروهای حلقه، ممان خمشی و جابجایی شعاعی است. مانند بسیاری از معادلات فرم بسته، این مدل بر این فرض که زمین یک محیط نامتناهی، الاستیک، همگن و همسانگرد است، استوار است. همچنین، مفروضات اصلی برای معادلات فرم بسته تعیین‌شده در بخش قبلی برای این روش معتبر هستند. (Duddek,1986)

مدل مویروود برای یک محیط پیوسته با کرنش ساده که در شکل (۲-۶) نشان داده‌شده است. در این روش تغییر شکل پوشش دایره‌ای را به حالت بیضوی فرض می‌شود. این روش تنش مماسی زمین را شامل می‌شود اما تغییر شکل‌های شعاعی با توجه به تنش مماسی حذف می‌شوند. مویروود پیشنهاد داد که تنها ۵۰٪ از تنش‌های اولیه زمین در نظر گرفته شود، که اجازه می‌دهد فشار اطراف زمین قبل از قرار دادن پوشش برداشته شود. (Wood,1975)

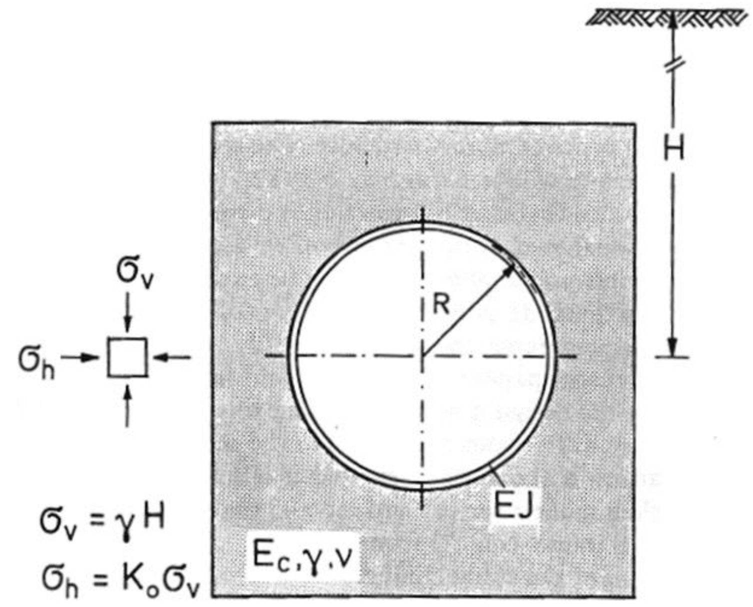
این روش اولین گام محققین برای واردکردن درزها در محاسبات طراحی محسوب می‌شود و تا پیش

از آن معمولاً محققین مختلف از واردکردن درزها در محاسبات صرف‌نظر می‌کردند. بر این اساس مویرووود در سال ۱۹۷۵ رابطه (۲-۲) را برای تعیین ممان اینرسی موثر لایه‌ی نگهداری سگمنتال معرفی کرد این رابطه با فرضیات الاستیک و ایزوتروپ بودن زمین بنیان دارد و بر اساس مدل کرنش صفحه‌ای پیوسته است.

$$I_e = I_j + (\frac{4}{n})^n * I \quad , \; I_e < I \, , n > 4$$ (رابطه۲-۲)

I_e مقدار ممان اینرسی موثر، I_j مقدار ممان اینرسی موثر بر روی درزها، I ممان اینرسی لایه نگهداری، n تعداد سگمنت‌ها در یک حلقه.

در این روش مویرووود با بیان ممان اینرسی موثر برای لایه سگمنتال از تاثیر مستقیم تعداد و آرایش درزها در محاسباتش صرف‌نظر کرد و این مؤلفه‌های بنیادی را در محاسباتش وارد نکرد و یک فرمول تجربی را برای تخمین اثر درزهای طولی در رینگ‌های از هم جدا معرفی کرد که توسط این فرمول می‌توان با کاهش سختی خمشی لایه‌ی سگمنتال آن را با یک‌لایه‌ی صلب همگن جایگزین کرد. بیش‌ترین ممان خمشی محاسبه‌شده به‌وسیله‌ی این روش کاملاً با بیش‌ترین ممان خمشی محاسبه‌شده برای حلقه‌های مجزای درزدار همخوانی دارد. مویرووود نهایتاً به این نتیجه رسید که برای تونل‌های یا لایه‌ی سگمنتال کمتر از چهار درزه، درزها تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای در نیروهای داخلی و استحکام لایه‌ی سگمنتال ندارد. به‌هرحال این نظریه برای به دست آوردن ایده‌ی اولیه از نیروهای داخلی لایه‌ی سگمنتال کاملاً مفید است.



شکل ۲–۶ : مدل پیوسته با کرنش صفحه‌ای (Wood,1975)

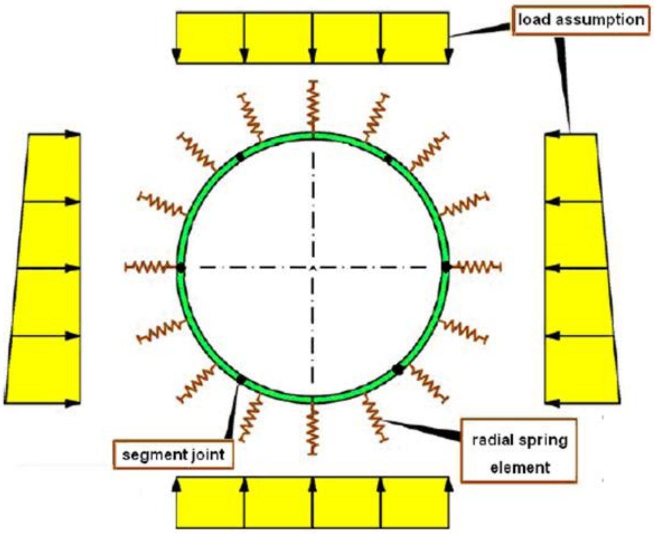
۲-۸-۴ روش تیر و فنر

روش تیر – فنر، به‌عنوان "روش ضریب واکنش بستر[۱]" نیز نامیده می‌شود، که در شکل (۲-۷) نشان داده‌شده است. در این روش، پوشش به‌طورکلی توسط یک قوس نشان داده‌شده که به یک‌چند ضلعی با زاویه ثابت کاهش می‌یابد. هر قطعه از پوشش به‌وسیله فنرها که نشان‌دهنده عکس‌العمل الاستیسیته زمین است، نگهداری می‌شود. به‌عبارت‌دیگر، پوشش و زمین به‌وسیله‌ی یک سری از میله‌ها و تیرها به ترتیب نشان داده می‌شوند. فرض بر این است که عکس‌العمل زمین ناشی از جابجایی تولیدشده در پوشش، متناسب با تغییر شکل زمین است.

این فرض اجازه می‌دهد که تعامل میان سگمنت‌ها و زمین اطراف در نظر گرفته شود. از کاربردهای این روش این است که فنرهای زمین معمولاً در جهت شعاعی مؤثرتر تصور می‌شود، اما هم‌چنین نمونه‌های استثنایی با این فرض که فنر زمین نیز در جهت مماسی موثر هستند وجود دارند. به‌منظور تولید نتایج محافظه‌کارانه (ایمن)، فنرهای خاک که تنها در جهت شعاعی عمل می‌کنند، برای نشان دادن اطراف زمین نیز استفاده می‌شود. این فرض بدان معنی است که لغزش غیر اصطکاک پوشش در

[۱] Coefficient of Subgrade Reaction Method

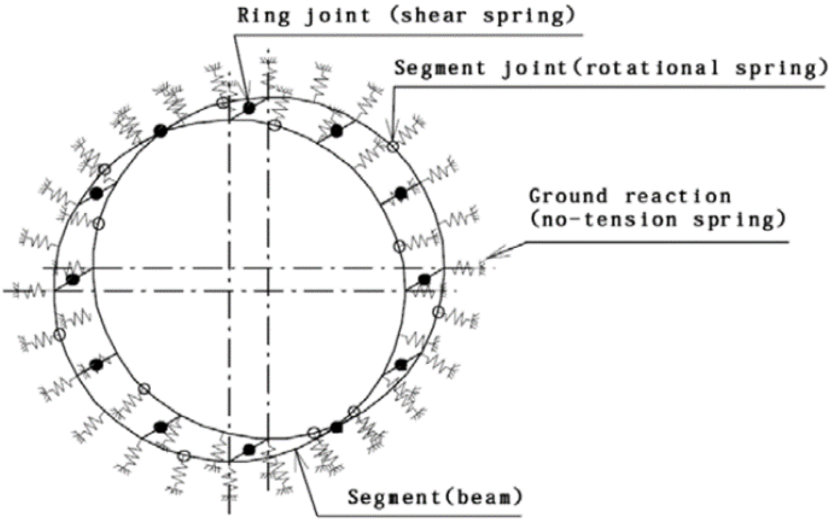
برابر زمین رخ می‌دهد.



شکل ۲–۷ : مدلی از روش تیر – فنر (AFTES, 1993)

تجزیه‌وتحلیل ساختاری با روش تیر – فنر مبتنی بر این فرض است که فعال شدن نیروهای واکنش خاک، زمانی است که تونل به سمت بیرون گسترش می‌یابد، اما زمانی که انقباض به سمت داخل است این نیروها غیرفعال است. به همین دلیل از فنرهای غیر کششی زمین برای نشان دادن اندرکنش بین پوشش و زمین اطراف مورداستفاده قرار می‌گیرد. حلقه سگمنتال، به‌وسیله مونتاژ سگمنت‌های مختلف با پیچ و مهره یا رولپلاک تولید می‌شود. اتصال مفاصل بین سگمنت‌ها دارای سختی کمتری نسبت به بخش اصلی سگمنت است. بنابراین، تغییر شکل در یک حلقه سگمنتال بزرگ‌تر از یک حلقه با سختی خمشی یکنواخت است. در این مرحله، ارزیابی کاهش سختی در مفاصل برای محاسبه نیروهای عضو دارای اهمیت است. برای این منظور، روش‌های مختلف دوبعدی به‌منظور ارزیابی سگمنت‌های مفاصل توسعه‌یافته‌اند. از این نظر مدل‌های متعدد طراحی با این فرض که حلقه سگمنتال به‌عنوان یک حلقه جامد با سختی خمشی زیاد ، حلقه جامد با کاهش سختی خمشی ، حلقه با چندین مفصل لولا شده، حلقه با فنر چرخشی و غیره باشد، وجود دارد. مونتاژ سگمنت‌ها در یک الگوی متناوب برای جبران کاهش در سختی خمشی درز حلقه صورت می‌گیرد. اگرچه مدل‌های دوبعدی قادر به ارزیابی تعامل بین

پوشش و زمین و کاهش سختی خمشی ناشی از درزهای سگمنت هستند، اما نمی‌توانند درزهای حلقه و آرایش متناوب سگمنت‌های مجاور در حلقه را نشان دهند. برخلاف مدل‌های دوبعدی، اتصال حلقه‌های مجاور و آرایش متناوب سگمنت‌ها را می‌توان با روش‌های تیر- فنر سه‌بعدی ارزیابی کرد. شکل(۲-۸)



شکل ۲–۸ : مدل سه‌بعدی تیر – فنر(Cimentepe, 2010)

همان‌طور که در شکل (۲-۸) نشان داده‌شده، این مدل سه‌بعدی دارای توانایی ارزیابی کاهش سختی خمشی و اثر به هم متصل کردن[1] هندسه متناوب با استفاده از یک مدل که در آن یک سگمنت به‌عنوان یک تیر منحنی یا راست، یک درز سگمنت به‌عنوان فنر چرخشی و یک درز حلقه‌ای به‌عنوان فنر برشی در نظر گرفته‌شده را دارد. مانند مدل دوبعدی، عکس‌العمل زمین به‌وسیله‌ی فنرهای غیر کششی در نظر گرفته‌شده است. علاوه بر این، حداقل دو یا چند حلقه در تجزیه‌وتحلیل سه‌بعدی به‌منظور ارزیابی اتصال حلقه‌ها، اثر محل‌های درز و ترکیب‌شان و تنش‌های برشی بر روی یک درزه حلقه استفاده می‌شود. در این روش برای مدل کردن مشخصات سازه از تیر و برای مدل کردن درزهای طولی و محیطی از فنرها استفاده می‌شود. اما نکته‌ای که همواره مطرح است، سختی فنرهای مورداستفاده در مدل‌سازی است. مدل ساده تئوریکی برای توصیف رفتار ممان- چرخش درزهای بین سگمنتی توسط جانسون در

[1] Splice effect

سال۱۹۸۳ ارائه‌شده است. از این سختی برای مدل کردن میزان مقاومت درزه در برابر دوران استفاده می‌شود. مطابق این رابطه تا زمانی که این درزها کاملاً به هم فشرده هستند، سختی دورانی (C_m) ثابت است و می‌توان آن را از رابطه (۲-۳) به دست آورد:

$$C_m = \frac{E.\mathrm{b}^2}{12}$$ (رابطه ۲-۳)

که در آن E مدول دگرشکل پذیری ناحیه تماس (بتن) و b عرض ناحیه تماس است.

برای مدل کردن درزهای محیطی نیز از فنرهای جانبی استفاده می‌شود. معمولاً اتصال حلقه‌ها به‌وسیله‌ی فنرهای جانبی، که بیانگر سختی برشی و حداکثر ظرفیت باربری اتصالات است، شبیه‌سازی می‌شود. سختی برشی درزها به‌وسیله‌ی رابطه (۲-۴) مدل می‌شود :

$$C = \frac{G.A}{D}$$ (رابطه ۲-۴)

که در آن G مدول برشی درزه ، A مساحت صفحه و 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. ازآنجایی‌که فنرهای مماسی اصطکاک بین پوشش و زمین را مدل می‌کنند، با فرض اینکه مؤلفه مماسی به‌وسیله‌ی سنگ حمل می‌شود، می‌توان آن‌ها را از مدل حذف نمود. آنچه باید در انتخاب کلیه‌ی روش‌های معرفی‌شده همواره موردتوجه قرار بگیرد، مدل کردن درزهای یک‌لایه‌ی سگمنتال به شکل مناسب است. برای طراحی سگمنت در موارد عادی مدل‌سازی با استفاده از روش تیر – فنر کفایت می‌کند. اما در مواردی که نسبت به رفتار باربری درزها، رفتار باربری خاصی برای لایه‌ی سگمنتال احتیاج است روش مدل‌سازی اجزا محدود را می‌توان استفاده کرد.

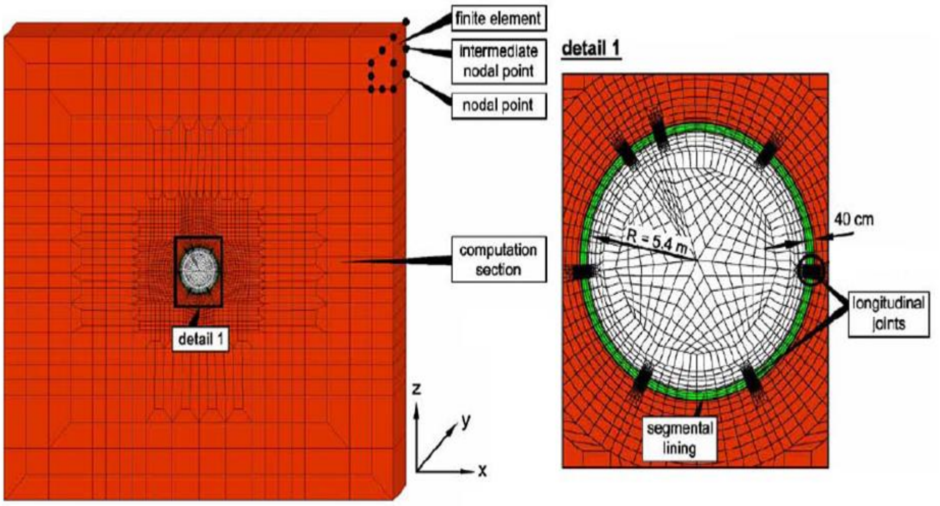
۲-۸-۵ روش عددی (اجزا محدود)

روش اجزا محدود (FEM) که در شکل (۲-۹) نشان داده‌شده یکی از روش‌های عددی است که در ژئومکانیک به‌طور گسترده مورداستفاده قرار می‌گیرد. این روش که از سال ۱۹۵۶ وارد عرصه علم شده

است، در اغلب کارهای مهندسی از قبیل مکانیک جامدات، سیالات، مهندسی ساختمان و مهندسی معدن به کار گرفته می‌شود و در هر پدیده طبیعی که با یک معادله دیفرانسیل بیان شود را می‌توان با به‌کارگیری این روش حل کرد. در دهه ۷۰ روش اجزا محدود برای تحلیل سازه‌های غیرخطی و تغییر شکل‌های بزرگ مورداستفاده قرار می‌گرفت.

درروش اجزا محدود، محیط پیوسته واقعی به‌صورت مجموعه‌ای مرکب از تقسیمات کوچک‌تر به نام المان (اجزا) نمایش داده می‌شوند. هر المان توسط گره‌های اطراف تعریف می‌شود. که از ارتباط المان‌های مجاور از طریق گره‌های مشترک است. ازآنجاکه تغییرات واقعی متغیر (مانند جابجایی و تنش و ...) در داخل این محیط پیوسته مجهول است، فرض می‌کنیم که تغییرات متغیر در داخل یک المان محدود را می‌توان وسیله یک تابع ساده تقریب نمود. این توابع تقریبی که به‌عنوان توابع تقریب و یا درون یاب نامیده می‌شوند، برحسب متغیرهای میدان در گره‌ها تعریف می‌شوند.

روابط تنش-کرنش المان‌ها با ایجاد یک ماتریس سختی جهانی که با مقادیر ناشناخته ارتباط دارد مقادیر ریاضی را مدل می‌کند . سپس این ماتریس با استفاده از تکنیک‌های استاندارد کاهش ماتریس، حل می‌شود و نتایج به دست می‌آید. معادلات برای حل بسیار پیچیده است، و به‌عنوان‌مثال تعداد المان‌ها در مدل افزایش می‌یابد، زمان محاسبه و ظرفیت ذخیره‌سازی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهد. با استفاده از المان محدود، شرایط پیچیده زیرزمینی و ویژگی‌های تونل را می‌توان تجزیه‌وتحلیل کرد. علاوه بر این، این روش قابلیت شبیه‌سازی قوانین ساختاری پیچیده، غیر همگن و تاثیر پیشروی و ویژگی‌های وابسته به زمان روش‌های ساخت را دارد.



شکل ۲–۹ : روش المان محدود برای مهندسی تونل (Sinha,1989)

از سوی دیگر، بسیاری از برنامه‌های المان محدود نیاز به دانش بیشتر در مورد برنامه و کامپیوتر نسبت به روش‌های دیگر دارد. به‌طورمعمول خروجی تجزیه‌وتحلیل نیز پیچیده است و برای ارزیابی نتایج دشوار می‌شود. بنابراین ممکن است به‌منظور غلبه بر این مشکل از پس پردازنده استفاده شود.

۲-۹ تاریخچه کارهای ۲ بعدی انجام‌شده

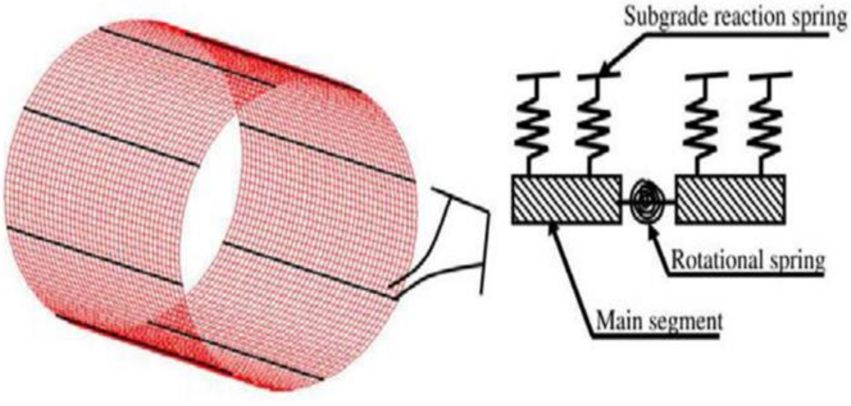
پیشرفت سریع در توسعه کدهای کامپیوتری و محدودیت در روش‌های تحلیلی منجر به افزایش استفاده از روش‌های عددی برای طراحی پوشش تونل شده است. خلاصه‌ای از مدل‌های المان محدود مورداستفاده برای آنالیز تونل سازی قبل از سال ۲۰۰۰ توسط مونیز دی فاریاس[۱] و همکاران در سال ۲۰۰۴ و نگرو و کیروز[۲] در سال ۱۹۹۹ ارائه‌شده است. آن‌ها پس از بررسی بیش از ۶۵ مقاله منتشرشده، نشان دادند که روش المان محدود محبوب‌ترین رویکرد(روش) بوده، که ۹۶ درصد از موارد منتشرشده با این روش انجام‌گرفته درحالی‌که بقیه موارد (۴درصد) با روش المان مجزا (FDM) و دیگر روش‌ها انجام‌گرفته بود. آن‌ها همچنین بیان کردند که ۹۲ درصد از تحلیل‌های انجام‌گرفته در حالت دوبعدی و با فرض شرایط کرنش صفحه‌ای انجام‌گرفته بود. در تحلیل‌های عددی دو تکنیک اصلی برای مدل‌سازی

---

۱ Muniz de Farias

۲ Negro and Queiroz

اندرکنش سازه-زمین استفاده می‌شود: تکنیک اول استفاده از فنرهای گسسته بر اساس نظریه وینکلر[۱]، که بر روی رفتار سازه‌ای (ساختاری) پوشش تونل تمرکز دارد (Blom,1999-Oreste,2007). تکنیک دوم به‌وسیله‌ی مدل زمین کامل[۲] و با استفاده از المان محدود است (Kasper,2004,2006). اگرچه روش دوم فرآیند محاسباتی سنگین‌تری دارد اما به‌طورکلی نتایج دقیق‌تری را فراهم می‌کند. با استفاده از روش اول آقای تیچاورسکین[۳] و چوب-اپکارن[۴] در سال ۲۰۱۰ یک مطالعه عددی را با استفاده از برنامه المان محدود درباره تاثیر سختی چرخشی درزه (شکل۲-۱۰) ، تعداد درزها و مدول بستر زمین[۵] بر روی گشتاور خمشی انجام دادند. بااین‌حال اندرکنش بین زمین و پوشش تونل تنها با توجه به فنرهای واکنش بستر[۶] قائم (نه مماسی) در نظر گرفته شد. بارهای خارجی برای شبیه‌سازی فشار خاک در جهت‌های مربوط به‌صورت افقی و عمودی در نظر گرفته شدند. (فاکتور فشار جانبی خاک برابر ۰.۵ و عمق ۲۰ متر قرار داده شد.)



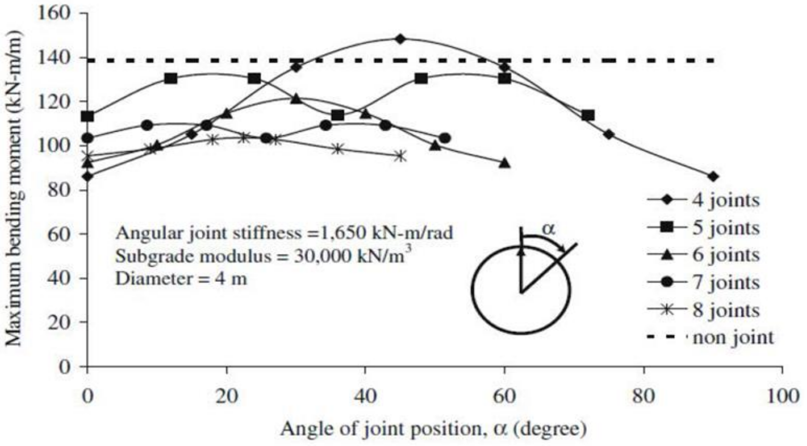
شکل ۲–۱۰ : مقطع عرضی مدل سگمنت (Teachavorasinskun and Chub-Uppakarn,2010)

تاثیر جهت‌گیری درزهای سگمنت به‌وسیله‌ی چرخش درزها در امتداد محیط تونل موردبررسی قرار گرفت. مشخص‌شده که جهت‌گیری درزها تا حد زیادی تحت تأثیر مقدار ماکزیمم گشتاور خمشی وارد

---

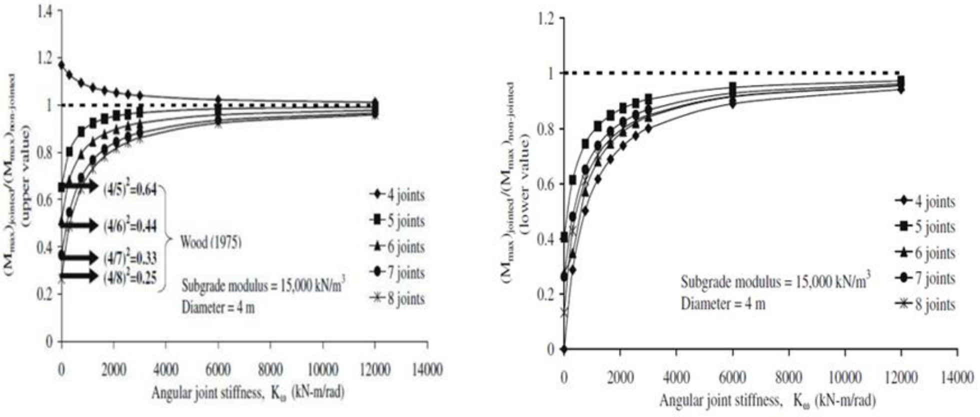
۱ Winkler
۲ full ground model
۳ Teachavorasinskun
۴ Chub-Uppakarn
۵ ground subgrade modulus
۶ subgrade reaction springs

بر پوشش تونل قرارگرفته‌اند. (شکل ۲-۱۱)



شکل ۲–۱۱: تاثیر گشتاور خمشی ماکزیمم با تعداد و جهت‌گیری درزها (Teachavorasinskun and Chub-Uppakarn,2010)

تغییرات ماکزیمم گشتاور خمشی با توجه به محل درزها در همه‌جا به‌صورت سینوسی است که مقدارشان با توجه به افزایش تعداد درزه‌ها کاهش‌یافته است. شکل(۲-۱۲) پلات مقادیر ماکزیمم گشتاور خمشی حداکثر و حداقل در مقابل سختی زاویه‌ای درز، K_{RO} نشان می‌دهد.



الف) مقدار ماکزیمم گشتاور خمشی حداکثر　　ب) مقدار ماکزیمم گشتاور خمشی حداقل

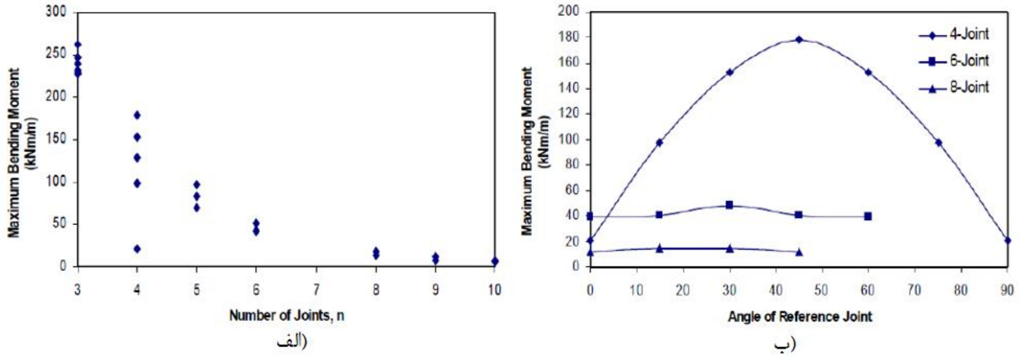
شکل ۲–۱۲: فاکتور کاهشی[۱] گشتاور در مقابل سختی زاویه‌ای درز (Teachavorasinskun and Chub-Uppakarn,2010)

هنگامی‌که درزها صلب هستند (مقدار K_{RO} بالا)، ماکزیمم گشتاور خمشی، هردو مقادیر بالا و پایین، پوشش درزدار به‌طور طبیعی به پوشش غیر درزه‌دار (پوشش پیوسته) نزدیک می‌شوند. بااین‌حال در

[۱] reduction factor

محدوده‌ی توصیه‌شده سختی زاویه‌ای درز (KNm/rad ۳۰۰۰-۱۰۰۰≈) ، حداکثر گشتاور خمشی به حدود ۰/۹۵-۰/۵۰(برای مقادیر بالاتر حداکثر گشتاور خمشی) و ۰/۹۰-۰/۳ (برای مقادیر پایین‌تر حداکثر گشتاور خمشی) که توسط پوشش بدون درز (پوشش پیوسته) به‌دست‌آمده بود کاهش یافت (Teachavorasinskun and Chub-Uppakarn,2010). تا آنجا که به روش دوم مربوط می‌شود، هفنی[۱] و همکاران در سال ۲۰۰۶ تاثیر تعداد درز، جهت‌گیری درز، فاکتور فشار جانبی زمین و عمق تونل بر روی گشتاور خمشی پوشش سگمنتی با قطر ۶ متر با استفاده از برنامه تحلیلی المان محدود موردمطالعه قراردادند. در تحلیلشان درزه‌های سگمنت به‌صورت لولای کامل فرض شده بود. (ظرفیت انتقال جزئی[۲] گشتاور درز به‌وسیله‌ی درزها در نظر گرفته نشد).

شکل(۲-۱۳الف) نشان می‌دهد که افزایش تعداد درزه باعث کاهش ماکزیمم گشتاور خمشی ناشی از پوشش می‌شود. هنگامی‌که تعداد درز بیشتر از ۸ باشد، حداکثر گشتاور خمشی قابل‌اغماض است. علاوه بر این باید توجه داشت مطلوب‌ترین جهت‌گیری مربوط به ۴ درز است که دارای حداکثر گشتاور خمشی پایین‌تری نسبت به ۵ و ۶ درزه است. این نشان می‌دهد که جهت‌گیری درزه تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر روی گشتاور خمشی ناشی از پوشش دارد. بااین‌حال حداکثر گشتاور خمشی برای مواردی با حداقل ۸ درز صرف‌نظر از جهت‌گیری درزه در مقدارشان مشابه هستند (Hefny et al,2006).



شکل ۲–۱۳: تغییرات ماکزیمم گشتاور خمشی با تغییر تعداد و جهت‌گیری درز (Hefny et al,2006).

---

۱ hefny

۲ transmitting partial

نتایج شکل (۲-۱۳ ب) نشان می‌دهد که حداکثر گشتاور خمشی ناشی از پوشش درزه‌دار برای درز مرجع $\omega = 0°$ ، یعنی هنگامی‌که درزه مرجع در تاج تونل قرار دارد، دارای پایین‌ترین مقدار است. بااین‌حال حداکثر گشتاور خمشی در پوشش هنگامی‌که درزه مرجع بین $\omega = 0°$ و بزرگ‌ترین مقدار ممکن ω برای هر تعداد درزه دارای بیشترین مقدار است. هفنی و همکاران در سال۲۰۰۶ همچنین تاثیر فاکتور فشار زمین[۱] را در K_0 های دیگر نشان دادند.

همانطور که در شکل (۲-۱۴ الف) نشان داده‌شده است هنگامی‌که $K_0 = ۲$ است حداکثر گشتاور خمشی بالاترین مقدار و برای مقادیر بین $K_0 = ۱$ (تقریباً گشتاور صفر) و $K_0 = ۰/۵$ کمترین مقدار مشاهده‌شده است. انتظار می‌رود اختلاف بیشتری بین بارهای قائم و افقی اعمالی بر روی پوشش برای مقدار $K_0 = ۲$ در مقایسه با مقادیر $K_0 = ۰/۵, ۱$ نسبت داده شود. شکل (۲-۱۴ ب) نشان می‌دهد حداکثر گشتاور خمشی ناشی از پوشش با افزایش عمق تونل افزایش می‌یابد. این می‌تواند به افزایش فشار روباره اعمالی بر روی پوشش نسبت داده شود. در عمق کمتر تونل، یعنی نسبت H/D حدود ۱ ، حداکثر گشتاور خمشی در پوشش ۶ درزه‌ای و ۸ درزه‌ای کم‌وبیش شبیه هستند. از سوی دیگر این اختلاف در عمق‌های بیشتر تونل به‌طور فزاینده‌ای قابل‌توجه است. این نشان می‌دهد که تاثیر تعداد درزه برای تونل در عمق‌های بیشتر نسبت به تونل در عمق‌های کمتر بسیار مهم‌تر است (Hefny et al,2006).

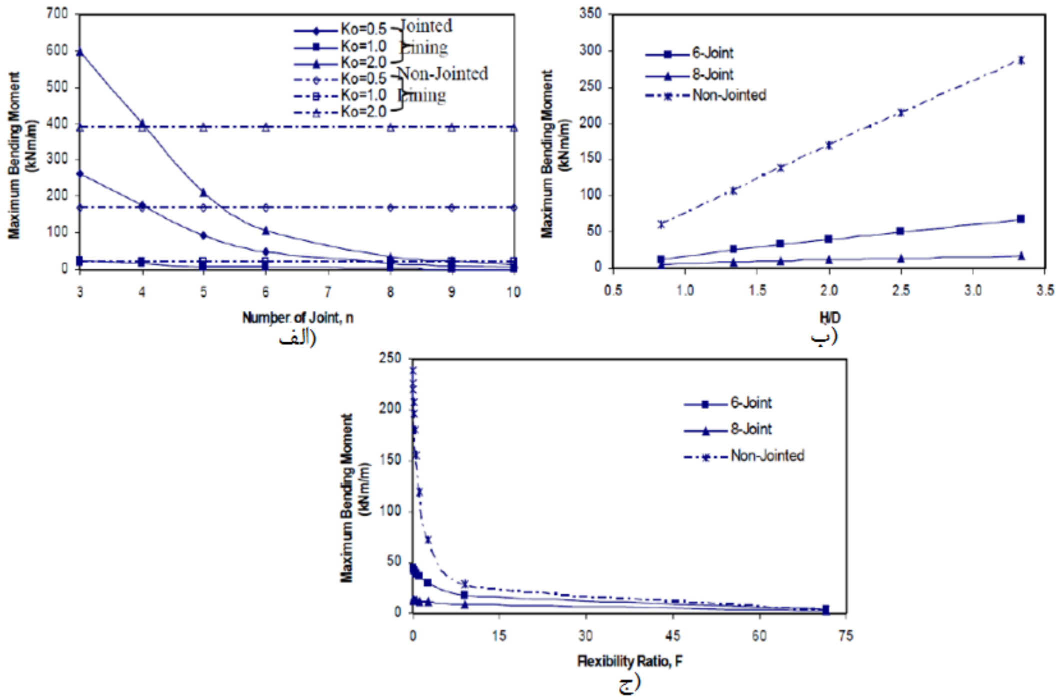
تاثیر انعطاف‌پذیری پوشش بر روی حداکثر گشتاور خمشی ناشی از پوشش سگمنتی تونل بر اساس نسبت انعطاف‌پذیری ،F،که به‌وسیله‌ی پک[۲] در سال ۱۹۷۲تعریف‌شده است، تعیین شد که این نسبت انعطاف پذیری برابر است با نسبت صلبیت پوشش به صلبیت زمین است. شکل (۲-۱۴ ج) نشان می‌دهد برای تونل درزدار با پوشش سخت، حداکثر گشتاور خمشی در پوشش به‌طور قابل‌توجهی تحت تاثیر تعداد درزها قرار دارد. برای مثال با افزایش تعداد درزه از ۶درز به ۸درز برای پوشش سخت با نسبت انعطاف‌پذیری حدود ۰/۰۵، حداکثر گشتاور خمشی در پوشش تقریباً ۷۰درصد کاهش می‌یابد.

---

۱ coefficient of earth pressure

۲ Peck

بااین‌حال تاثیر تعداد درز با افزایش انعطاف‌پذیری به‌خصوص برای مواردی که نسبت انعطاف‌پذیری پوشش بیشتر از ۱۵ باشد، به‌تدریج ناچیز می‌شود (Hefny et al,2006).



شکل ۲–۱۴: تغییرات حداکثر گشتاور خمشی (بحرانی‌ترین جهت‌گیری درز با الف) مقدارK_0 ؛ ب)عمق تونل و ج) نسبت انعطاف‌پذیری (Hefny et al,2006).

۲-۱۰ تاریخچه کارهای ۳ بعدی انجام‌شده

در حال حاضر برای پژوهش معمولاً آنالیزهای سه‌بعدی مورداستفاده قرار می‌گیرد و مونیز دی فاریاس و همکاران در سال۲۰۰۴ از نرم‌افزارهای المان محدود درون‌سازمانی[۱] استفاده می‌کردند، درحالی‌که مجموعه نرم-افزارهای فلک سه‌بعدی، پلاکسیس سه‌بعدی و توک نوگ[۲] تخصصی به‌طورمعمول برای مقاصد تجاری مورداستفاده قرار می‌گیرد. تنها تعداد کمی از این کدها تاثیر درزه‌های پوشش سگمنتی را بر روی رفتار تونل در نظر گرفتند (Arnau and Molins,2012-Thienert and Pulsfort,2011).

خلاصه‌ای جالب از مدل‌های تونل سازی سه‌بعدی در مطالعات ارائه‌شده توسط فرانزیوس در

[۱] In-house finite element software
[۲] Tochnog

سال۲۰۰۴ و فرانزیوس و پوتس[1] در سال ۲۰۰۵ می‌توان یافت. کاسپر و مشکه[2] در سال ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶ سه مقاله درباره بررسی عددی سه‌بعدی با المان محدود ارائه دادند که بر روی تاثیر فشار جبهه کار، فشار تزریق، وزن و طول تریلر و همچنین وزن و باریک‌شدگی[3] ماشین سپری در خاک‌های همگن ، نرم، چسبنده زیر سطح آب زیرزمینی تمرکز داشتند. متأسفانه قطعه‌بندی پوشش تونل در مدل در نظر گرفته نشد.

لامبروگی[4] و همکاران در سال ۲۰۱۲ یک مدل سه‌بعدی را با استفاده از کدهای تفاضل محدود FLAC3D برای حفاری مکانیزه TBM-EPB معرفی کردند. جنبه‌های اصلی حفاری مکانیزه مانند سپر ماشین، پوشش بتنی، نگهداری جبهه کار حفاری، اضافه حفاری، تزریق در سپر دنباله و سخت شدن تدریجی دوغاب سیمانی در این مدل شبیه‌سازی شد. بااین‌حال همانند مدل معرفی‌شده به‌وسیله‌ی کاسپر و مشکه در سال ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶، پوشش تونل با استفاده از المان‌های پیوسته، که در آن ناپیوستگی پوشش تونل نادیده گرفته می‌شود، مدل‌سازی شد.

چاکری و همکاران در سال ۲۰۱۳ نتایجی درباره تأثیرات خصوصیات مهم مانند عمق تونل، فشار روباره، ابعاد تونل و فشار جبهه کار با استفاده از روش‌های تجربی، نظری و عددی مورداستفاده برای کنترل نشست سطح معرفی کردند. آن‌ها نیز مانند محققان قبلی تاثیر درزه‌های سگمنت را در نظر نگرفتند. بلوم و همکاران در سال ۱۹۹۹ یک آنالیز المان محدود سه‌بعدی دقیق برای سازه تونل با استفاده از نرم‌افزار المان محدود پیشنهاد دادند. این مدل اجازه می‌دهد تأثیرات واکنش زمین، اندرکنش بین سگمنت‌ها، مواد بین رینگ‌ها، نیروهای جک، تغییر فاز دوغاب از حالت مایع به جامد و مونتاژ کردن سگمنت‌ها در یک رینگ در نظر گرفته شود.

---

[1] Franzius and Potts

[2] Kasper and Meschke

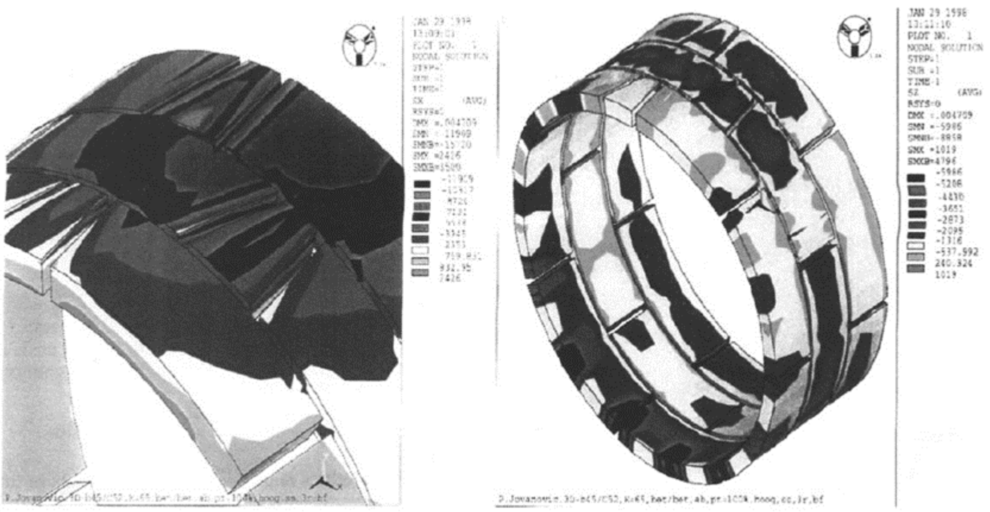
[3] tapering

[4] Lambrughi

اندرکنش بین سگمنت‌ها (در همه جهت‌ها) به‌وسیله‌ی اعمال المان‌های تماس[1]تحقق پیدا کرد. آرایش متناوب پوشش تونل نیز در این مطالعه درنظرگرفته شد. برخی از نتایج به شرح زیر است:

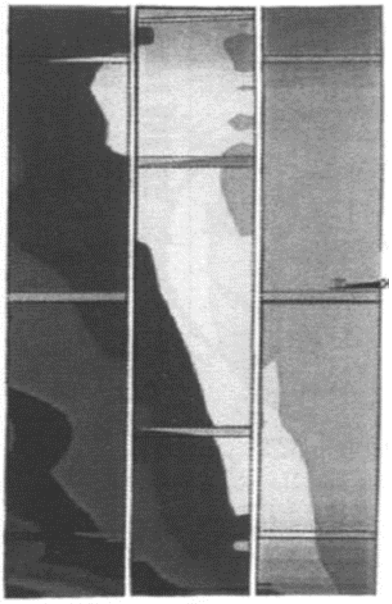
- تنش‌ها به‌صورت یکنواخت در جهت‌های محوری، شعاعی و مماسی توزیع نشده است (نقاط حداکثر تنش) (مسیرهای تنش اطراف سگمنت کلیدی است)(شکل ۲-۱۵)؛
- نیروهای باقیمانده بلندمدت رینگ به سطحی که در طول مونتاژ مشاهده‌شده نزدیک می‌شوند؛
- همان‌گونه که از گشتاور خمشی در جهت طولی تونل می‌توان دید خروج از مرکزیت نیروهای قائم محوری به‌وضوح نشان داده می‌شود؛

حداکثر نیروهای مقطعی اندازه‌گیری شده و گشتاور دو برابر بالاترین پیش‌بینی‌ها با مدل‌های مرسوم بود.(شکل ۲-۱۶)



شکل ۲–۱۵: تنش‌های قائم به‌صورت یکنواخت در جهت‌های شعاعی، محوری، مماسی توزیع نشده‌اند(مسیرهای تنش حول بلوک کلیدی است) (Blom et al,1999)

[1] contact



شکل ۲–۱۶: خروج از مرکز نیروهای قائم محوری (Blom et al,1999)

بدیهی است نتایج‌شان تاثیر قابل‌توجه درزه‌ها و بارهای مرحله ساخت را بر روی پوشش تونل نشان می‌دهد. در این تحقیق به تاثیر درزها (یعنی توزیع درزه، سختی درزه) بر روی رفتار پوشش تونل در طول حفاری با جزئیات پرداخته نشد.

در مدل‌های المان محدود سه‌بعدی ارائه‌شده به‌وسیله‌ی کلاپرز[۱] و همکاران در سال۲۰۰۶ سگمنت‌ها به‌وسیله‌ی المان‌های پوسته[۲] چهار گره‌ای مدل‌سازی شد. مقایسه‌ای بین نیروهای ساختاری ناشی از پوشش پیوسته با نیروهای ساختاری ناشی از پوشش سگمنتی به‌دست‌آمده با استفاده از مدل المان محدود دوبعدی و مدل سه‌بعدی تیر و فنر ارائه‌شده بود. نتایج نشان می‌دهد که گشتاور خمشی محاسبه‌شده در هر دو مدل در یک محدوده مشابه و تغییر شکل تنها کمی متفاوت بود.

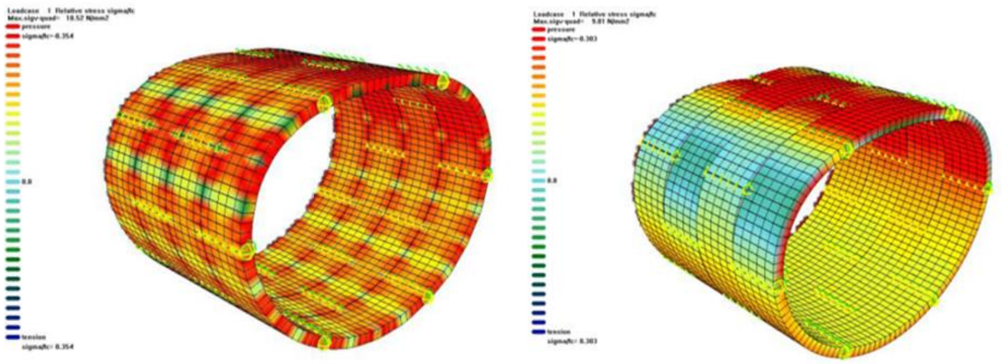
در شکل (۲-۱۷) تاثیر جفت‌شدگی[۳] رینگ‌ها روشن است. در سیستم جفت نشده (کوپل نشده) تغییر شکل مستقل و در سیستم جفت شده تغییر شکل رینگ‌ها هماهنگ است(Klappers et al,2006).

---

۱ Klappers

۲ shell-elements

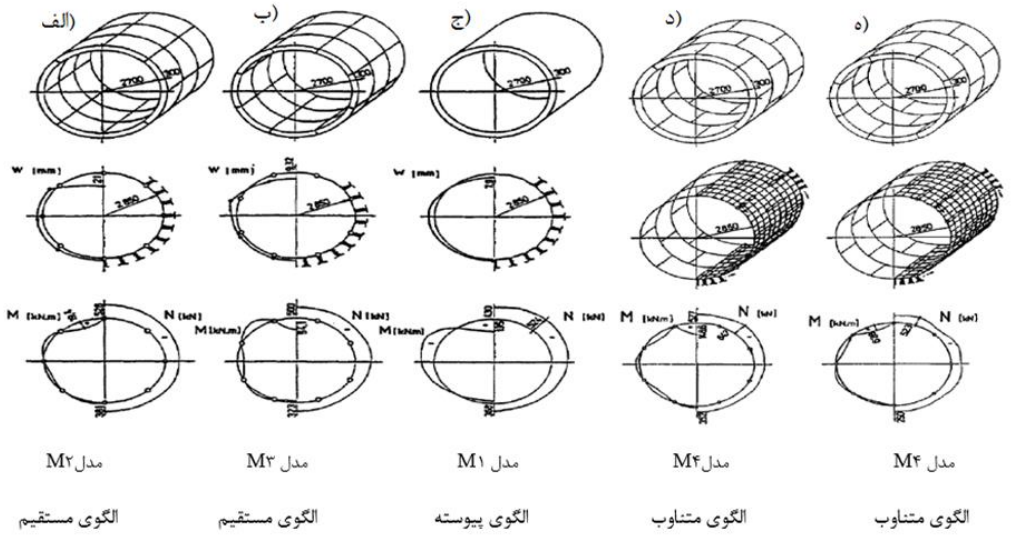
۳ coupling



ب) جفت شده الف) جفت نشده

شکل ۲–۱۷: ساختارهای تغییر شکل (Klappers et al,2006)

هودوبا در سال ۱۹۹۷ محاسبات استاتیکی تطبیقی ساده‌شده برای سیستم نگهداری مترو زیرزمینی با پوشش بتنی ارائه داد. الگوهای متفاوت درزه برای همان ابعاد مقطع عرضی تونل، مدل رفتاری مشابه و درزه‌ها که به‌صورت لولا در نظر گرفته‌شده بودند مورداستفاده قرار گرفت. (شکل۲-۱۸)



شکل ۲–۱۸: مدل محاسباتی پوشش باربر، دوره تغییر شکل W[1]، گشتاور خمشی M ، نیروهای قائم N ؛ الف) پوشش پیش‌ساخته بتنی مسلح، درزهای طولی پیوسته(متوالی) در تاج تونل؛ ب) پوشش پیش‌ساخته بتنی مسلح، درزهای طولی پیوسته در خارج از تاج تونل؛ ج) پوشش بتنی یکپارچه؛ د) سه رینگ با یک درز در تاج؛ ه) سه رینگ با دو درز در تاج تونل (Hudoba,1997)

مقایسه نیروهای ساختاری و تغییرشکل‌های به‌دست‌آمده با استفاده از مدل‌های محاسباتی رینگ‌های ساده مختلف (دوبعدی) و فضایی (سه‌بعدی) نشان داد که مدل‌های رینگ ساده مرسوم نتایج دقیق‌تری

---

۱ Course of deformation

نسبت به مدل (سه‌بعدی) دارند. (جدول۲-۳)

جدول ۲-۳ : نتایج مقایسه‌ای محاسبات استاتیکی پوشش بتنی باربر (Hudoba,1997)

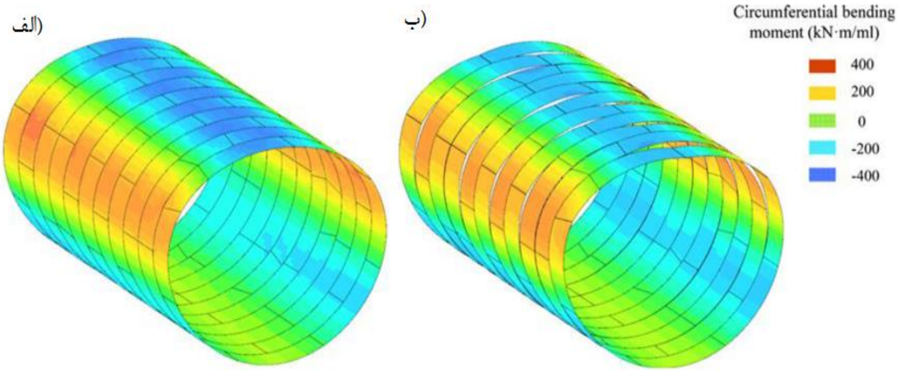
مدل محاسباتی	مدل رینگ ساده (دوبعدی)			مدل رینگ فضایی (سه‌بعدی)	
	M1	M2	M3	M4	M5
W_{max} (mm)	۷.۹	۲۱.۰	۹.۳	۳.۹	۳.۶
c_W	۱.۰	۲.۶۶	۱.۱۸	۰.۵	۰.۴۶
M_{max} (kn.m)	۱۳۵.۰	۱۹.۴	۵۴.۱	۱۴۲.۷	۵۴.۱
c_M	۱.۰	۰.۱۴	۰.۴	۱.۰۶	۰.۴
Ncor (kn)	۴۹۰.۰	۵۳۸	۵۰۰	۵۲۷	۵۲۳
c_N	۱.۰	۱.۱۹	۱.۰۲	۱.۰۷	۱.۰۶

* مقادیر تغییر شکل در رینگ تاج تونل مطلق است. مقادیر Ncor با مقادیر M_{max} متناظر است.

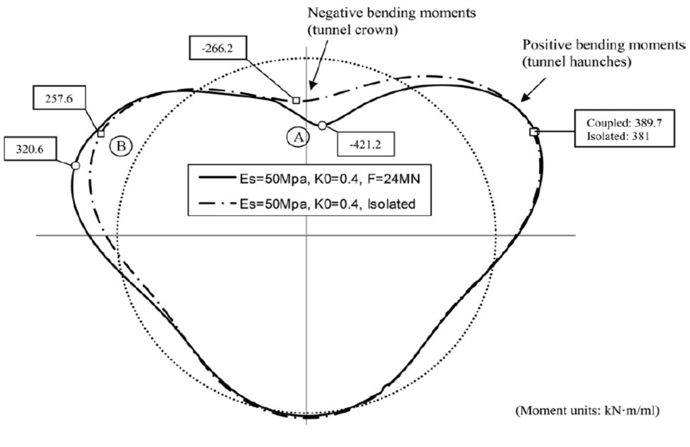
در هیچ‌یک از دو مدل‌بالا (Hudoba,1997-Klappers et al,2006) المان‌های دیگر از فرآیند حفاری تونل مانند TBM ، فشار جبهه کار ، فشار تزریق و غیره را در نظر نگرفتند. پوشش سگمنتی در مدل ارائه‌شده توسط مدینا رودریگز[۱] در سال ۲۰۰۸ با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D در نظر گرفته شد. المان‌های سطح مشترک برای بازتولید ارتباط بین همه سگمنت‌هایی که پوشش را شکل می‌دهند به کار گرفته شد. در طول پیشروی سپر بارهای پیشروی جک‌های هیدرولیکی به‌وسیله‌ی سگمنت‌ها در جهت طولی پشتیبانی می‌شود. بااین‌وجود مانند پژوهش آقای بلوم و همکاران در سال ۱۹۹۹ تاثیر درز بر روی پوشش تونل معرفی نشد (Arnau and molins,2012). تاثیر اندرکنش بین رینگ‌های مجاور بر پاسخ سازه‌ای پوشش سگمنتی تونل در معرض بارهای طراحی معمولی (طولی یکنواخت) را تحلیل کردند. مدل المان محدود سه‌بعدی که از مقطع تونل واقعی خط ۹ مترو بارسلونا تشکیل‌شده بود ، با

۱ Medina Rodríguez

استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی ،که اجازه پاسخ درزه و رفتار ماده را می‌دهد، شبیه‌سازی شد. یک تحلیل حساسیت به‌منظور فراهم کردن تاثیر پارامترهای مختلف، سختی زمین، بار واقعی و نیروی طولی باقیمانده بر روی پاسخ سه‌بعدی سازه انجام شد. نتایج تأثیرات قابل‌توجه اتصال رینگ بر روی رفتار پوشش را نشان می‌دهد (شکل ۲-۱۹و۲-۲۰). بااین‌حال اندرکنش سازه-زمین به‌وسیله‌ی المان‌های فنر در جهت‌های شعاعی، مماسی و طولی مدل‌سازی شد. علاوه بر این تاثیر دیگر جنبه‌های مربوط به ساخت تونل مانند ماشین سپر و بارهای مرحله ساخت (یعنی فشار جبهه کار و فشار تزریق) در نظر گرفته نشد. بدیهی است درزه‌های پوشش تونل تاثیر زیادی بر روی رفتار تونل دارند.



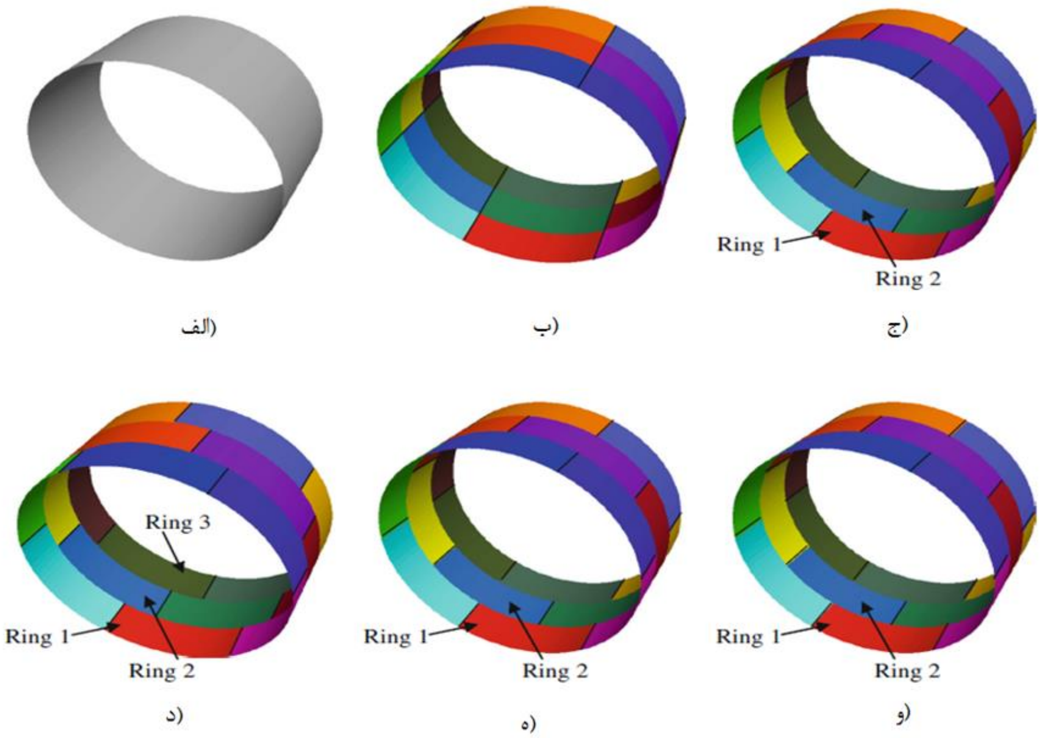
شکل ۲–۱۹:تغییر شکل و گشتاور خمشی محیطی الف)برای سیستم جفت شده (۴۰MN = نیروی جک)
E_S=۲۵ mpa , k_0= ۰.۵ ؛ ب) سیستم جفت نشده (۱۸= ضریب تقویت[1] تغییر شکل) (Arnau and molins,2012)



شکل ۲–۲۰: گشتاور خمشی رینگ مرکزی برای E_S=۵۰ mpa , k_0= ۰.۴ در سیستم جفت شده (۴۰MN = نیروی جک) و رینگ مجزا (Arnau and molins,2012)

---
[1] amplification factor

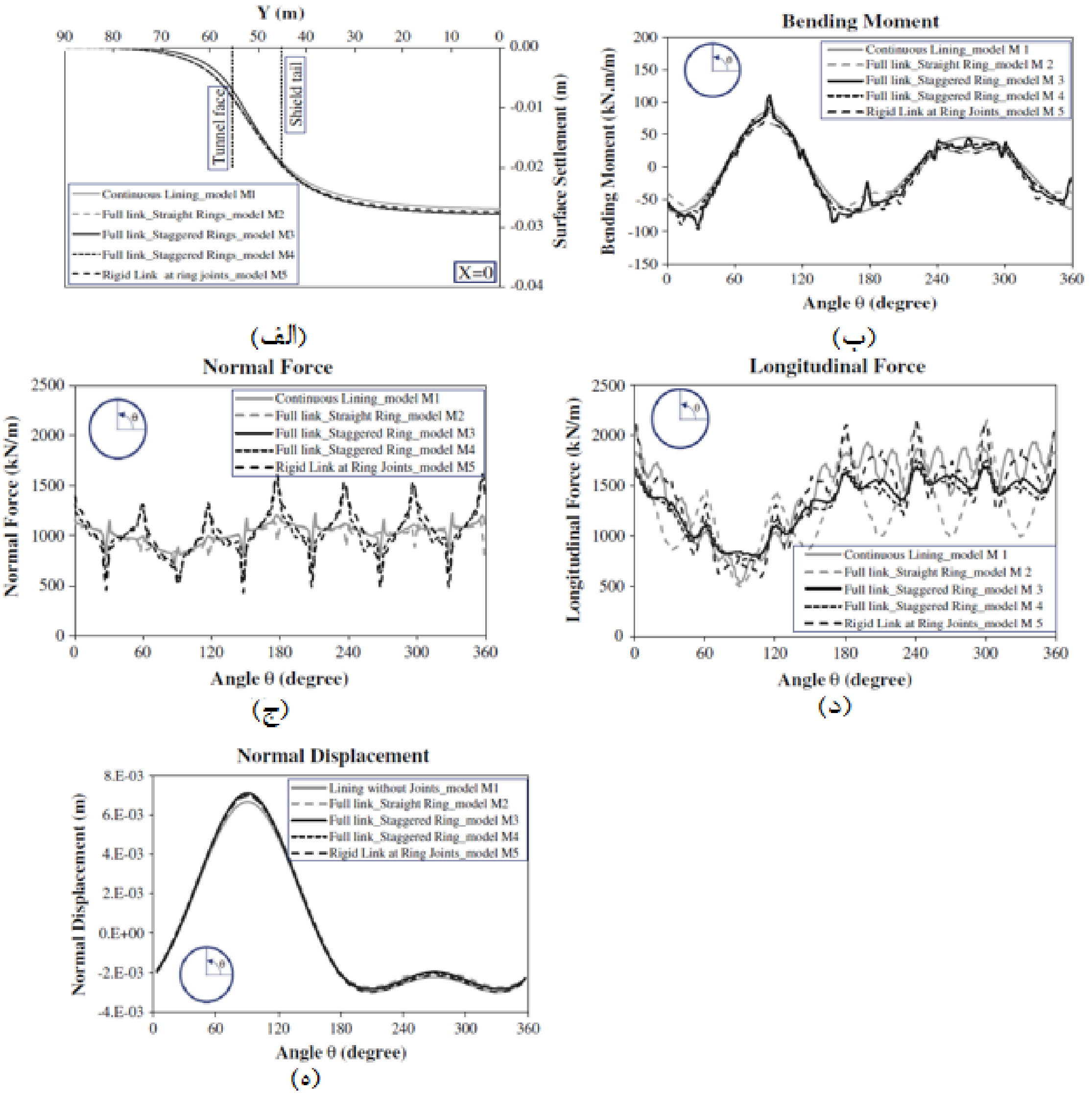
دو[1] در سال ۲۰۱۴ تاثیر آرایش درزه‌های پوشش، هر دو درزه سگمنتی و رینگی و نیز وضعیت اتصالشان را موردبررسی قرارداد. در این پژوهش ۶ مدل پوشش با توجه به تاثیر آرایش درزه‌ها و اثر جفت‌شدگی موردبررسی قرار گرفت. (شکل ۲-۲۱)



شکل ۲–۲۱ : مدل‌های پوشش. الف) مدل M1 – پوشش پیوسته[2] (یکپارچه) . ب) مدل M2 – رینگ‌های مستقیم[3] - آرایش درز نوع ۱. ج) مدل M3 (مدل مرجع) – رینگ‌های متناوب[4] – آرایش درز نوع ۲. د) مدل M4 – رینگ‌های متناوب – آرایش درز نوع ۳. ه) مدل M5 – رینگ‌های متناوب – آرایش درز نوع ۲ ، اتصال[5] (پیوند) صلب در درز رینگ. و) مدل M6-رینگ‌های متناوب- آرایش درز نوع ۲ ، اتصال آزاد در درز رینگ. (Do et al,2014)

هدف از این مطالعه پارامتری برجسته کردن تاثیر توزیع درز بر روی رفتار پوشش تونل و جابجایی‌های زمین بود. (شکل ۲-۲۲)

[1] Ngoc-Anh Do
[2] continuous
[3] straight
[4] staggered
[5] link



شکل ۲–۲۲ : شکل ۱-۱۴ : تاثیر آرایش درز بر روی نشست ناشی از سطح زمین و نیروهای ساختاری توسعه‌یافته در پوشش تونل. a) نشست طولی سطح . b) گشتاور خمشی در رینگ ۳۰. c) نیروی نرمال (قائم) در رینگ ۳۰.d) نیروی طولی در رینگ ۳۰. e) جابجایی قائم در رینگ ۳۰ (Do et al,2013)

برخی از نتایج این کار به شرح زیر است:

- به‌طورکلی در یک پوشش سگمنتی با درزه مرجع نزدیک‌تر به تاج تونل ممان خمشی کمتری دیده‌شده است.
- بر اساس جانمایی سگمنت‌ها در رینگ‌های متوالی و وضعیت اتصال درزها مشخص‌شده که دو پارامتر مهم که بر روی نیروهای ساختاری و تغییر شکل پوشش تاثیر می‌گذارند عبارت‌اند از : نیروهای قائم و ممان خمشی.

- سختی بین دو رینگ متوالی نیروهای ساختاری بالاتری ازجمله گشتاور خمشی و نیروهای قائم و جابجایی کمتر پوشش را به دنبال دارد.
- حداکثر اختلاف در گشتاور خمشی مثبت، گشتاور خمشی منفی ، نیروهای قائم و طولی و جابجایی‌های قائم تعیین‌شده در مدل‌ها، با و بدون در نظر گرفتن اثر جفت‌شدگی ، به ترتیب ۳۹/۹، ۲۵ ، ۲۵/۴، ۲۷/۴ و ۱۸/۴ درصد بودند.

الیارکاوسیان در سال ۹۱ اثر درزه‌داری پوشش در میزان جابجایی پوشش تونل را بررسی کرد. در این تحقیق سیستم نگه‌داری توسط نرم‌افزار FLAC3D شبیه‌سازی شد و نتایج حاصله با نتایج حاصل از شبیه‌سازی سیستم نگه‌داری به‌صورت یک پوسته‌ی استوانه‌ای مقایسه و ارزیابی شد. ماکزیمم جابجایی حاصل از بررسی رینگ‌ها (با استفاده از المان سطح مشترک) همراه با در نظر گرفتن درزه‌ها ۸ میلی‌متر بود که با نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های برجا هماهنگی بیشتری داشت.

۲-۱۱ مطالعات صورت گرفته درزمینه تاثیر دوغاب بر پوشش بتنی تونل

کاسپر در سال ۲۰۰۶ تاثیر خصوصیات خاک، دوغاب و عمق پوشش را در تونل سازی سپری بررسی کرد و به این نتیجه رسید که هیدراتاسیون سریع مواد دوغاب منجر به کاهش اندک نشست سطحی در مقایسه با هیدراتاسیون کندتر می‌شود و با هیدراتاسیون سریع‌تر بزرگ‌ترین ماکزیمم گشتاور خمشی نهایی در پوشش به وجود می‌آید. آقای کاسپر همچنین در همان سال مطالعه‌ای دیگر بر روی تاثیر فشار جبهه کار، فشار تزریق و طراحیTBM در تونل سازی در زمین نرم انجام داد و به این نتیجه رسید این عوامل بر روی نشست سطحی تاثیر گذار هستند.

یانگ یون در سال ۲۰۱۴ تاثیر پارامترهای مخلوط دوغاب بر شکاف حلقوی دوغاب در تونل سازی مکانیزه بررسی کرد و سفتی مخلوط نیمه کشته با بالاترین مقدار پودر سنگ‌آهک ۶ درصد سخت‌تر از مخلوط نیمه کشته با خاکستر بود و همچنین با افزایش مقدار پودر سنگ‌آهک سطح ویژه افزایش می‌یابد و مقدار آب قابل پالایش حدود ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

۲-۱۲ جمع بندی فصل

در این فصل ابتدا تاریخچه‌ای از اولین استفاده از قطعات بتنی پیش‌ساخته در جهان اشاره‌شده، سپس انواع قطعات بتنی پیش‌ساخته و اشکال آن‌ها بیان‌شده، در ادامه به مراحل طراحی پوشش بتنی پرداخته‌شده و در آخر نیز تاریخچه‌ای از کارهای دوبعدی و سه‌بعدی انجام‌شده در این زمینه از سال ۱۹۷۵ تاکنون آورده شده است.

فصل سوم

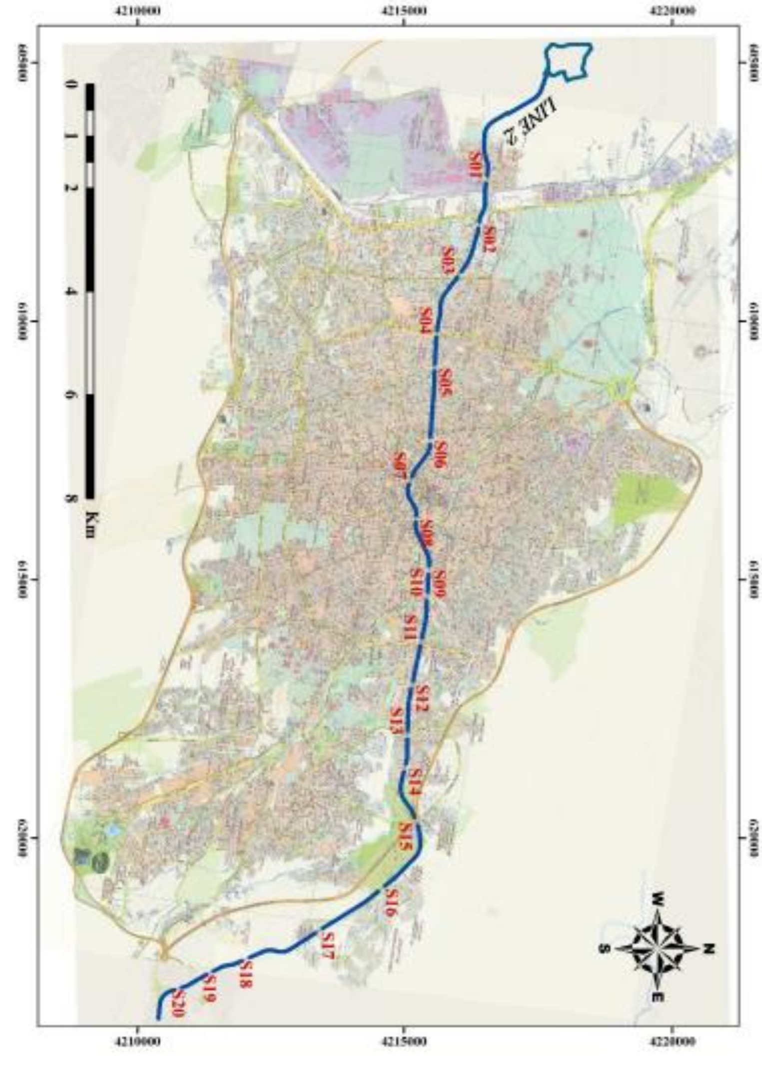
زمین شناسی منطقه و معرفی پروژه قطار شهری تبریز

۳-۱ مقدمه

نخستین متروی جهان در سال ۱۸۶۳ میلادی در لندن آغاز به کارکرد. شهرهای پاریس، بوداپست، استانبول و گلاسکو پس‌ازآن به سیستم مترو مجهز شدند. استفاده از فناوری مترو در اواخر قرن ۱۹ و اوایل قرن ۲۰ میلادی به‌سرعت در شهرهای بزرگ اروپا و آمریکا گسترش پیدا کرد. در حال حاضر ۱۶۰ شهر جهان دارای سیستم مترو هستند و در ۲۵ شهر دیگر مترو در دست احداث است. شهرهای توکیو، مسکو و سئول دارای پراستفاده‌ترین متروهای جهان هستند. سابقه بحث و گفتگو درباره احداث قطار شهری در ایران و شهر تهران نیز به ۱۱۰ سال قبل بازمی‌گردد. تأسیس تراموای شهری ازجمله نکات پیش‌بینی‌شده در امتیازنامه‌ای بود که بارون ژولیوس دورویتر در زمان صدارت ناصرالدین‌شاه، روی کاغذ آمد. در همین سال‌ها یک خط آهن روزمینی بین دروازه شهری ری (حضرت عبدالعظیم) و میدان باغ شاه، با نام معروف ماشین دودی، ساخته شد. در حال حاضر مترو در کلان‌شهرهای تهران، کرج، مشهد، شیراز، تبریز، اصفهان و اهواز در دست‌ساخت یا بهره‌برداری است.

سازمان قطار شهری تبریز در سال ۱۳۸۰ خورشیدی تأسیس و راه‌اندازی شده است و مطالعات ساخت مترو در این شهر نیز از همان زمان آغازشده بود. متروی تبریز از پنج‌خط (شامل چهار خط اصلی و یک خط حومه) تشکیل‌شده است که جمعاً به طول ۸۰ کیلومتر بوده و بعد از تهران و کرج دارای بیشترین خطوط در بین کلان‌شهرهای کشور است. همانند سایر پروژه‌های عمرانی می‌بایست قبل از حفر و احداث تونل یا سازه‌های وابسته به مترو، منطقه موردنظر مطالعه گردد تا مناسب‌ترین مسیر برگزیده شود. واضح است که این مطالعات زمان‌بر و هزینه‌بر است، اما بدون انجام آن ممکن است اشکالات اساسی در ضمن احداث تونل بروز کند. این مشکلات ممکن است به‌صورت افزایش هزینه‌ها، افزایش زمان پیش‌بینی‌شده و حتی تغییر مسیر خودنمایی کند. یکی از مهم‌ترین مطالعات قطار شهری مطالعات ژئوتکنیک است که نتایج آن در طراحی و نحوه اجرای مسیر تونل بسیار مهم و ضروری است. خط ۲ قطار شهری از اراضی غرب منطقه قراملک (حوالی کارخانه کودسازی) به مختصات x=۶۰۵۰۳۴ و y=۴۲۱۷۷۲۵ برحسب UTM شروع‌شده و پس از عبور قراملک و قره‌آغاج به قسمت‌های میانی شهر

در ناحیه بازار می‌رسد. این خط در ادامه بعد از عبور از میدان دانشسرا و زیر رودخانه مهران‌رود به خیابان عباسی و میدان شهید فهمیده می‌رسد. از میدان شهید فهمیده به سمت شهرک باغمیشه ادامه یافته و با تغییر مسیر به سمت جنوب‌شرقی درنهایت در جاده تهران و مقابل نمایشگاه بین‌المللی تبریز به مختصات x=۶۲۳۳۲۹ و y=۴۲۱۰۴۲۳ خاتمه می‌یابد. در شکل(۳-۱) مسیر خط ۲ مترو تبریز نشان داده‌شده است. این مسیر از ابتدای خط تا شهرک باغمیشه نسبتاً هموار بوده و سپس به سمت شرق حالت تپه ماهوری داشته و توپوگرافی این بخش با پستی‌وبلندی‌های زیادی همراه باشد. در بخش شرقی اختلاف ارتفاع پست‌ترین و بلندترین نقطه در طول مسیر حدود ۱۴۰ متر است.



شکل ۳–۱ : مسیر خط ۲ قطار شهری تبریز(شرکت مهندسین مشاور ایمن‌سازان۱۳۹۵)

۲-۳ زمین‌شناسی عمومی منطقه

شهر تبریز در مختصات جغرافیائی ۵۰-۴۵ تا ۴۶-۳۶ طول شرقی و ۴۲-۳۷ تا ۲۹-۳۸ عرض شمالی واقع‌شده است. مساحت این شهر در حدود ۲۳۷ کیلومترمربع بوده و ارتفاع آن از سطح آب‌های آزاد ۱۳۴۰ متر تا ۱۵۶۰ متر است. این شهر درجلگه وسیع و در بستر ملایم مهران‌رود و دره آجی‌چای قرارگرفته، که این جلگه حدود ۳۰۰ کیلومترمربع وسعت دارد. این شهر از تمام جهات به‌جز غرب و شمال غرب با شیب‌های تند کوه‌های اطراف محدودشده است. به‌طوری‌که از شمال با رشته‌کوه‌های شرقی- غربی عون ابن علی و از جنوب توسط بلندی‌های نه‌چندان مرتفع که جنس آن‌ها از رسوبات آبرفتی سخت شده و کنگلومراست محصورشده است. ارتفاعات شرقی- غربی مذکور باعث شده تا تبریز به‌صورت دشتی کشیده با امتداد شرقی- غربی درآید. شیب کلی دشت و درنتیجه جهت زهکشی عمومی آب‌های سطحی و زیرزمینی به سمت غرب است. واحد لیتولوژیکی که شهر بر روی آن بناشده است عبارت‌اند از واحد ماسه‌سنگ قرمز و مارن در شمال و شمال‌شرقی تبریز، واحد مارن‌های سبز خاکستری در قسمت‌های شرقی شهر، واحد نهشته‌های دانه‌ریز آواری در قسمت شرق و جنوب‌شرقی، واحد کنگلومرای نیمه‌سخت در قسمت‌هایی از مناطق جنوبی شهر، پادگانه‌های آبرفتی جوان و پشته‌های آبرفتی در قسمت‌هایی از شمال غرب و غرب و جنوب تا مرکز آبرفت‌های عهد حاضر محدوده این ناحیه به‌صورت رگه باریکی از شرق شهر شروع و از مرکز به‌طرف شمال‌غربی شهر ادامه پیدا می‌کند.

بخش وسیعی از سطح جلگه تبریز به‌وسیله آبرفت‌های جدید پوشانده شده است. به‌علاوه بستر کلیه مجاری فرسایشی اطراف جلگه نیز پوشیده از این نهشته‌ها است. این آبرفت‌ها از عناصر درشت و ریز تشکیل یافته که موجبات عبور آب را فراهم می‌سازد.

در برخی مقاطع، این نهشته‌ها متناوباً از توده‌های ماسه‌ای ریزودرشت همراه با سطوحی از آهک‌های نرم کم‌وبیش ماسه‌ای تشکیل یافته است. به سمت غرب جلگه، لایه‌های مارنی که منشأ دریاچه‌ای دارند و در بین آن‌ها آهک‌ها و رس‌ها به‌صورت چینه‌های داخلی مشاهده می‌شوند به‌صورت لایه‌های غیرقابل نفوذ درآمده‌اند. مجموعاً آبرفت‌های جدید در جلگه بر روی تشکیلات میوسن یا پلیوسن قرارگرفته که از

قابلیت نفوذ بالایی نیز برخوردار بوده و ضخامت کلی آن ۱۰۰ تا ۱۲۰ متر است. رسوبات دریاچه‌ای پلیوسن عموماً زیر چینه آبرفت‌های جدید، چاله تبریز را اشغال کرده‌اند. ضخامت این سازند در برخی نقاط بسیار قابل‌ملاحظه است. این رسوبات از مارن و رس‌های خاکستری‌رنگ همراه با ماسه‌های بسیار نرم تشکیل یافته است. این رسوبات از قابلیت نفوذ بسیار ضعیفی برخوردار بوده و یکی از موانع عمده استخراج آب سفره‌های عمیق محسوب می‌گردند. در شکل(۳-۲) مسیر خط دو قطار شهری تبریز بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه نشان داده‌شده است. (شرکت مهندسین مشاور ایمن‌سازان۱۳۹۵)

شکل ۳–۲ : مسیر خط دو قطار شهری تبریز بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰منطقه(شرکت مهندسین مشاور ایمن‌سازان۱۳۹۵)

۳-۳ بررسی ساختاری مسیر

به‌طورکلی شهر تبریز بر روی رسوبات دوره‌های مختلف سوم و چهارم زمین‌شناسی بناشده است این رسوبات شامل سنگ‌رس، ماسه‌سنگ، کنگلومرا، توف، ژیپس و رسوبات آبرفتی از قبیل رس، لای، ماسه، شن و قلوه‌سنگ است. به‌علاوه واریزه‌های کوهپایه‌ای و همچنین لایه‌هایی از خاک ریزه‌های دستی در قسمت‌هایی از شهر دیده می‌شود. در شکل (۳-۳) سازندهای تشکیل‌دهنده محدوده شهر دیده می‌شوند.

شکل ۳-۳ : ستون چینه‌شناسی محدوده شهر تبریز(شرکت مهندسین مشاور ایمن‌سازان۱۳۹۵)

شهر تبریز در زون البرز قرارگرفته است و از رژیم تکتونیکی حاکم بر آن پیروی می‌کند. تشکیل دشت تبریز و رسوب‌گذاری در آن و ایجاد ساخت‌های تکتونیکی که اغلب به‌صورت شکستگی‌ها و گسلش تظاهر پیداکرده است، پیرو همین سیستم است. دشت تبریز از شمال به‌وسیله‌ی کوه‌های عون ابن علی و از جنوب به‌وسیله‌ی ارتفاعات آتش‌نشانی سهند و رسوبات پیروکلاستیک مربوط به سهند احاطه‌شده است. عملکرد معکوس گسل شمال تبریز به سمت شمال باعث افتادگی قسمت جنوبی آن شده است. در اثر این عملکرد، در موازات بخش شمالی شکستگی‌هایی با جابجایی نرمال در جنوب دشت ایجادشده است که حاصل آن‌ها افتادگی امتداد شرقی-غربی است.

۳-۴ نحوه انتخاب مقطع طراحی

با توجه به اطلاعات موجود، کلیه پارامترهای ژئوتکنیکی برای همه گمانه‌های حفاری‌شده در طول مسیر مابین ایستگاه‌ها و در محل ایستگاه‌ها جمع‌آوری گردید و آزمایش‌های محلی و آزمایشگاهی مختص هر گمانه در نظر گرفته شد. پس‌ازآن در هر گمانه بر اساس اینکه خاک درشت‌دانه یا ریزدانه باشد و یا اینکه سنگ باشد پارامترهای ژئوتکنیکی بر اساس عمق مختص هر گمانه موردبررسی قرار گرفت. سپس در گمانه پارامترها و جنس خاک در هر ۵ متر عمق به‌طور جداگانه یادداشت گردید. پس‌ازآن گمانه‌های واقع‌شده مابین دو ایستگاه که ازلحاظ جنس شبیه یکدیگر بوده‌اند به‌عنوان یک مقطع انتخاب گردید. در این صورت دو حالت در نظر گرفته شد.

در حالت اول کلیه پارامترهای واقع‌شده در هر ۵ متر عمق برای تمامی گمانه‌های واقع مابین دو ایستگاه یادداشت و مقطعی به نام مقطع میانگین در نظر گرفته شد که پارامترهای آن شامل میانگین تمامی گمانه‌های واقع‌شده در این قسمت است. در حالت دوم در هر مقطع یک گمانه به‌عنوان مقطع بحرانی همان مقطع موردبررسی قرار گرفت که پارامترهای مقطع بحرانی همان گمانه مورد ارزیابی و استفاده قرار گرفت.

در این حالت در مقطع میانگین و مقطع بحرانی هرکدام که شرایط جنس خاک و پارامترهای آن نامناسب‌تر بوده است انتخاب گردید. سپس گمانه‌های بحرانی به‌دست‌آمده از این روش موردبررسی مجدد قرار گرفت. در این مقاطع نیز درصورتی‌که جنس خاک در عمق‌های ۵ متری و علی‌الخصوص در قسمت سرباره تونل دارای پارامترهای مقاومتی تقریباً یکسان بوده‌اند به‌عنوان مقطع تکراری لحاظ گردیده است. در کل مقاطع بحرانی از دو لحاظ ژئوتکنیکی و سازه‌ای حائز اهمیت هستند.

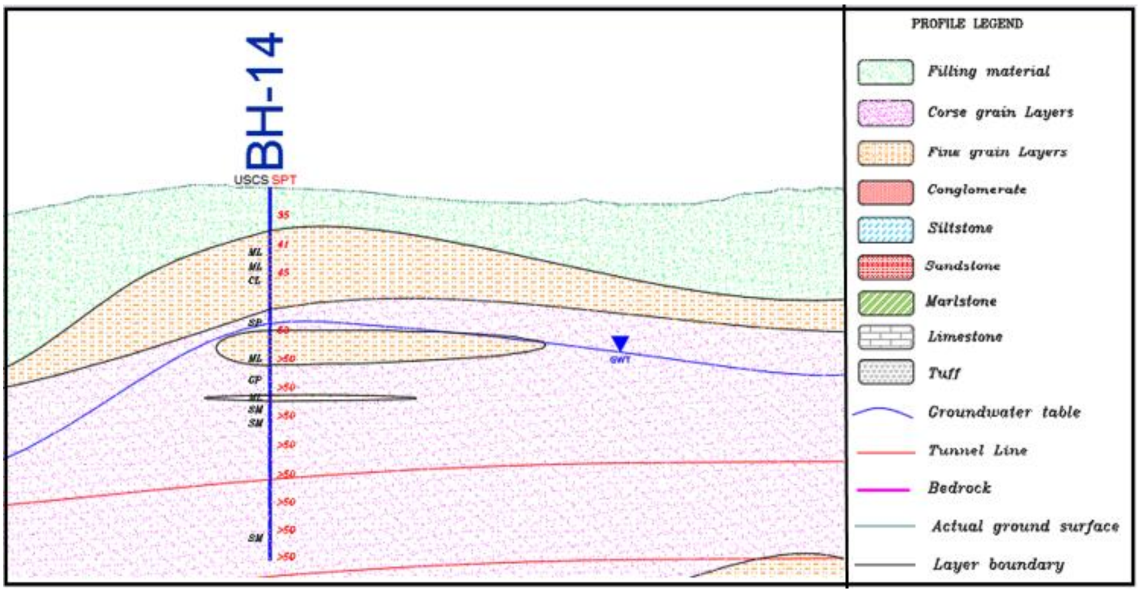
با توجه به اطلاعات بررسی‌شده در طول مسیر ۳ مقطع ازلحاظ ژئوتکنیک و ۲ مقطع ازلحاظ سازه‌ای به‌عنوان مقاطع بحرانی شناسایی شدند. درنهایت در این تحقیق از بین ۵ مقطع بحرانی، مقطع DBH3 مربوط به گمانه BH-14 به‌عنوان مقطع بحرانی ازلحاظ ژئوتکنیک جهت انجام تحلیل‌ها انتخاب گردید. عمق آب زیرزمینی در این ناحیه حدود ۱۰ متر بوده و لایه‌های آبدار تحت‌فشار مشاهده نشده است. در

این تحقیق از تحلیل هیدرودینامیکی آب صرف نظر شده است. پارامترهای انتخاب‌شده به شرح زیر است. (جدول۳-۱)

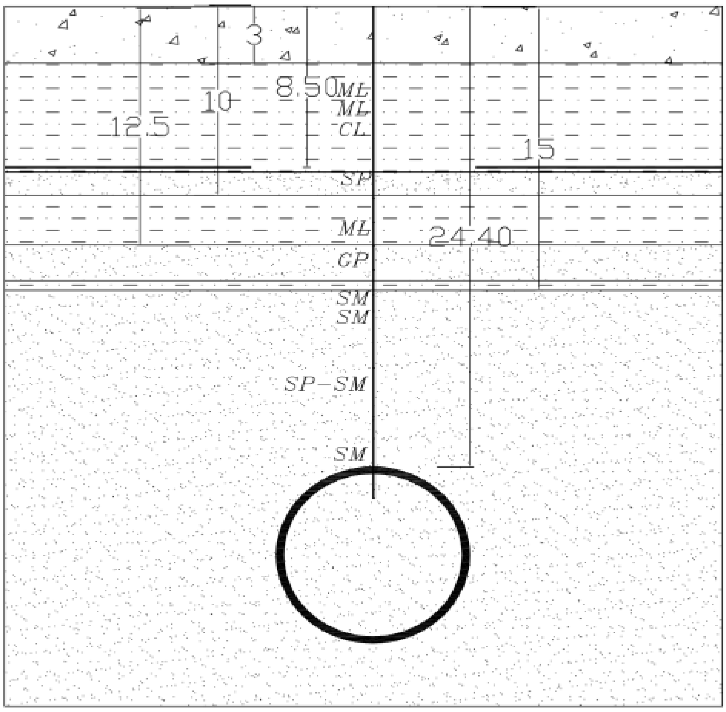
جدول ۳-۱: پارامترهای ژئوتکنیکی مقطع بحرانی(شرکت مهندسین مشاور ایمن‌سازان۱۳۸۹)

خاک	مدول‌الاستیسیته (MPa)	نسبت پواسون	دانسیته (kg/m^3)	چسبندگی (KPa)	زاویه اصطکاک (درجه)
لایه ۱ ۰-۳	۲۰	۰/۳۷	۱۵۶۰	۷	۳۵/۳
لایه ۲ ۳-۸/۵	۲۵	۰/۳۳	۱۶۳۰	۸	۲۹
لایه ۳ ۸/۵-۱۰	۳۰	۰/۳۷	۱۶۶۰	۹	۳۲/۸
لایه ۴ ۱۰-۱۲/۵	۵۰	۰/۳۳	۱۹۸۰	۱۲	۲۷/۴
لایه ۵ ۱۲/۵-۱۴/۵	۵۰	۰/۴	۲۰۱۰	۳	۳۳
لایه ۶ ۱۴/۵-۱۵	۵۰	۰/۳۲	۱۹۸۰	۱۲	۲۷/۲
لایه ۷ ۱۵-۷۰	۵۰	۰/۳۵	۱۹۰۰	۶	۳۳

همچنین مقطع بحرانی و موقعیت قرارگیری تونل در مقطع بحرانی در شکل (۳-۴) و (۳-۵) نشان داده‌شده است.



شکل ۳–۴ : مقطع بحرانی(شرکت مهندسین مشاور ایمن‌سازان۱۳۹۵)



شکل ۳–۵ : موقعیت تونل در مقطع بحرانی(شرکت مهندسین مشاور ایمن‌سازان۱۳۸۹)

۳-۵ جمع بندی فصل

در این فصل ابتدا به معرفی قطار شهری تبریز پرداخته سپس زمین‌شناسی عمومی منطقه موردمطالعه قرارگرفته است و در آخر نیز نحوه انتخاب مقطع طراحی نهایی از بین ۵ مقطع بحرانی موجود در مسیر تونل به‌طور کامل توضیح داده‌شده است.

فصل چهارم

مدل سازی عددی

۴-۱ مقدمه

روش‌های عددی، فراگیرترین روش‌های محاسباتی در علوم مهندسی می‌باشند. اساس این روش‌ها، تبدیل یک محیط با بی‌نهایت درجه آزادی به محیطی با تعداد درجه آزادی محدود است. در سال‌های اخیر به‌منظور طراحی تونل‌ها، بیشتر از تحلیل‌های عددی استفاده‌شده است. معمولاً به دلایل زیر، روش‌های عددی بر سایر روش‌ها برتری دارند.

- با روش‌های عددی می‌توان هر تونلی، با هر شکل سطح مقطع را تحلیل کرد.
- با روش‌های عددی می‌توان روند حفاری و سایر عملیات تونل سازی را در نظر گرفت.
- با روش‌های عددی می‌توان تنش و جابجایی را به‌راحتی در تمام نقاط سیستم و در هر زمان به دست آورد.
- با روش‌های عددی می‌توان مدل‌های پیچیده و دارای چندین مرحله حفاری را به‌سرعت ساخته و حل کرد.
- با روش‌های عددی می‌توان مواد با خصوصیات مختلف و سیستم‌های نگهداری متفاوت را مدل کرد.

یکی از ابزارهای قدرتمند آنالیز تنش، روش الاستو پلاستیک اجزا محدود یا تفاضل محدود است. در دهه‌های اخیر از این روش‌ها به‌صورت گسترده‌ای استفاده‌شده است. با استفاده از المان‌های تیر و پوسته-ای می‌توان شاتکریت، لایه‌های بتنی و قاب فولادی را مدل کرد.

امروزه تقریباً تمامی پروژه‌های عمرانی و معدنی موردنیاز به اجرا، جهت پیش‌بینی رفتار زمین، به مدل‌سازی عددی احتیاج دارند و با توجه به برنامه‌های متنوع آنالیز عددی، محدودیتی جهت مدل‌سازی وجود ندارد. اخیراً دورنمای مدل‌سازی عددی در تونل‌ها تغییرات چشمگیری پیداکرده است. درگذشته به‌طورکلی مدل‌سازی عددی ناقص بوده، ولی امروزه بر روی محاسبات عددی و تکنیک‌های پیشرفته عددی تاکید می‌شود. امروزه در بازار، نرم‌افزارهای عددی به‌صورت تجاری وجود دارند و تنها مشکل

اساسی شناخت برنامه و استفاده صحیح از آن‌ها با توجه به نوع پروژه است.

۴-۲ روش‌های عددی

روش‌های عددی به دودسته روش‌های محیط پیوسته و ناپیوسته تقسیم می‌شوند. در دسته اول، زمین به‌عنوان محیطی پیوسته و عاری از هرگونه ناپیوستگی در نظر گرفته می‌شود ولی درروش دوم، اثرات ناپیوستگی‌ها و درزه‌ها به‌طور مستقیم اعمال می‌شود. مدل‌های محیط پیوسته به روش‌های تفاضل محدود (FDM)، المان محدود (FEM) ، روش المان مرزی (BEM) و محیط ناپیوسته به روش المان مجزا (DEM) اطلاق می‌گردد. ازآنجایی‌که در این روش‌ها، عملیات طراحی بر مبنای محاسبات دقیق ریاضی انجام می‌گیرد، دقت قابل‌ملاحظه‌ای بر نتایج حاکم است. ویژگی منحصربه‌فرد هر روش، عامل اصلی انتخاب روش عددی متناسب با آن است تا بتوان بدین‌وسیله به تحلیلی بهینه و معقول دست‌یافت (Duddeck 1991).

۴-۳ انتخاب روش عددی مناسب

در بسیاری از مسائل چندین روش و نرم‌افزار متناظر ممکن است برای تحلیل، مناسب تشخیص داده شود. تصمیم‌گیری در مورد انتخاب بین آن‌ها معمولاً بر اساس میزان تجربه و آشنایی طراح با روش‌های عددی و نرم‌افزار است.

انتخاب روش پیوسته یا ناپیوسته به بسیاری از فاکتورهای خاص مسئله وابسته است، اما معمولاً بر اساس مقیاس مسئله و هندسه سیستم درزها و ناپیوستگی‌ها و فاصله‌داری آن‌ها تعیین می‌شود. روش پیوسته برای توده سنگ بدون درزه و شکستگی یا با تعداد درزهای بسیار زیاد (در نظر گرفتن محیط و خواص معادل) به کار می‌رود. روش‌های ناپیوسته برای توده سنگ‌های درزه‌دار قابل‌استفاده است.

۴-۴ روش تفاضل محدود

این روش در مسائل مختلف مهندسی کاربرد زیادی دارد. ازآنجاکه با این روش می‌توان تغییر مکان‌ها و کرنش‌های بزرگ توده سنگ را مدل‌سازی کرد، لذا کاربرد آن در مهندسی مکانیک سنگ و تونل

سازی عمومیت دارد. درروش تفاضل محدود، توده مورد مطالعه را به تعدادی منطقه چهارگوش تقسیم می‌کنند. با توجه به معادلات حرکت، در مورد هر قلمرو معین معادلات نوشته می‌شود. در مرحله بعد بخشی از توده سنگ در نقاطی مرسوم به گره، از سایر مناطق مجزا شده و سپس معادلات حرکت گره‌ها برای تمام مناطق نوشته می‌شود. تئوری واگرایی گوس مبنای روش محاسبه نیروهای گره‌ها را تشکیل می‌دهد. (ITASCA consulting Group, 1993-2002)

۴-۵ معرفی نرم‌افزار Flac3d

نرم‌افزار Flac3D یک برنامه تفاضل محدود است که توسط شرکت آیتسکا و بر اساس محاسبات لاگرانژی توسعه‌یافته است. در این نرم‌افزار برای تحلیل تنش و تغییرمکان، مواد به‌صورت شبکه‌های سه‌بعدی که از المان‌های چندوجهی تشکیل‌شده‌اند، تعریف می‌شوند. هر المان مطابق با یک قانون تنش کرنش خطی و یا غیرخطی و در واکنش به نیروهای وارده یا شرایط مرزی رفتار می‌کند. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی محیط پیوسته توسعه‌یافته است ولی می‌توان تعداد محدودی از سطوح ناپیوستگی و یا سطوح لغزش را نیز مدل‌سازی کرد. سطح ناپیوستگی، سطحی است که امکان لغزش یا جداشدگی بر روی آن وجود دارد. از مزایای اصلی این نرم‌افزار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- این نرم‌افزار می‌تواند به‌خوبی رفتار سازه‌های ساخته‌شده در خاک و سنگ را تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی شبیه‌سازی کند.
- فرمولاسیون این نرم‌افزار به‌گونه‌ای است که می‌تواند جابجایی‌ها و کرنش‌های بزرگ و رفتار غیرخطی مواد را حتی در حالتی که تسلیم یا شکست در ناحیه بزرگی نیز رخ دهد و یا گسیختگی کامل رخ دهد، به‌خوبی مدل کند.
- وجود مدل‌های رفتاری متنوع الاستیک و پلاستیک ازجمله معیار شکست موهر کولمب، دراکر پراگر و هوک - براون، نرم شوندگی و سخت‌شوندگی و غیره.
- امکان استفاده از ماژول‌های اختیاری متنوعی مانند تحلیل حرارتی و خزش، قابلیت تجزیه‌وتحلیل دینامیکی و مدل جریان سیال دوفازی بسته به الزامات طراحی.

- امکان توسعه روابط و مدل‌های جدید رفتاری با استفاده از کد نویسی مخصوص نرم‌افزار که تحت عنوان فیش(FISH) شناخته می‌شود.
- امکان مدل‌سازی المان‌های سازه‌ای مورداستفاده در پروژه‌ها مانند شمع‌ها، پیچ سنگ‌ها، شاتکریت، قاب فولادی، ژئوگرید و غیره.
- دارا بودن رابط گرافیکی قوی.

۴-۶ مدل‌سازی عددی محدوده موردمطالعه

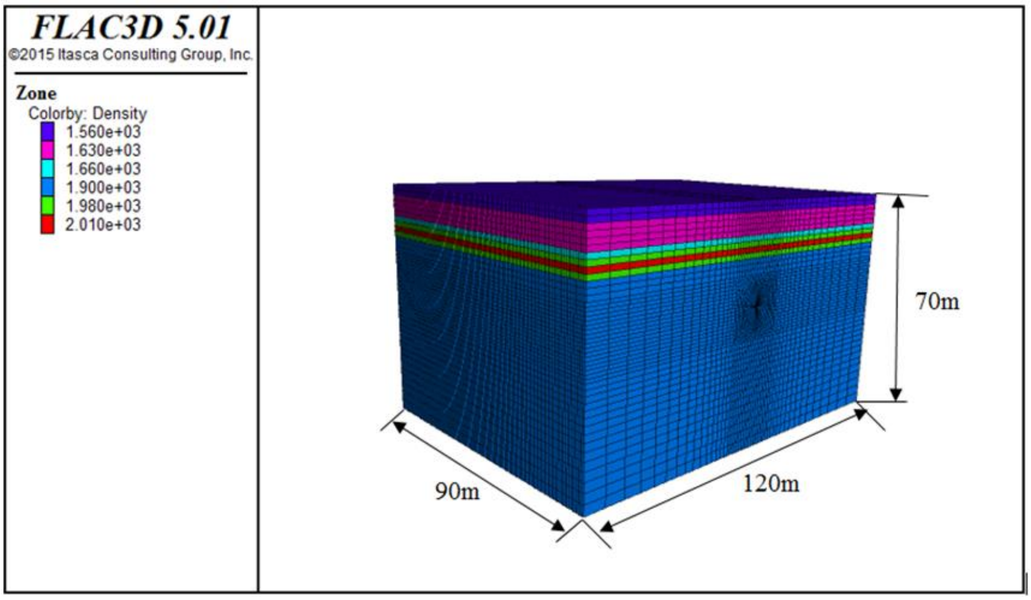
۴-۶-۱ هندسه کلی مدل

در حل یک مسئله، اولین قدم انتخاب هندسه مسئله است که باید دربرگیرنده محدوده موردمطالعه و عوامل هندسی تأثیرگذار در رفتار محیط باشد. هندسه مدل باید بیانگر فیزیک مسئله بوده و به‌اندازه کافی گسترده باشد تا بتوان به کمک آن مکانیزم حاکم بر رفتار مسئله و همچنین گسترش ساختارهای زمین‌شناسی در منطقه موردبررسی را پوشش داد. مدل باید به‌اندازه‌ای بزرگ باشد که مرزهای آن خارج از محدوده تاثیر فعالیت‌های مهندسی قرار گیرد.

ایده اولیه در این زمینه مربوط به حل دقیق ریاضی در محیط‌های الاستیک (روابط تحلیلی) است که حداقل زون تاثیر یک حفره زیرزمینی تا سه برابر قطر آن برآورد شده است. بدین ترتیب درصورتی‌که توده سنگ به‌صورت الاستیک رفتار نماید در فاصله سه برابر قطر، تنش‌ها تا حدودی به وضعیت اولیه خود می‌رسند. نتایج حاصل از سه مدل با شرایط متفاوت به این صورت بوده است که درصورتی‌که ابعاد مدل حدود ۱۰ برابر ابعاد تونل باشد تحت شرایط مرزی متفاوت درصد خطاها به حداقل ممکن کاهش خواهد یافت(کرمی،م ۱۳۸۶). ابعاد مدل تفاضل محدود ساخته‌شده بر اساس محدودیت‌های به‌دست‌آمده از مطالعات لامروگینی[۱] و همکاران در سال ۲۰۱۲، بر اساس قطر و عمق تونل انتخاب‌شده است. بر این اساس طول، عرض و ارتفاع به ترتیب۹۰ ،۱۲۰و ۷۰ متر در نظر گرفته شد (شکل ۴-۱). پس از نهایی

[۱] lamrugini

شدن شکل و ابعاد مدل، تعداد نهایی زون‌ها به ۲۸۶۵۶۰ زون رسید.



شکل ۴–۱: هندسه و ابعاد مدل

۴-۶-۲ انتخاب مدل رفتاری

هر مسئله باید در ابتدا با ساده‌ترین مدل‌های رفتاری مورد تحلیل قرار گیرد. در بیشتر حالت‌ها مدل رفتاری الاستیک یا در موارد پیچیده‌تر استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب توصیه می‌شود. یکی از نکات مهم در انتخاب مدل رفتاری، میزان سطح تنش وارده در مواد موردبررسی است. در پروژه‌هایی که سطح تنش وارده خیلی کمتر از مقاومت توده سنگ است، مثلاً درشیب‌های کوتاه و تونل‌های کم‌عمق در محیط‌های سنگی، تفاوت چندانی بین پیش‌بینی مدل‌های رفتاری مختلف نخواهد بود، بنابراین استفاده از مدل‌های ساده الاستیک و الاستو پلاستیک دقت مناسبی خواهند داشت.

در حفریات زیرزمینی به دلیل افزایش سطح تنش وارده به‌ویژه در مناطق با تمرکز تنش بالا مانند محل تقاطع‌ها، لنگه‌های معدنی و کارگاه‌های جبهه کار بلند ممکن است به توده سنگ تنشی بیش از مقاومت حداکثر وارد شود، بنابراین استفاده از مدل‌های رفتاری کرنش نرم شوندگی توصیه می‌شود. اما در حفریات متداول مانند تونل‌ها و چاه‌ها استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب نیز جواب‌های نسبتاً مناسبی ارائه می‌کند (ضابطه شماره ۶۵۶، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور).

لایه‌های خاک شناسایی‌شده در عمق موردمطالعه و مشخصات اختصاص‌یافته به این لایه‌ها در فصل ۳ آورده شده است. همچنین عمق آب زیرزمینی در این ناحیه حدود ۱۰ متر بوده و لایه‌های آبدار تحت‌فشار مشاهده نشده است.

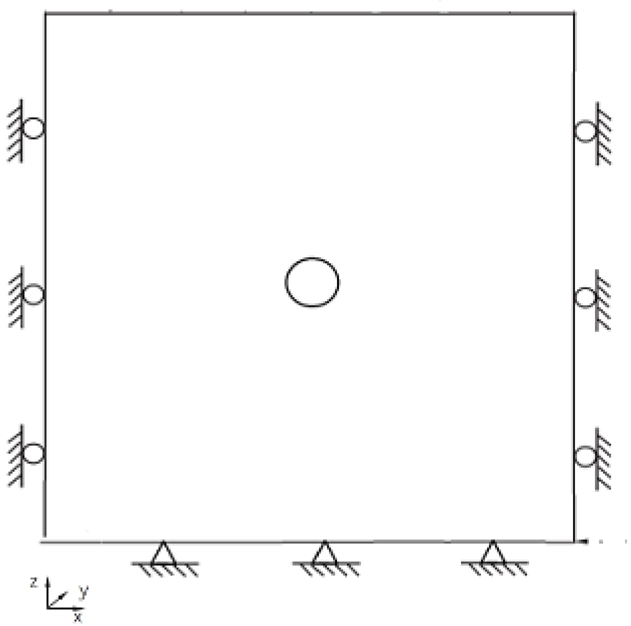
۴-۶-۳ تعیین شرایط اولیه و مرزی حاکم بر منطقه

در اکثر پروژه‌های مهندسی معدن یا عمران، قبل از حفر و ایجاد سازه تنش‌های برجا در عمق زمین وجود دارند. با اعمال شرایط اولیه سعی می‌شود تنش‌های برجای موجود در زمین قبل از حفاری شبیه-سازی گردد. زیرا اگر این عمل انجام نشود، ممکن است در صحت نتایج به‌دست‌آمده تاثیر منفی بگذارد. در حالت ایده آل اطلاعات در مورد این‌گونه تنش‌ها از اندازه‌گیری صحرایی به دست می‌آید. ولی وقتی اندازه‌گیری صحرایی مقدور نیست می‌توان با استفاده از عمق سازه و پارامترهای ژئوتکنیکی زمین تنش‌ها را تخمین زده و اقدام به اجرای برنامه کرد. در لایه‌های یکنواخت با سطح آزاد، تنش‌های قائم معمولاً برابر با ρgh ، که g شتاب ثقل، ρ چگالی مواد و h عمق نقطه موردنظر است.

تخمین تنش‌های افقی برجا بسیار مشکل است. بر اساس تئوری الاستیسیته نسبت بین تنش افقی و قائم در محیط‌های سنگی به‌صورت $\frac{\nu}{1-\nu}$ بیان می‌شود که در آن ν همان نسبت پواسون است. این فرمول از این فرض ناشی می‌شود که وزن به‌صورت ناگهانی به جرم اجسام الاستیک وارد می‌شود، به صورتی که امکان جابجایی جانبی ندارد. این حالت به دلایلی از قبیل: جابجایی تکتونیکی متناوب، شکست مواد و برداشتن روباره و تنش‌های محصورشده حاصل از چین‌خوردگی و شرایط موضعی، به‌ندرت در عمل پیش می‌آید. البته اگر درباره تاریخچه منطقه اطلاعات کافی موجود باشد، می‌توان آن را شبیه-سازی کرده و شرایط اولیه را برای طرح مهندسی موردنظر، ایجاد کرد. در حالت کلی تنش‌هایی در شبکه اعمال می‌شود و سپس نرم‌افزار تا حد تعادل اجرا می‌شود(ITASCA consulting Group, 1993-2002).
در تحقیق حاضر تنش‌های قائم به‌صورت ثقلی و نسبت تنش‌های افقی به قائم با توجه به جنس محیط برابر با ضریب فشار خاک در حالت سکون $k_0=1-\sin\varphi$ در نظر گرفته‌شده است. در تمامی مدل‌های

عددی باید شرایط مرزی را به‌گونه‌ای تعیین کرد که با شرایط واقعی زمین قبل از حفر تونل یکسان باشد. بدین منظور نسبت تنش افقی به قائم (k) را باید در مدل در نظر گرفت. جهت اعمال شرایط مرزی واقعی، مرز مدل در نقاط مرزی باید ثابت شوند. بدین منظور می‌توان جابجایی در جهت افقی نقاط انتهایی چپ و راست و همچنین جابجایی در جهت قائم نقاط کف مدل را صفر در نظر گرفت.

مرزها مطابق شکل (۴-۲) با شرایط تکیه‌گاهی غلتکی و مفصلی مقید شده‌اند.

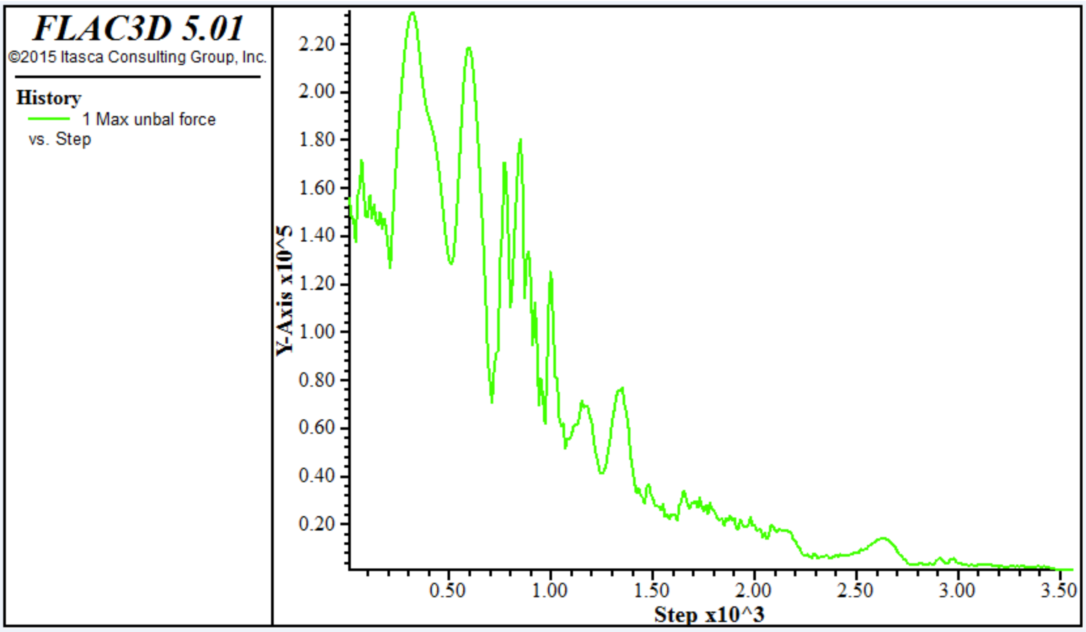


شکل ۴–۲ : شرایط مرزی مترو تبریز در نرم افزار Flac3d

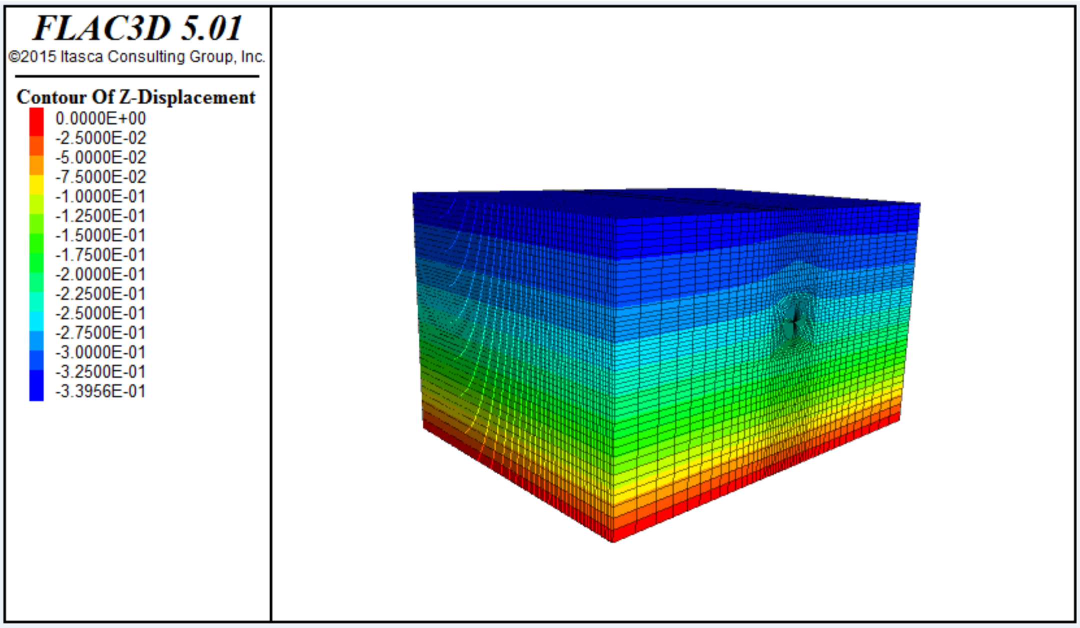
۴-۶-۴ حل مدل تا رسیدن به تعادل قبل از حفاری

در این قسمت با الگو گرفتن ازآنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد، سعی می‌شود تا شرایط مدل هر چه بیشتر با واقعیت تطبیق داشته باشد. واقعیت این است که قبل از حفر تونل زمین در تعادل است و حفر تونل باعث به وجود آمدن یک سری از اغتشاشات در وضعیت تنش‌ها و جابجایی‌ها خواهد شد. در این مرحله لازم است مدل (قبل از حفر تونل) حل شود تا تنش‌های اولیه ایجاد شوند. اما قبل از ایجاد حفره لازم است جابجایی‌ها صفر شوند تا شرایط واقعی قبل از حفر تونل منظور گردد. در شکل (۴-۲) به تعادل رسیدن حداکثر نیروی نامتعادل نشان داده‌شده است. همچنین شکل‌های (۴-۳) و (۴-۴) شرایط

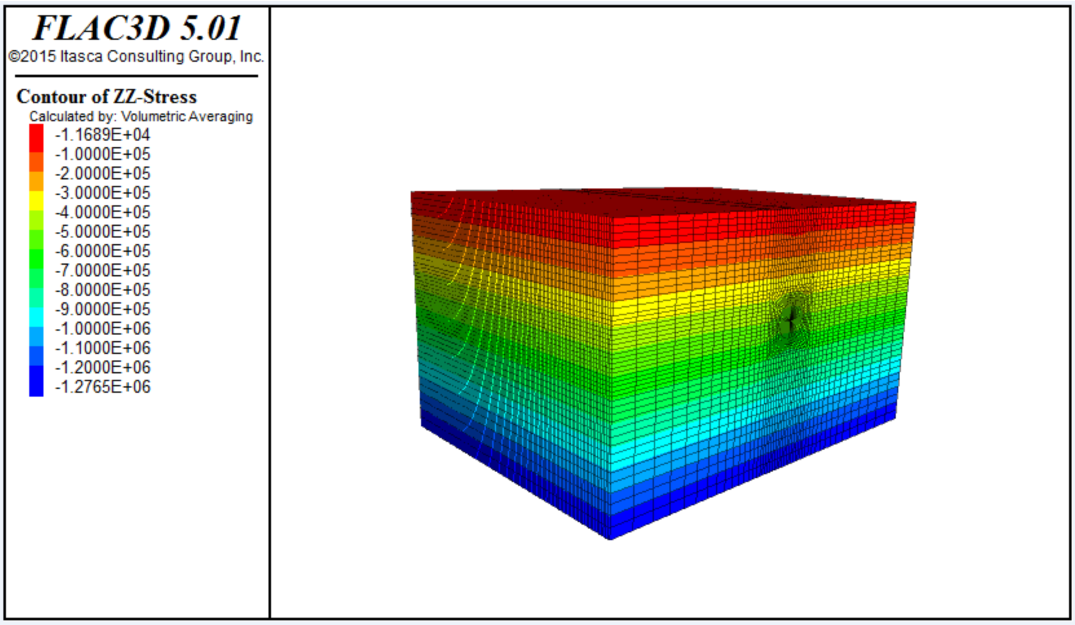
جابجایی و تنش بعد از به تعادل رسیدن مدل را نشان می‌دهند.



شکل ۴–۳ : نمودار مربوط به حداکثر نیروی نامتعادل



شکل ۴–۴ : جابجایی قائم در مدل عددی بعد از رسیدن به تعادل



شکل ۴–۵ : تنش قائم در مدل عددی بعد از رسیدن به تعادل

در ضمن با توجه به نبود ابزار دقیق در مترو تبریز مقادیر جابجایی حاصل از نرم افزار با مقادیری که از رابطه کرش به دست آمد مقایسه شد که این مقادیر با هم همخوانی داشتند.

۴-۶-۵ مدل‌سازی سپر ماشین

سپر ماشین حفار با استفاده از المان‌های پوسته‌ای[۱] با رفتار الاستیک خطی مدل شده است. به‌منظور ساده‌سازی هندسه مدل، سپر مخروطی شکل به‌صورت یک استوانه با قطر ثابت و برابر با قطر متوسط قطر سپر جلویی و انتهایی دستگاه جایگزین شده است. مشخصات اختصاص‌یافته برای المان سپر در جدول(۴-۱) درج‌شده است. قطر حفاری و قطر خارجی سپر تونل خط ۲ متروی تبریز ۹/۵ متر در نظر گرفته‌شده است.

جدول ۴-۱: مشخصات سپر استفاده‌شده در تحلیل عددی (شرکت مهندسین مشاور ایمن‌سازان۱۳۸۹)

مدول الاستیسیته(GPa)	طول سپر(m)	ضخامت(m)	دانسیته(kg/m^3)	نسبت پواسون
۲۱۰	۹	۰/۱	۷۸۵۰	۰/۱۷

[۱] Shell

۴-۶-۶ مدل‌سازی فشار سینه‌کار و تزریق

تعیین میزان فشار موردنیاز برای تأمین پایداری سینه کار تونل در زمین‌های خاکی که با دستگاه حفاریEPB می‌شوند یکی از مهم‌ترین پارامترها در پیشروی دستگاه است. این پارامتر بخصوص در مواردی که تونل در محیط‌های شهری حفر می‌شود اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. فشار سینه‌کار به‌طورکلی تابعی از عمق و قطر تونل، میزان بار سطحی، تراز آب زیرزمینی، مشخصات مهندسی خاک و تنش موثر است برای تعیین فشار مناسب سینه‌کار(σ_T) روش‌های مختلفی بر مبنای محاسبات تجربی، تحلیلی و عددی گسترش‌یافته است (Guglielmetti,2008).

در این مطالعه با استفاده از روش پیشنهادی مرکز ساخت‌وساز زیرزمینی آلمان (COB) فشار سینه‌کار در تاج تونل محاسبه و با یک گرادیان متناسب با مصالح داخل محفظه حفاری دستگاه افزایش داده می‌شود. درروش پیشنهادی COB مقدار فشار سینه کار از رابطه(۴-۱) تعیین می‌شود :

$$\sigma_T=k_a\sigma'_v-2c\sqrt{k_a}+k_aq+u \qquad \text{(رابطه۴-۱)}$$

که در رابطه فوق σ'_v تنش قائم موثر، c چسبندگی، q میزان سربار سطحی، u فشار منفذی و K_a ضریب فشار جانبی خاک است (Broere,W.2001). میزان فشار تزریق دوغاب پشت سگمنت به‌طورمعمول ۱/۲-۰/۵ بار بیشتر از فشار سینه کار در نظر گرفته می‌شود.(حیدری و زارع ،۱۳۹۱)

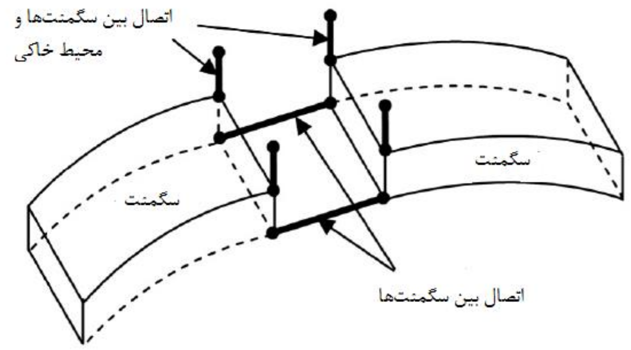
پس از تعیین فشار سینه کار متناظر با شرایط هر مدل در تاج تونل اعمال‌شده و با توجه به وزن دوغاب رو به پایین افزایش می‌یابد. فشار جبهه کار و فشار تزریق مورداستفاده در تحلیل عددی در جدول (۴-۲) ارائه‌شده است.

جدول ۴-۲ : مقادیر فشار جبهه کار و تزریق

فشار سینه‌کار(بار)	فشار تزریق(بار)
۳	۳.۵

۴-۶-۷ مدل‌سازی پوشش سگمنتی و درزهای آن

سگمنت‌های تونل با استفاده از المان‌های خطی[۱] مدل می‌شوند. این نوع المان خطی دونقطه اتصال[۲] بر هر گره ایجاد می‌کند. اولین نقطه اتصال امکان تماس بین پوشش تونل و توده خاک (محیط اطراف) را برقرار می‌کند و دومین نقطه، اتصال سگمنت‌ها به یکدیگر را ممکن می‌سازد. در این لینک‌ها، سگمنت-ها مجازند تا نسبت به یکدیگر حرکت داشته باشند. درز سگمنت با به‌کارگیری اتصالات دو گرهی شبیه‌سازی می‌شود (شکل۴-۵) که شامل ۶ درجه آزادی است که با ۶ فنر نشان داده می‌شود. در این بررسی مشخصات صلبیت اتصال (تماس) درز به‌وسیله یک مجموعه متشکل از فنر[۳] چرخشی (K_{RO})، فنر محوری (K_A) و فنر شعاعی (K_R) که در شکل (۴-۶) نمایش داده شده است.



شکل ۴–۶ : طرح اتصال درز (Do et al,2013)

المان‌های خطی در لبه کناری تونل به سطوح زون‌های اطراف تونل متصل می‌شوند. صلبیت نرمال K_n و صلبیت مماسی K_s ، صد برابر سفت‌ترین زون مجاور لحاظ می‌شود. صلبیت ظاهری یک زون (که به‌صورت تنش بر واحد فاصله بیان می‌شود) در راستای نرمال بر سطح برابر است با:

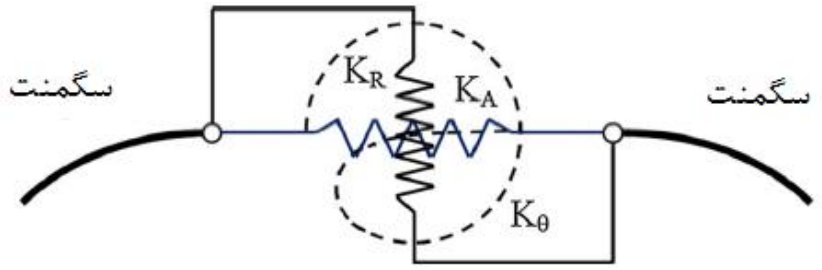
$$\mathrm{Max}\left[\frac{(K+\frac{4}{3}G)}{\Delta Zmin}\right] \qquad \text{(رابطه۴-۲)}$$

که در آن K و G به ترتیب مدول بالک و برشی هستند، Z_{min} کوچک‌ترین بعد یک زون مجاور در

---

[۱] Embedded liner element
[۲] link
[۳] spring

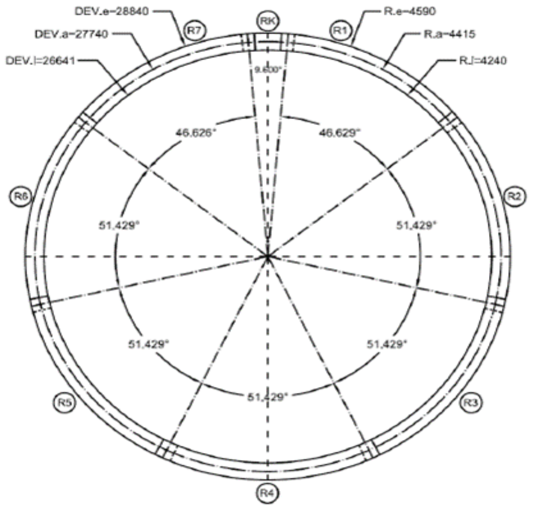
راستای نرمال است.



شکل ۴–۷ : سختی K_A, K_R, K_{RO} در راستای محوری، شعاعی و چرخشی درز (Do et al,2013)

طرح هندسی و چیدمان پوشش سگمنتال خط ۲ مترو تبریز در شکل (۴-۷) نشان داده‌شده است. همچنین مشخصات اصلی سگمنت این خط در جدول(۴-۳) آورده شده است. نوع سگمنت یونیورسال و عرض رینگ یا سگمنت ۱/۵ متر است. برای جلوگیری از ایجاد نقص در آب‌بندی گوشه‌های قطعات اتصالات دایروی دو حلقه مجاور هم در یک راستا قرار نمی‌گیرند.

با در نظر گرفتن شکل مستطیلی برای سگمنت‌ها، دو نوع رینگ را می‌توان طراحی و اجرا نمود: ۱-رینگ عادی ۲-رینگ چپ و راست. در این مدل‌سازی رینگ عادی مدل شده است. در این حالت و در اجرای پوشش بتنی در مسیر مستقیم باید رینگ به‌طور متوالی حول محور تونل در چرخش باشد، لذا سگمنت کلید همواره در موقعیت‌های مختلف در تغییر است. به‌عنوان‌مثال سگمنت کلید می‌تواند در کف یا تاج تونل قرار گیرد.



شکل ۴–۸ : طرح هندسی پوشش سگمنتال پروژه خط ۲ مترو تبریز(شرکت مهندسین مشاور ایمن‌سازان۱۳۸۹)

جدول ۴-۳ : مشخصات پوشش سگمنتی(شرکت مهندسین مشاور ایمن‌سازان۱۳۸۹)

سیستم تحکیم	مدول الاستیسیته (GPa)	ضخامت (m)	دانسیته (Kg/m^3)	نسبت پواسون
پوشش بتنی	۳۰	۰/۳۵	۲۵۰۰	۰/۲

با توجه به مشخصات لاینینگ و شرایط زمین تقریباً مشابه بامطالعه موردی آقای دو، سختی مفاصل مورداستفاده در مدل‌سازی از مقادیر مربوط به مقاله ایشان در سال ۲۰۱۳ استخراج‌شده است. در این مقاله مشخصات مربوط به درزه‌های طولی و محیطی یکسان است که در جدول(۴-۴) ارائه‌شده است.

جدول ۴-۴ : پارامترهای مربوط به درز (Do et al,2013)

درزه‌های طولی و محیطی	مقدار
سختی چرخشی K_{RO} (MN m/rad/m)	۱۰۰
سختی شعاعی K_R (MN/m)	۱۰۵۰
سختی محوری K_A (MN/m)	۵۰۰
حداکثر گشتاور خمشی M_{yield} (kN.m)	۱۵۰
حداکثر نیروی برشی S_{yield} (MN /m)	۰/۵۵

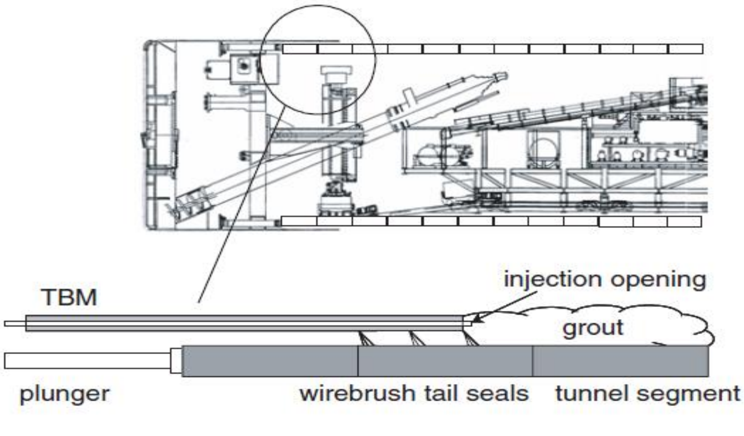
۴-۶-۸ مدل‌سازی دوغاب سخت شده (گروت) پشت سگمنت

در مدل ساخته‌شده از المان حجمی با رفتار الاستیک خطی برای مدل‌سازی گروت پشت سگمنت استفاده‌شده است. با توجه به طرح اختلاط پیشنهادشده برای گروت و آزمایش‌های انجام‌شده، زمان لازم برای گیرش اولیه گروت و درنتیجه حذف فشار ناشی از آن حدود ۸ ساعت برآورد شده که با توجه به میانگین سرعت پیشروی نیم رینگ در ساعت، طول فشار اعمالی در مدل‌سازی‌ها برابر ۴رینگ لحاظ شده است. به‌عبارت‌دیگر بعد از ۴ گام نصب پوشش و اعمال فشار تزریق، مشخصات گروت به حالت سخت شده تغییر داده‌شده و فشار تزریق حذف می‌شود. در جدول (۴-۵) مشخصات در نظر گرفته‌شده برای گروت پشت سگمنت‌ها ارائه‌شده است. ضمنا این مقادیر در همان ساعات اولیه بعد از تزریق دوغاب به دست آمده است.

جدول ۴-۵ : مشخصات دوغاب استفاده‌شده (شرکت مهندسین مشاور ایمن‌سازان۱۳۸۹)

سیستم تحکیم	مدول الاستیسیته(MPa)	ضخامت(m)	دانسیته(kg/m^3)	نسبت پواسون
تزریق	۴۰	۰/۱۵۵	۱۵۰۰	۰/۲۵

همچنین در شکل ۳ نحوه اعمال دوغاب به‌صورت شماتیک نشان داده‌شده است.



شکل ۴–۹: طرح کلی TBM و جزئیات سیستم تزریق (Talmon,2013)

۴-۶-۹ مدل‌سازی فرآیند حفاری تونل

پس از به تعادل رسیدن مدل، جابجایی‌ها و سرعت‌های گره‌ای صفر شده و حفاری تونل اجرا می‌شود. در شروع عملیات تونل سازی مرحله حفاری تونل به طول پیشروی ۹ متر (برابر با طول سپر ماشین) معادل ۶ گام تکرار شده است.

در ادامه و با پیشروی حفاری به‌اندازه یک گام، هم‌زمان در اولین گام حفاری‌شده در ابتدای مدل سپر دستگاه حذف‌شده و هم‌زمان با اعمال فشار تزریق در این گام، اولین پوشش بتنی نصب می‌شود و همان‌طور که گفته شد فشار تزریق بعد از ۴ گام نصب پوشش فشار تزریق حذف‌شده و مشخصات گروت سخت شده اعمال می‌شود. فشار تزریق گروت بر مرزهای حفاری تونل و سطح خارجی پوشش تونل اعمال‌شده و میزان فشار تزریق متناسب با وزن دوغاب به سمت پایین افزایش داده‌شده است.

مراحل مدل‌سازی با حفظ همین فواصل کاری تکرار شده و ادامه می‌یابد. به‌طور خلاصه مراحل حفاری به شکل زیر است:

۱- حفاری تونل به‌اندازه عرض یک رینگ

۲- اعمال هم‌زمان سپر و فشار جبهه کار

۳- تکرار این روند تا کامل شدن طول سپر

۴- حفاری هم‌زمان با مدل‌سازی سپر در قسمت حفرشده و برداشتن 1.5 متر ابتدایی المان سپر و اعمال پوشش بتنی و تزریق دوغاب پشت سگمنت تا انتهای متراژ حفاری.

۴-۷ جمع بندی فصل

در این فصل ابتدا به‌صورت مختصر روش‌های عددی پیوسته و ناپیوسته اشاره‌شده، دلایل انتخاب روش عددی موردنظر و نرم‌افزار مرتبط با آن بیان‌شده، در ادامه مراحل مدل‌سازی که شامل هندسه کلی مدل، انتخاب مدل رفتاری، تعیین شرایط اولیه و مرزی حاکم بر منطقه و غیره به‌طور کامل توضیح داده‌شده است و مقادیر مورداستفاده در نرم‌افزار که از گزارش‌های شرکت مهندسین مشاور استخراج‌شده در جداولی آورده شده است.

فصل پنجم

بررسی تاثیر مشخصات مکانیکی

دوغاب و آرایش درزهای طولی

۵-۱ مقدمه

هدف از مدل‌سازی تونل سازی مکانیزه در نظر گرفتن تعداد زیادی از فرآیندهایی است که در طول حفاری اتفاق می‌افتد مانند فشار جبهه‌کار، اضافه حفاری سپر، مخروطی بودن سپر، فضای حلقوی خالی پشت سپر، تزریق دوغاب در این فضای خالی و فرآیند تثبیت آن، پوشش بتنی تونل، توزیع وزن ماشین تونل‌زنی و دیگر تجهیزات. به‌منظور انجام آنالیز خیلی دقیق، در مدل‌سازی عددی همه‌ی این فرآیندها باید در نظر گرفته شود.

رفتار سازه تونل یک پدیده پیچیده است و رفتار زمین اطراف که به‌عنوان یکی از جنبه‌های اصلی حفاری است باید در نظر گرفته شود. درنتیجه مدل رفتاری زمین برای تخمین نیروهای سازه‌ای ناشی از سازه تونل و جابجایی زمین بسیار مهم است. در این فصل به تاثیر خصوصیات مکانیکی دوغاب سخت شده و آرایش درزهای طولی بین سگمنت‌ها پرداخته خواهد شد.

۵-۲ دوغاب سخت شده

در هنگام تونل سازی توسط روش حفاری مکانیزه سپری و بعد از نصب سیستم نگهداری، بین سطح خارجی نگهداری نصب‌شده و محیط حفاری‌شده یک فضای خالی به وجود می‌آید که می‌بایست جهت جلوگیری از ریزش خاک و سنگ به درون این فضا و ایجاد نشست سطحی در اثر این ریزش، به‌وسیله ماده مناسبی پر شود.

از پر کردن این فضای خالی حلقوی تحت عنوان تزریق تماسی یاد می‌شود که معمولاً با استفاده از دوغاب‌های تهیه‌شده از سیمان، ماسه، آب و ... صورت می‌گیرد. لذا می‌بایست مخلوطی جهت تزریق انتخاب شود که هم دارای قابلیت پمپاژ خوبی باشد و با توجه به شرایط محیط حفاری علاوه بر خاصیت پرکنندگی دارای مقاومت لازم نیز بوده و حتی در شرایط اشباع قدرت آب‌بند کنندگی لازم را جهت جلوگیری از نفوذ آب به درون تونل داشته باشد.

پر کردن مداوم فضای خالی ایجادشده پشت پوشش سگمنتال تونل، از عملیات بسیار مهم حفاری

مکانیزه بوده که هدف اصلی آن به حداقل رساندن نشست در سطح زمین است. علاوه بر آن دوغاب عامل ایجاد بستر مناسب برای پوشش سگمنت تونل و کمک به آب‌بندی است.

به‌طور خلاصه اهداف تزریق دوغاب پشت سگمنت را می‌توان به موارد زیر خلاصه نمود:

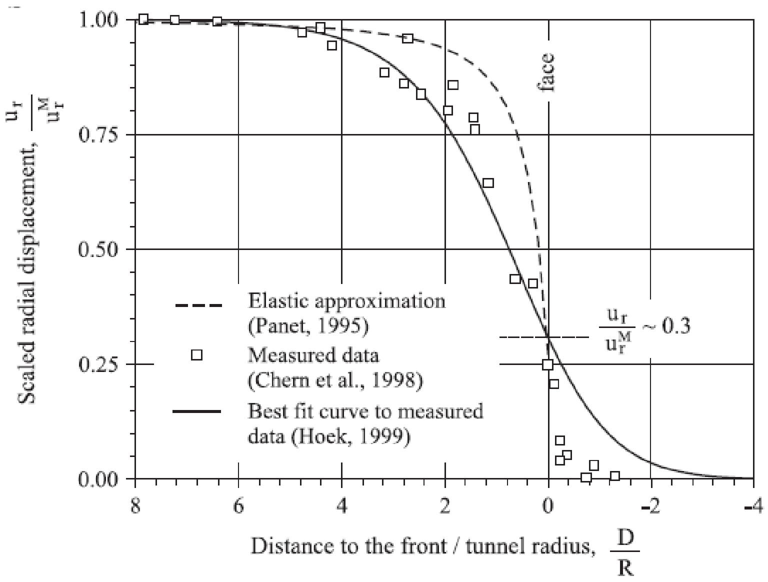
- جلوگیری و یا به حداقل رساندن نشست در سطح زمین
- قفل‌کردن سگمنت در محل خود و جلوگیری از حرکت سگمنت که به دلیل وزن خود سگمنت و نیروی فشاری ایجادشده توسط سپر به وجود می‌آید
- تحمل کردن بارهای انتقال داده‌شده توسط دنباله‌ی سپر
- مطمئن ساختن تماس یکنواخت و همگن مابین زمین و سگمنت
- ایجاد یک‌لایه‌ی نازک نفوذناپذیر جهت جلوگیری از ورود آب.

یکی از جنبه‌های مهمی که باید در مدل‌سازی عددی سه‌بعدی در نظر گرفته شود شرایط اولیه است. به‌منظور اطمینان از این‌که مدل‌سازی عددی نزدیک به فرآیند تونل سازی واقعی است باید شرایط مناسب اولیه در نظر گرفته شود و همچنین تاثیر شرایط مرزی لحاظ شود.

از این رو با توجه به مطالعه کارانزا تورس[۱] و همکاران در سال ۲۰۱۳ طول مدل در راستای محور y (محور تونل) باید ۱۰D (ده برابر قطر تونل) لحاظ شود، که مدل باید به‌اندازه ۶D حفر شود. ۲D اول و پنجم مدل تحت تاثیر شرایط مرزی، ۲D سوم تحت تاثیر جبهه کار تونل است، در ۲D چهارم پیش نشست اتفاق می‌افتد. ۲D دوم به‌عنوان زون نهایی قابل‌قبول است (شکل۵-۱).

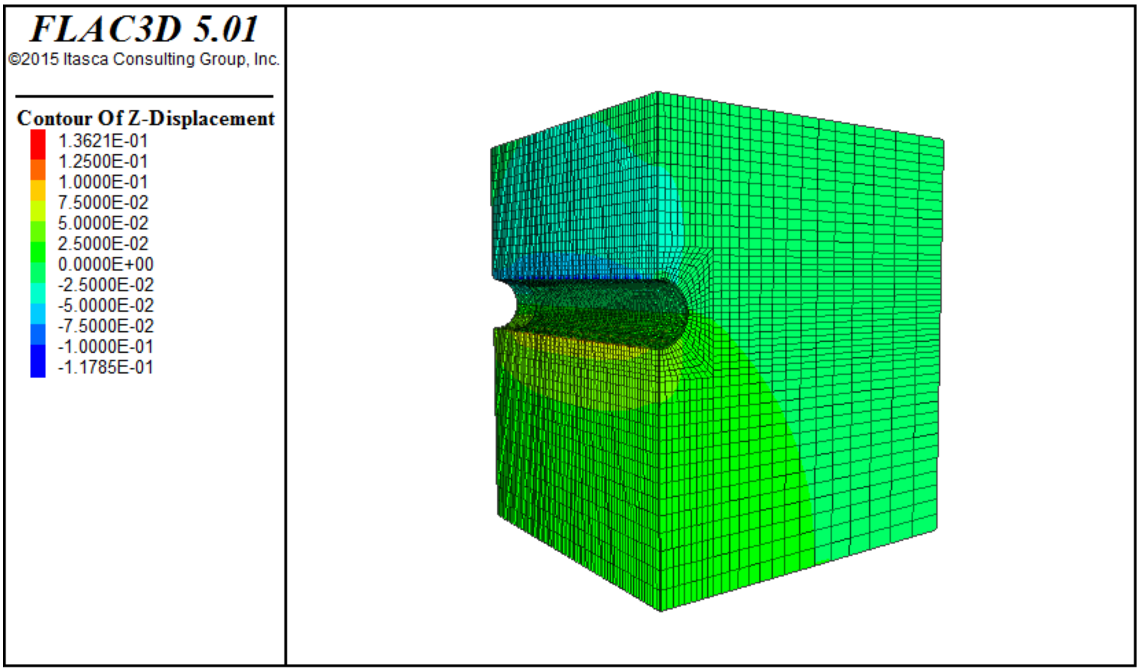
نتایج این تحقیق از این محدوده استخراج‌شده است و پوشش بتنی رینگ ۲۰ به‌عنوان پوشش حلقوی مرجع در نظر گرفته‌شده است.

[۱] Carranza-Torres

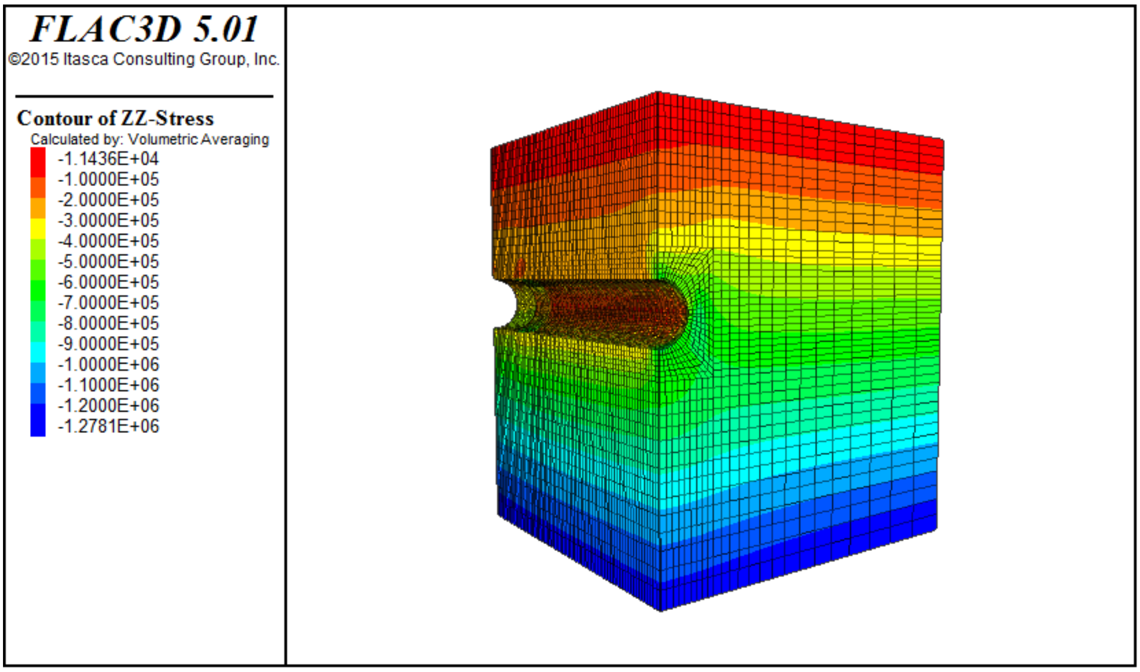


شکل ۵–۱: رابطه بین مقیاس جابجایی شعاعی و فاصله از ابتدای تونل (Carranza-Torres,2013)

بعد از حفاری تونل به اندازه ۵۷ متر کانتورهای تنش و جابجایی به شکل زیر است:



شکل ۵–۲ : کانتورهای جابجایی های قائم بعد از حفاری



شکل ۵–۳ : کانتورهای تنش قائم بعد از حفاری

۵-۳ تاثیر مشخصات مکانیکی دوغاب بر پوشش بتنی

برای بررسی اثر خواص مکانیکی دوغاب سخت شده از مدل‌سازی عددی استفاده گردیده است. با تغییر مقادیر پارامترهای ورودی در مدل عددی مقدار گشتاورهای خمشی و نیروی برشی در پوشش بتنی باهم مقایسه شده است.

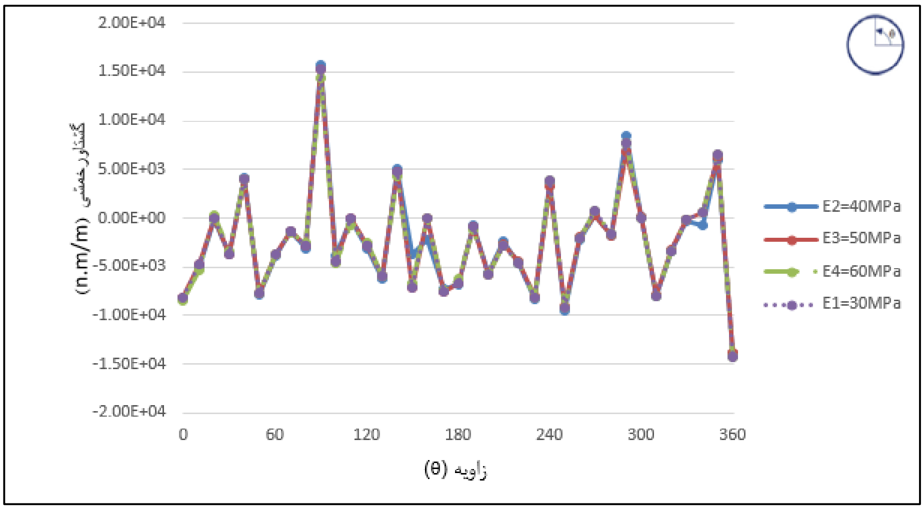
برای این منظور نیروهای وارده بر پوشش بتنی را در سه حالت در نظر می‌گیریم. ازآنجاکه در مدل‌سازی برای دوغاب مدل رفتاری الاستیک در نظر گرفته‌شده است، پارامترهای این مدل رفتاری در نرم‌افزار فلک مدول بالک و مدول برشی و دانسیته است.

این مدول‌ها از روی مدول یانگ و نسبت پواسون اندازه‌گیری شده در محل به دست می‌آیند. با این تفاسیر متغیر ما در اینجا مدول یانگ و نسبت پواسون است، از آنجا که نسبت پواسون تاثیر ناچیزی دارد از آن صرف‌نظر شده است اما برای مدول یانگ سه مقدار در نظر گرفته‌شده و در این سه حالت نیروهای واردشده بر پوشش بتنی تونل محاسبه و باهم مقایسه شده‌اند. حالت‌های مختلف برای مدول یانگ دوغاب در جدول(۵-۱) آورده شده است.

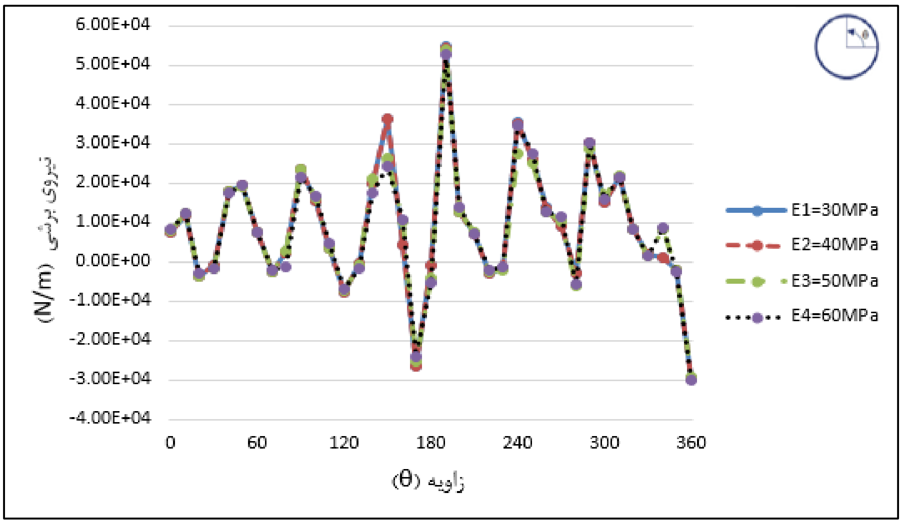
جدول ۵-۱ : تحلیل حساسیت دوغاب

حالت‌ها	E(MPa)	K	G
حالت اول	۳۰	۲e۷	۱/۲e۷
حالت دوم	۴۰	۲/۶۶۶۷e۷	۱/۶e۷
حالت سوم	۵۰	۳/۳۳۳۳e۷	۲e۷
حالت‌چهارم	۶۰	۴e۷	۲/۴e۷

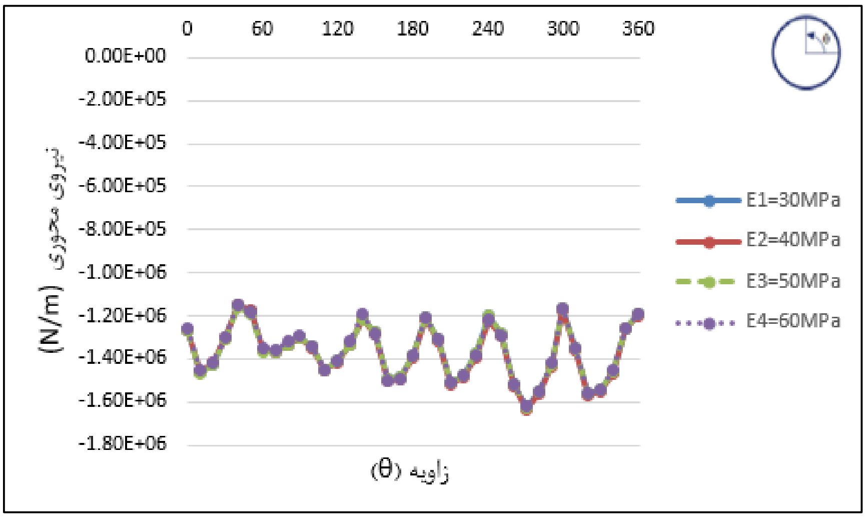
در شکل (۵-۲)،(۵-۳) و (۵-۴) به ترتیب گشتاور خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری وارد بر پوشش بتنی برای مدول یانگ‌های مختلف نشان داده‌شده است.



شکل ۵–۴ : گشتاور خمشی برای مدول یانگ‌های مختلف در رینگ ۲۰



شکل ۵–۵ : نیروی برشی برای مدول یانگ‌های مختلف در رینگ ۲۰



شکل ۵–۶ : نیروی محوری برای مدول یانگ‌های مختلف در رینگ ۲۰

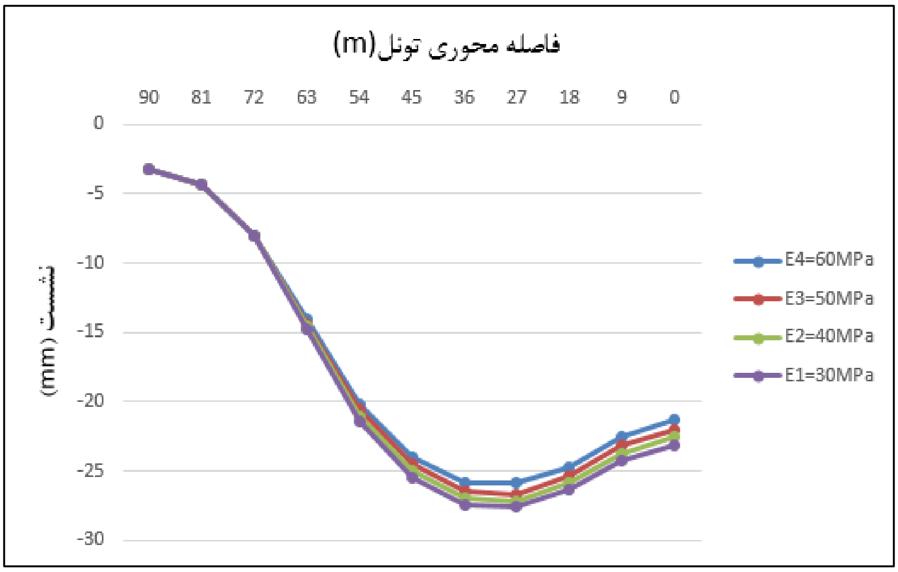
بر اساس این شکل‌ها با افزایش مدول یانگ ترخیص تنش کمتر خواهد بود و درنتیجه گشتاور خمشی و نیروی برشی وارد بر پوشش بتنی کاهش پیدا می‌کند این در حالی است که تغییرات نیروی محوری در سه حالت ناچیز بوده است.

۵-۴ تاثیر مشخصات دوغاب بر نشست زمین

برای بررسی تاثیر مشخصات مکانیکی دوغاب بر نشست زمین هم مانند حالت قبل برای سه مقدار مدول یانگ، نشست سطح زمین محاسبه و باهم مقایسه شده است. به همین منظور هنگامی‌که سپر به‌اندازه ۵۷ متر پیشروی می‌کند نشست سطح زمین در راستای محور طولی تونل به دست آورده شده

است.

در شکل (۵-۵) جابجایی عمودی (نشست) نقاط واقع در سطح زمین در امتداد محور y (محور تونل) برای سه حالت ذکرشده (جدول۵-۱) نشان داده‌شده است. بر اساس این شکل با افزایش مدول یانگ مقدار نشست کاهش پیداکرده است. به‌عبارت‌دیگر هرچقدر مدول یانگ دوغاب به مدول یانگ زمین نزدیک‌تر باشد میزان ترخیص تنش کمتر و درنتیجه مقدار نشست سطح زمین نیز کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۵–۷ : نشست سطح زمین برای مدول یانگ‌های مختلف در طول محور تونل

۵-۵ درز[۱]

همان‌طور که در فصل قبل نیز گفته شد ویژگی اصلی پوشش سگمنتی وجود درزهاست که شامل درزهای طولی بین سگمنت‌ها در یک رینگ و درز بین رینگ‌های متوالی است. درزها در پوشش سگمنتی تاثیر قابل‌توجهی بر روی رفتار پوشش سگمنتی TBM دارند. جزئیات مدل‌سازی درزها به‌طور کامل در فصل قبل توضیح داده‌شده است. همانند کار دیگر محققان در این تحقیق نیز درزها به‌وسیله اتصال دو گرهی مدل‌سازی شده است (شکل۵-۶) که شامل شش درجه آزادی توسط شش فنر: سه مولفه انتقالی در جهت x، yوz ; سه مولفه چرخشی در جهت x، yوz. سختی اختصاص‌یافته به هر فنر با استفاده از

[۱] joint

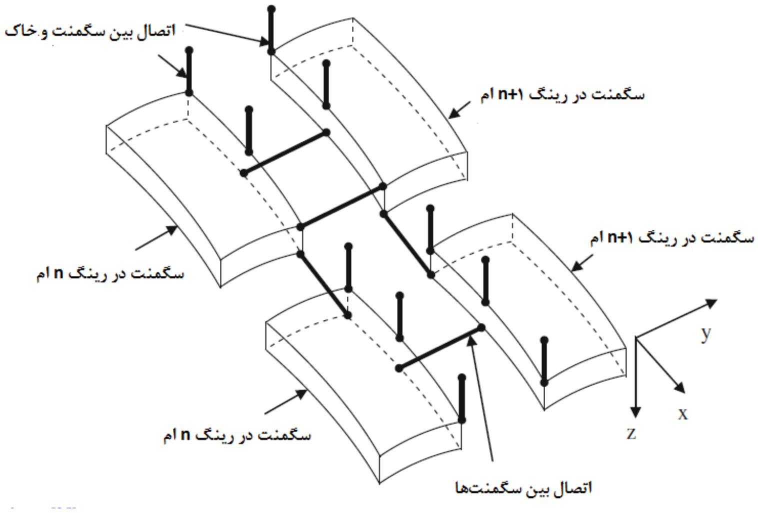
یکی از چهار شرایط زیر است:

۱) آزاد

۲) فنر خطی که با فاکتور سختی بیان می‌شود

۳) فنر دوخطی که به‌وسیله فاکتور سختی و تنش تسلیم بیان می‌شود

۴) صلب.



شکل ۵–۸ : شماتیک درزهای رینگی (Do et al,2013)

در این تحقیق ویژگی‌های سختی اتصال درز توسط یک مجموعه متشکل از فنر چرخشی (K_{RO})، فنر محوری (K_A) و فنر شعاعی (K_R) بیان شده است. بر اساس داده‌های تجربی رفتار فنر محوری به‌وسیله ضریب ثابت فنر بیان‌شده است. سختی شعاعی و سختی چرخشی درزهای سگمنت با استفاده از رابطه دوخطی و به‌وسیله فاکتور سختی و حداکثر ظرفیت باربری مشخص می‌شود. برای درزهای سگمنتی شرایط اتصال مؤلفه‌های انتقالی در جهت y (موازی با محور طولی تونل) و دو مولفه چرخشی حول جهت‌های x و z برای همه موارد موردبررسی صلب فرض شده است. همچنین برای درزهای رینگی شرایط اتصال مولفه‌های انتقالی در جهت x (مماس بر مرز تونل) و دو مولفه چرخشی حول جهت‌های y و z برای همه موارد موردبررسی صلب فرض شده است.

شش مدل پوشش با توجه به تاثیر آرایش درزها بر روی پوشش بتنی و اثر کوپلینگ (جفت‌شدگی)

موردبررسی قرارگرفته است. (شکل۵-۷)

۱) مدل M۱ – پوشش پیوسته: شرایط اتصالات درزه برای هر دو درزه سگمنتی و رینگی به‌صورت صلب در نظر گرفته‌شده است.

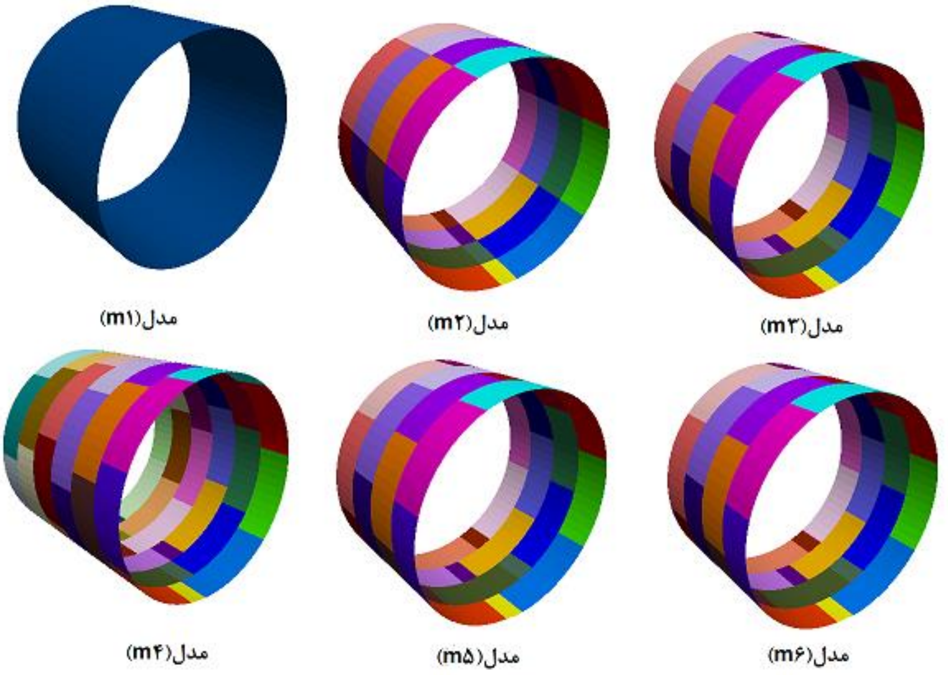
۲) مدل M۲ –رینگ‌ها در یک راستا (الگوی درز نوع ۱): درزهای سگمنتی در رینگ‌های متوالی در یک خط (راستا) قرار دارند.

۳) مدل M۳ – (مدل مرجع) درزها متناوب(الگوی درز نوع ۲): درزهای سگمنتی بین رینگ‌های متوالی به‌صورت متناوب (شطرنجی) در نظر گرفته‌شده است. هر رینگ نسبت به رینگ قبلی ۲۵ درجه چرخیده است. دوره تناوب در این آرایش دو رینگ است.

۴) مدل M۴ – درزها متناوب (الگوی درزه نوع ۳): درزهای سگمنتی بین رینگ‌های متوالی به‌صورت متناوب (پله‌ای) است. هر رینگ نسبت به رینگ قبلی ۱۰ درجه چرخیده است. دوره تناوب در این آرایش سه رینگ است.

۵) مدل M۵ – درزها متناوب (الگوی درز نوع ۲): وضعیت پوشش شبیه مدل M۳ است، با این تفاوت که درز بین رینگ‌های متوالی به‌صورت صلب در نظر گرفته‌شده است.

۶) مدل M۶ – درزها متناوب (الگوی درز نوع ۲): وضعیت پوشش شبیه مدل M۳ است، با این تفاوت که درز بین رینگ‌های متوالی به‌صورت آزاد در نظر گرفته‌شده است.



شکل ۵–۹ : آرایش‌های مختلف پوشش بتنی

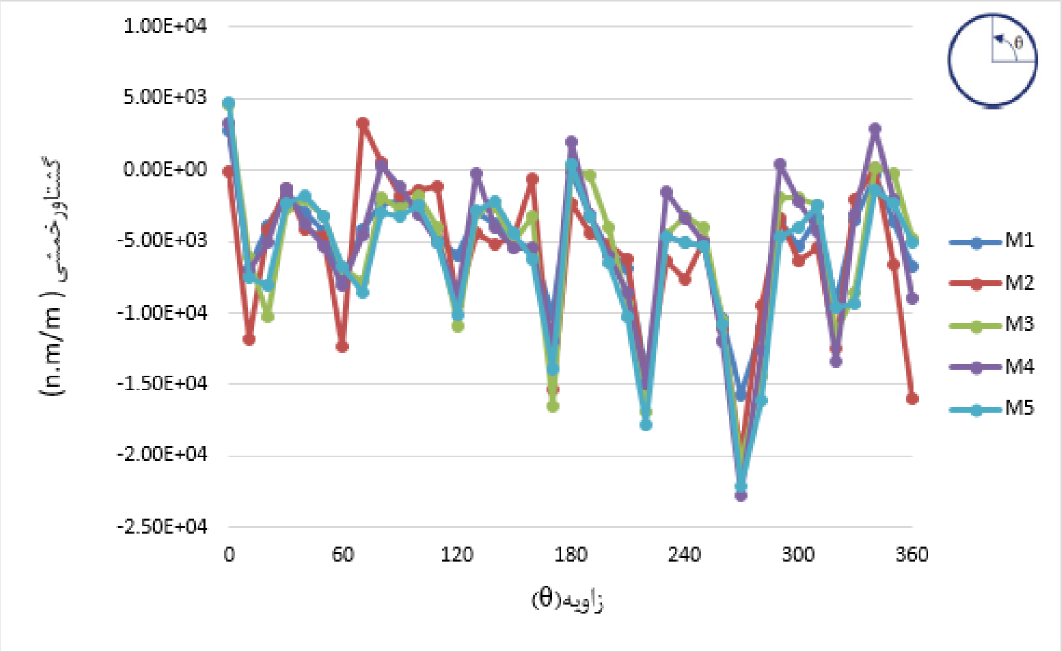
محل درزهای سگمنت در هر رینگ در جدول (۵-۲) ارائه‌شده است. در این تحقیق هر رینگ شامل هفت قطعه سگمنت به‌علاوه یک سگمنت کلید است. هفت قطعه سگمنت مستطیلی با زاویه ۵۰ درجه و سگمنت کلید ۱۰ درجه است. در آرایش (الگوی) درز نوع اول سگمنت‌ها در هر رینگ نسبت به رینگ قبلی بدون تغییر، در نوع دوم به‌اندازه ۲۵ درجه و در نوع سوم به‌اندازه ۱۰ درجه چرخانده شده است. در رینگ‌های نوع دوم دوره تناوب دو رینگ و در نوع سوم سه رینگ است یعنی بعدازاین دوره تناوب آرایش سگمنت‌های رینگ در رینگ‌های بعدی مجدد تکرار شده است.

جدول ۵-۲ : محل قرارگیری سگمنت‌ها در یک رینگ برحسب زاویه θ

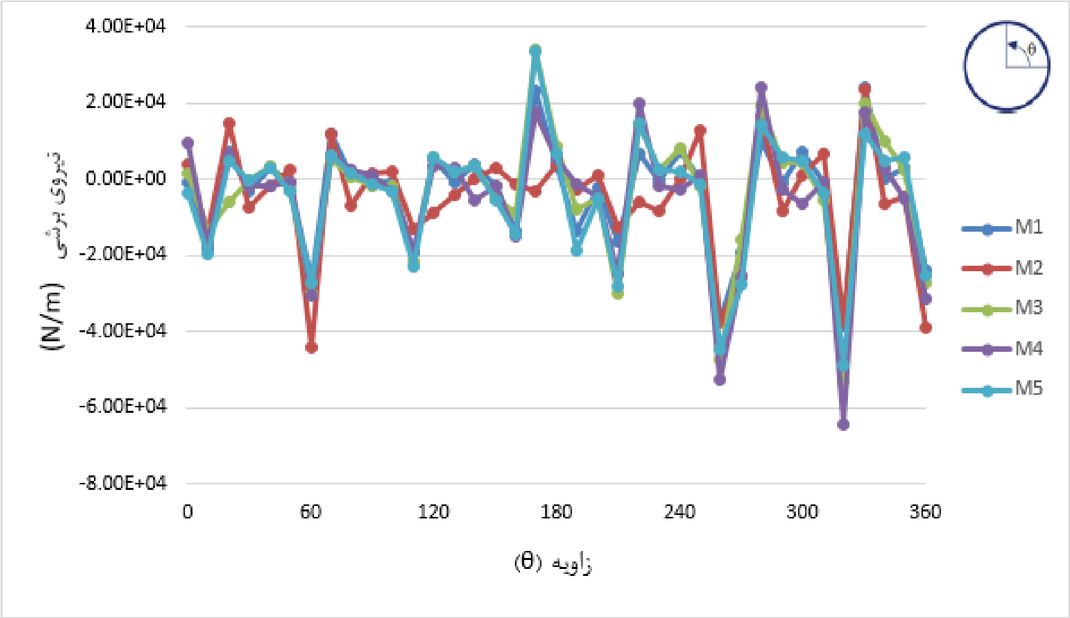
رینگ‌ها	**الگوی درز نوع۱ (مدل M۲)**	**الگوی درز نوع۲ (مدل M۳،M۵،M۶)**	**الگوی درز نوع۳ (مدل M۴)**
رینگ ۱	۱۵;۶۵;۱۱۵;۱۶۵;۲۱۵ ۲۶۵;۳۱۵;۳۲۵	۱۵;۶۵;۱۱۵;۱۶۵;۲۱۵ ۲۶۵;۳۱۵;۳۲۵	۱۵;۶۵;۱۱۵;۱۶۵;۲۱۵ ۲۶۵;۳۱۵;۳۲۵
رینگ ۲	–	۴۰;۹۰;۱۴۰;۱۹۰;۲۴۰ ۲۹۰;۳۴۰;۳۵۰	۲۵;۷۵;۱۲۵;۱۷۵;۲۲۵ ۲۷۵;۳۲۵;۳۳۵
رینگ ۳	–	–	۳۵;۸۵;۱۳۵;۱۸۵;۲۳۵ ۲۸۵;۳۳۵;۳۴۵

۵-۶ تاثیر آرایش درزها

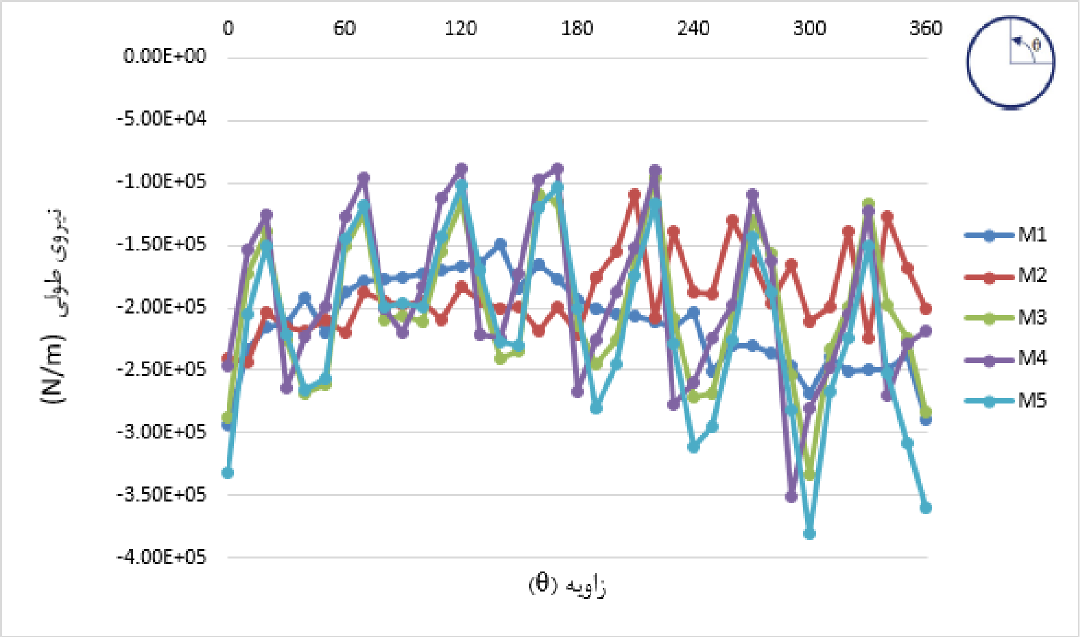
در این بخش یک مطالعه پارامتری با استفاده از شش آرایش پوشش بیان‌شده در بخش ۵-۵ انجام‌شده است. هدف از این تحقیق برجسته کردن تاثیر آرایش درزه بر روی رفتار پوشش تونل و جابه‌جایی‌های زمین است. همان‌طور که قبلاً گفته شد مدل M۱ به‌صورت پیوسته (یکپارچه)، مدل M۲ درزها در یک راستا، مدلM۳، M۴، M۵، M۶ درزها به‌صورت متناوب در نظر گرفته‌شده است. به‌منظور بررسی تاثیر آرایش درزها ماکزیمم گشتاور خمشی، جابجایی‌های قائم، نیروی قائم (برشی)، نیروی طولی برای رینگ‌های متوالی در مدل‌های M۱ تا M۵ به دست آورده شده است. (شکل۵-۸ تا شکل ۵-۱۲)



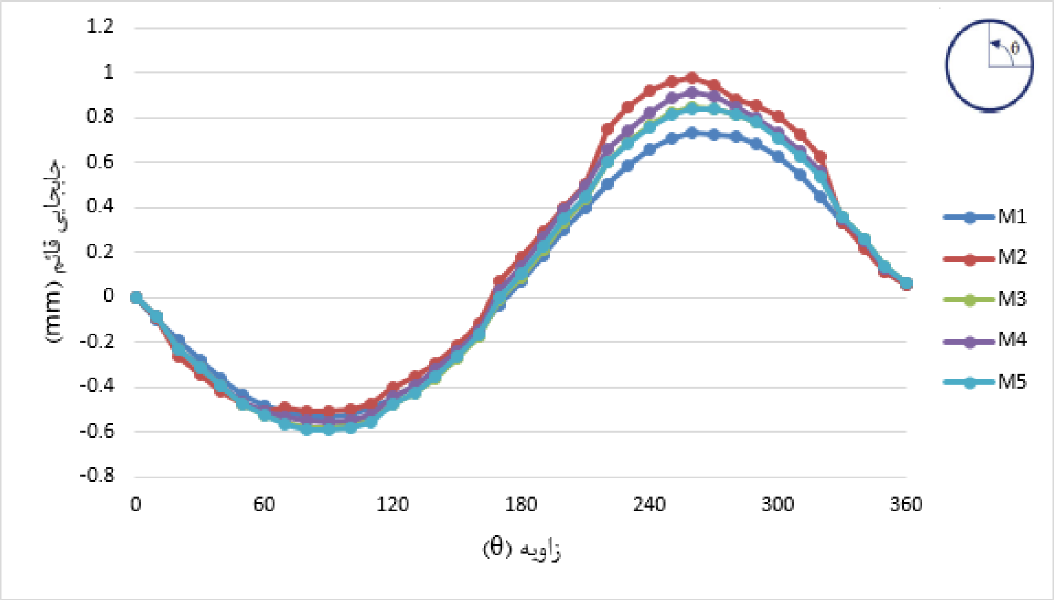
شکل ۵–۱۰ : گشتاور خمشی برای آرایش‌های مختلف پوشش بتنی در رینگ ۲۰



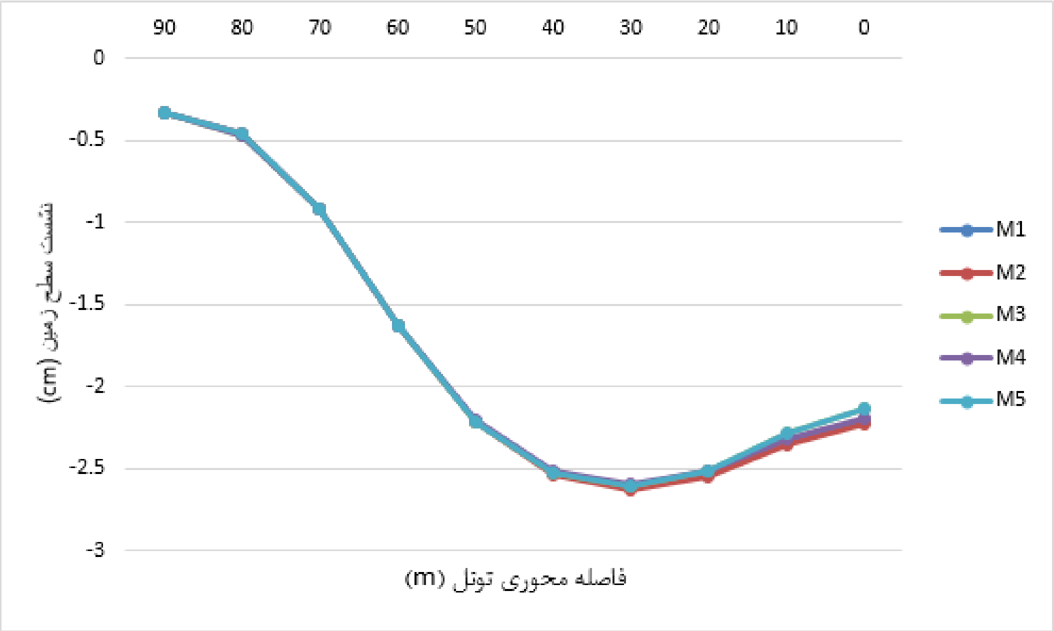
شکل ۵–۱۱ : نیروی برشی برای آرایش‌های مختلف پوشش بتنی در رینگ ۲۰



شکل ۵–۱۲: نیروی طولی برای آرایش‌های مختلف پوشش بتنی در رینگ ۲۰



شکل ۵–۱۳: جابجایی قائم برای آرایش‌های مختلف پوشش بتنی در رینگ ۲۰



شکل ۵–۱۴: نشست سطح زمین برای آرایش‌های مختلف پوشش بتنی در رینگ ۲۰

هنگامی‌که مدل M۳ ، M۴ وM۵ مورداستفاده قرار می‌گیرند درزهای سگمنت در یک رینگ حول محور y و در امتداد محور تونل به‌صورت متناوب (شطرنجی) هستند، بنابراین در نظر گرفتن تغییرات

نیروهای سازه‌ای ناشی از رینگ‌های متوالی لازم است. با نگاهی به نتایج ارائه‌شده در جدول (۵-۳)، (۵-۴) و (۵-۵) تاثیر قابل‌ملاحظه آرایش درز بر گشتاور خمشی وارد بر پوشش بتنی دیده می‌شود. حداکثر اختلاف گشتاور خمشی بین دو رینگ ۶۸/۵ درصد است. بااین‌حال حداکثر اختلاف نیروهای برشی، طولی و جابجایی‌های قائم وارد بر پوشش بتنی بین دو رینگ متوالی در یک محدوده مشابه به ترتیب ۳۶/۹، ۲۰/۹و۶/۲۵ درصد است.

درز مرجع به‌عنوان درزی است که در جهت عقربه‌های ساعت نزدیک‌تر به تاج تونل است. لازم به ذکر است که از سه پوششی که با آرایش متناوب استفاده‌شده (مدل M۳،M۴وM۵) حداقل اختلاف بین گشتاور خمشی در رینگ‌های متوالی در مدل پوشش M۴ به‌دست‌آمده است (جدول (۵-۳)، (۵-۴) و (۵-۵)). این نتایج نشان می‌دهد برای طراحی مدل پوشش M۴ بهتر از دو مدل دیگر است.

به‌عبارت‌دیگر استفاده از پوشش متناوب یعنی اختلاف کمتر در زاویه مرجع بین رینگ‌های متوالی، منجر به کاهش گشتاور خمشی ایجادشده در پوشش بتنی می‌شود.

جدول ۵-۳: نیروهای ساختاری(سازه‌ای) بین رینگ‌های متوالی در مدل M۳

پارامترها	رینگ نوع اول (A)	رینگ نوع دوم (B)	A/B(%)
حداکثر گشتاور خمشی مثبت (N.m/m)	۵۴۱۷	۱۵۷۹۰	۳۴/۳
حداقل گشتاور خمشی منفی (N.m/m)	-۲۰۴۸۰	-۱۵۰۱۰	۱۷۵/۵
حداکثر نیروی نرمال (برشی) (N /m)	۴۹۴۱۰	۵۴۲۸۰	۹۱/۰۳
حداکثر نیروی طولی (N /m)	-۳۳۳۳۰۰	-۳۱۴۳۰۰	۱۰۶/۳۶
حداکثر جابجایی قائم (mm)	۰/۸۵	۰/۸	۱۰۶/۲۵

جدول ۵-۴: نیروهای سازه‌ای بین رینگ‌های متوالی در مدل M۴

پارامترها	رینگ نوع اول (A)	رینگ نوع دوم (B)	رینگ نوع سوم (C)	A/C(%)	B/C(%)
حداکثر گشتاور خمشی مثبت (N.m/m)	۴۸۳۵	۴۸۲۲	۱۱۱۹۰	۴۳/۲	۴۳/۰۹
حداقل گشتاور خمشی منفی (N.m/m)	-۲۲۷۶۰	-۲۰۳۷۰	-۱۴۶۲۰	۱۵۵/۷	۱۳۹/۳
حداکثر نیروی نرمال (برشی) (N/m)	۴۸۰۵۰	۵۱۸۰۰	۳۷۸۴۰	۱۲۷	۱۳۶/۹
حداکثر نیروی طولی (N/m)	-۳۵۰۶۰۰	-۳۰۷۴۰۰	-۳۸۸۷۰۰	۹۰/۲	۷۹/۱
حداکثر جابجایی قائم (mm)	۰/۹۱	۰/۸۹	۰/۸۸	۱۰۳/۴	۱۰۱/۱

جدول ۵-۵: نیروهای سازه‌ای بین رینگ‌های متوالی در مدل M۵

پارامترها	رینگ نوع اول (A)	رینگ نوع دوم (B)	A/B(%)
حداکثر گشتاور خمشی مثبت (N.m/m)	۴۶۷۵	۱۴۸۳۰	۳۱/۵
حداقل گشتاور خمشی منفی (N.m/m)	-۲۲۰۴۰	-۱۷۸۰۰	۱۲۳/۸
حداکثر نیروی نرمال (برشی) (N /m)	۴۳۹۷۰	۴۹۳۰۰	۸۹/۲
حداکثر نیروی طولی (N /m)	-۳۸۰۵۰۰	-۳۴۲۸۰۰	۱۱۱
حداکثر جابجایی قائم (mm)	۰/۸۴	۰/۸۳	۱۰۱/۲

ازآنجاکه در این تحقیق نیروهای سازه‌ای در رینگ‌های مختلف در امتداد محور تونل متغیر هستند، تنها مقادیر حداکثر نیروهای سازه‌ای در جدول (۵-۶) برای هر آرایش مدل پوشش ارائه‌شده است. برای مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از پوشش پیوسته (مدل M۱) به‌عنوان مرجع انتخاب‌شده و برابر با ۱۰۰ درصد در نظر گرفته‌شده است. برای مقایسه سایر مقادیر از یک ضریب (R) استفاده‌شده که این ضریب به‌عنوان نسبت مقادیر گشتاور خمشی مثبت، گشتاور خمشی منفی، نیروهای برشی، نیروهای طولی، جابجایی

قائم و نشست سطحی مدل M_i بر مقادیر مربوط به مدل M۱ بیان می‌شود. حداکثر گشتاور خمشی مدل M۲ (مدل با درزها در یک راستا) پایین‌تر از مقادیر به‌دست‌آمده از سایر موارد است (جدول۵-۶). این می‌تواند به این دلیل باشد که پوشش تونلی که از آرایش درز مستقیم استفاده‌شده دارای صلبیت کمتری از سایر موارد است.

هر چهار موردی که از پوشش سگمنتی استفاده‌شده (مدل M۲، M۳، M۴ و M۵) دارای جابجایی بالاتری نسبت به موردی که از پوشش پیوسته استفاده‌شده است. بااین‌حال حداکثر اختلاف جابجایی قائم با مدل پوشش پیوسته حدود ۳۱/۱ درصد است.

جدول ۵-۶: مقایسه نتایج محاسبه‌شده برای پنج مدل مختلف پوشش بتنی

پارامترها	مدل m۱	مدل m۲	مدل m۳	مدل m۴	مدل m۵
حداکثر گشتاور خمشی مثبت (N.m/m)	۱۰۵۷۰	۹۶۳۵	۱۵۷۹۰	۱۱۱۹۰	۱۴۸۳۰
R_{M+}(%)	۱۰۰	۹۱/۱	۱۴۹/۴	۱۰۵/۹	۱۴۰/۳
حداقل گشتاور خمشی منفی (N.m/m)	-۱۵۷۴۰	-۱۹۸۷۰	-۲۰۴۸۰	-۲۲۷۶۰	-۲۲۰۴۰
R_{M-}(%)	۱۰۰	۱۲۶/۲	۱۳۰/۱	۱۴۴/۶	۱۴۰
حداکثر نیروی نرمال (برشی) (N/m)	۵۷۶۹۰	۵۱۱۷۰	۵۴۲۸۰	۵۱۸۰۰	۴۹۳۰۰
R_N(%)	۱۰۰	۸۸/۷	۹۴/۱	۸۹/۸	۸۵/۵
حداکثر نیروی طولی (N/m)	-۲۹۳۳۰۰	-۲۴۲۸۰۰	-۳۳۳۳۰۰	-۳۸۸۷۰۰	-۳۸۰۵۰۰
R_{LN}(%)	۱۰۰	۸۲/۸	۱۱۳/۶	۱۳۲/۵	۱۲۹/۷
حداکثر جابجایی قائم (mm)	۰/۷۴	۰/۹۷	۰/۸۵	۰/۹۱	۰/۸۴
R_{disp}(%)	۱۰۰	۱۳۱/۱	۱۱۴/۹	۱۲۳	۱۱۳/۵
حداکثر نشست سطحی (cm)	۲/۶۱	۲/۶۳	۲/۶	۲/۶	۲/۶
R_{set}(%)	۱۰۰	۱۰۰/۸	۹۹/۶	۹۹/۶	۹۹/۶

به‌منظور برجسته کردن تاثیر اتصال[۱] (جفت‌شدگی) بین رینگ‌های متوالی بر روی رفتار تونل نیروهای سازه‌ای و نشست سطحی به‌دست‌آمده با استفاده از سه مدل پوشش (M۳،M۵وM۶) باهم

[۱] Coupling

مقایسه شده است. با توجه به عدم ارتباط بین رینگ‌های متوالی، مدل M۶ به‌صورت ایزوله در نظر گرفته‌شده است. اثرات جفت‌شدگی منجر به پاسخ صلب‌تر پوشش شده است. درنتیجه تغییر شکل قائم کاهش می‌یابد اما نیروهای سازه‌ای افزایش پیدا می‌کند. این نتایج می‌تواند از طریق مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از مدل M۶ با دیگر مدل‌هایی که دارای همان آرایش درز می‌باشند اعتبار سنجی شود. به‌طورکلی اتصال صلب‌تر بین دو رینگ متوالی باعث افزایش نیروهای سازه‌ای و کاهش جابجایی پوشش می‌شود.

جدول ۵-۷: تاثیر اثر اتصال (جفت‌شدگی) بر روی رفتار تونل

پارامترها	مدل m۳ (A)	مدل m۵ (B)	مدل m۶ (C)	A/C (%)	B/C (%)
حداکثر گشتاور خمشی مثبت (N.m/m)	۱۵۷۹۰	۱۴۸۳۰	۱۳۲۳۰	۱۱۹/۳	۱۱۲/۱
حداقل گشتاور خمشی منفی (N.m/m)	-۲۰۴۸۰	-۲۲۰۴۰	-۲۶۳۲۰	۷۷/۸	۸۳/۷
حداکثر نیروی نرمال (برشی) (N/m)	۵۴۲۸۰	۴۹۳۰۰	۴۱۶۶۰	۱۳۰/۳	۱۱۸/۳
حداکثر نیروی طولی (N/m)	-۳۳۳۳۰۰	-۳۸۰۵۰۰	-۳۱۵۹۰۰	۱۰۵/۵	۱۲۰/۴
حداکثر جابجایی قائم (mm)	۰/۸۲	۰/۸۴	۰/۸۶	۹۵/۳	۹۷/۷
حداکثر نشست سطحی (cm)	۲/۶	۲/۶	۲/۶	۱۰۰	۱۰۰

به‌غیراز مدل M۶، که در آن اثر اتصال (جفت‌شدگی) بین مفاصل در نظر گرفته نشده است، در بقیه موارد تاثیر ناچیز آرایش درز بر نشست نهایی سطح زمین نشان داده‌شده است (شکل (۵-۱۲) و جدول (۵-۷)).

۵-۷ تحلیل حساسیت بر روی خصوصیات درزهای سگمنت

برای مدلسازی درزهای سگمنت از سه نوع سختی (سختی شعاعی، محوری و چرخشی) استفاده

شده است. با توجه به اینکه در این تحقیق امکان انجام آزمایش وجود نداشت و همچنین با توجه به اینکه مشخصات لاینینگ و شرایط زمین تقریبا مشابه با مطالعه موردی دو است، سختی مفاصل مورد استفاده در مدل‌سازی از مقادیر مربوط به مقاله ایشان در سال ۲۰۱۳ استخراج شده است. در نتیجه بر روی این مقادیر تحلیل حساسیت انجام شده است. به این صورت که ابتدا سختی محوری و چرخشی را ثابت گرفته و سختی شعاعی رو به عنوان متغیر در نظر می‌گیریم (جدول ۵-۸) و با تغییر این سختی تاثیر آن را روی نتایج به دست آورده و برای دو سختی دیگر نیز همچنین روندی انجام شده و با هم مقایسه شده است.

جدول ۵-۸ : تحلیل حساسیت بر روی مقادیر سختی درزها

پارامترها	سختی شعاعی K_R (MN/m)		سختی محوری K_A (MN/m)		سختی چرخشی K_{RO} (MN m/rad/m)	
حالت اول	۸۰۰	۵۲۵	۵۰۰		۱۰۰	
	۱۰۵۰	۹۰۰				
	۱۳۰۰	۱۲۰۰				
		۱۵۷۵				
حالت دوم	۱۰۵۰		۳۷۵	۲۵۰	۱۰۰	
			۵۰۰	۴۲۵		
			۶۲۵	۵۷۵		
				۷۵۰		
حالت سوم	۱۰۵۰		۵۰۰		۷۵	۵۰
					۱۰۰	۸۵
					۱۲۵	۱۱۵
						۱۵۰

جدول ۵-۹ : مقدار نیروهای سازه‌ای وارد بر لاینینگ (رینگ۲۰) به ازای مقادیر مختلف سختی شعاعی

سختی شعاعی K_R (MN/m)	۵۲۵	۸۰۰	۹۰۰	۱۰۵۰	۱۲۰۰	۱۳۰۰	۱۵۷۵
حداکثر گشتاور خمشی (N.m/m)	۴۵۰۰	۴۶۴۸	۵۰۱۰	۵۴۱۷	۵۱۱۸	۵۰۲۷	۵۴۱۷
حداکثر نیروی طولی(N/m)	-۳۴۲۷۰۰	-۳۴۷۳۰۰	-۳۴۸۷۰۰	-۳۳۳۳۰۰	-۳۵۱۸۰۰	-۳۴۹۰۰۰	-۳۵۴۴۰۰
حداکثر نیروی نرمال (برشی) (N/m)	۱۰۰۹۰۰	۹۷۷۵۰	۹۸۸۱۰	۹۲۶۵۰	۱۰۱۰۰۰	۹۹۰۴۰	۹۹۵۴۰

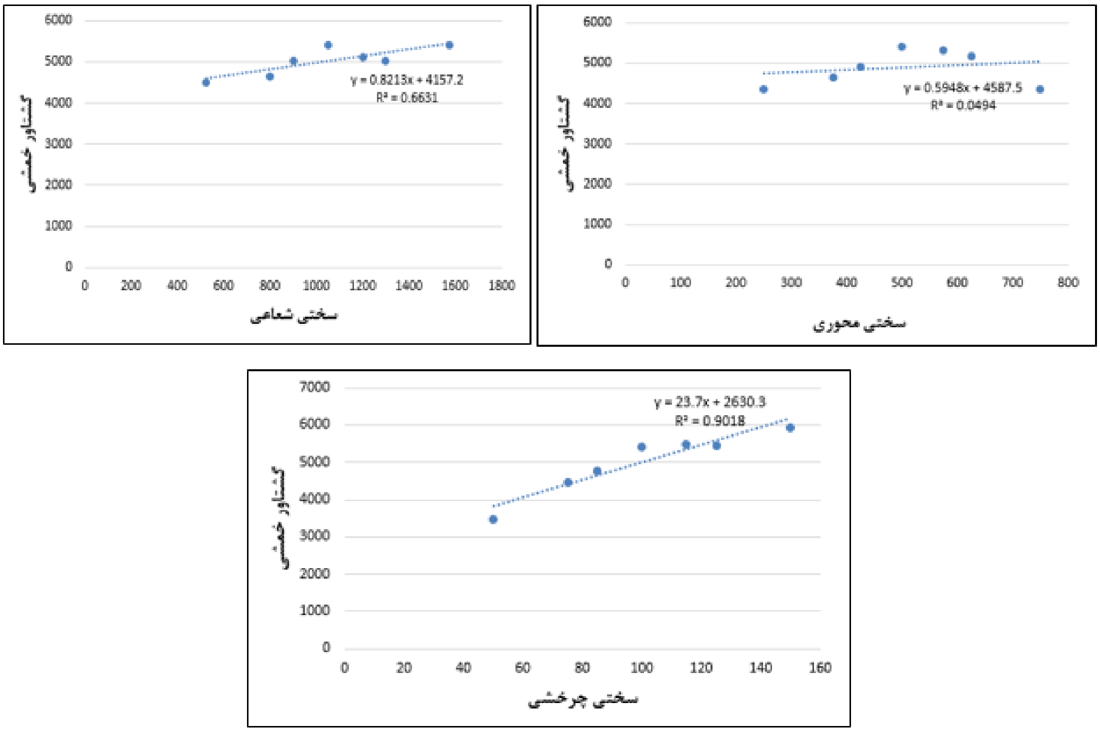
جدول ۵-۱۰ : مقدار نیروهای سازه‌ای وارد بر لاینینگ (رینگ۲۰) به ازای مقادیر مختلف سختی محوری

سختی محوری K_A (MN/m)	۲۵۰	۳۷۵	۴۲۵	۵۰۰	۵۷۵	۶۲۵	۷۵۰
حداکثر گشتاور خمشی (N.m/m)	۴۳۵۴	۴۶۳۷	۴۹۱۶	۵۴۱۷	۵۳۳۱	۵۱۸۵	۴۳۵۴
حداکثر نیروی طولی(N/m)	-۴۱۷۲۰۰	-۳۷۲۶۰۰	-۳۶۶۰۰۰	-۳۳۳۳۰۰	-۳۳۷۱۰۰	-۳۳۳۴۰۰	-۴۱۷۲۰۰
حداکثر نیروی نرمال (برشی)(N/m)	۹۵۰۸۰	۹۹۳۴۰	۱۰۳۳۰۰	۹۲۶۵۰	۹۸۹۷۰	۹۹۰۱۰	۹۵۰۸۰

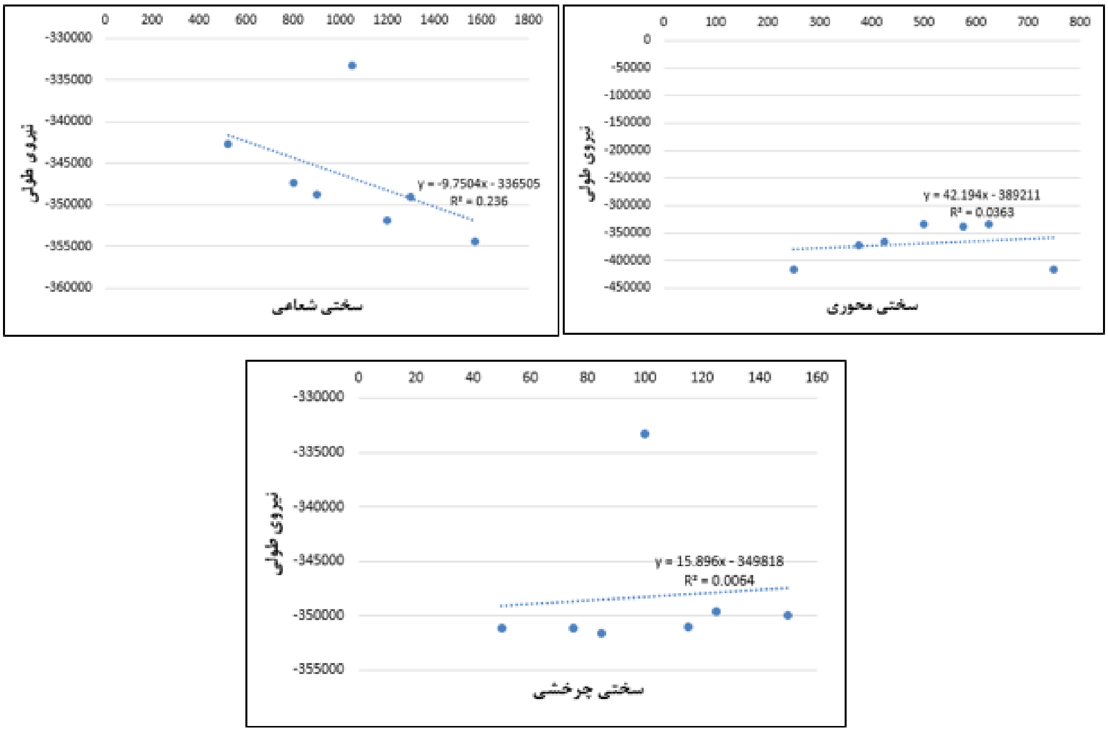
جدول ۵-۱۱: مقدار نیروهای سازه‌ای وارد بر لاینینگ (رینگ ۲۰) به ازای مقادیر مختلف سختی چرخشی

سختی چرخشی K_{RO} (MN m/rad/m)	۵۰	۷۵	۸۵	۱۰۰	۱۱۵	۱۲۵	۱۵۰
حداکثر گشتاور خمشی (N.m/m)	۳۴۷۹	۴۴۴۸	۴۷۷۲	۵۴۱۷	۵۵۰۳	۵۴۴۷	۵۹۳۶
حداکثر نیروی طولی (N/m)	-۳۵۱۱۰۰	-۳۵۱۱۰۰	-۳۵۱۶۰۰	-۳۳۳۳۰۰	-۳۵۱۰۰۰	-۳۴۹۶۰۰	-۳۴۹۹۰۰
حداکثر نیروی نرمال (برشی) (N/m)	۹۱۸۲۰	۹۶۲۶۰	۹۹۰۶۰	۹۲۶۵۰	۱۰۳۶۰۰	۱۰۲۸۰۰	۱۰۶۱۰۰

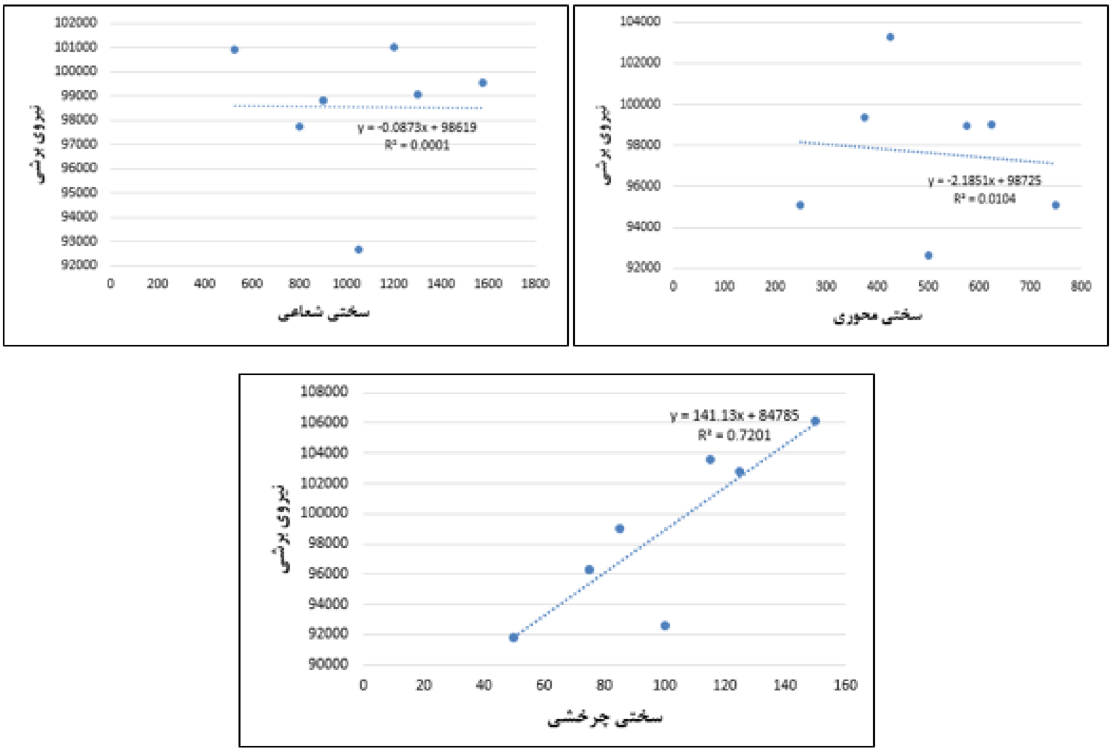
مقادیر نیروهای سازه‌ای وارد بر لاینینگ برای رینگ ۲۰ در بالا آورده شده است در ادامه نیز نمودار این مقادیر به صورت رگرسیون خطی ارائه شده است که روند نموداری داده‌ها را بخوبی بیان می‌کند.



شکل ۵–۱۵: تغییرات سختی درزها بر روی گشتاور خمشی



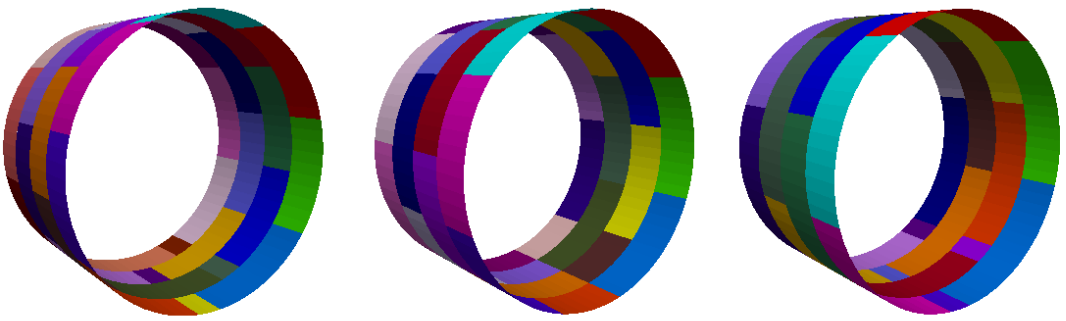
شکل ۵–۱۶ : تغییرات سختی درزها بر روی نیروی طولی



شکل ۵–۱۷ : تغییرات سختی درزها بر روی نیروی برشی

۵-۸ تحلیل حساسیت بر روی تعداد سگمنت‌های یک رینگ

به منظور بررسی تاثیر تعداد سگمنت‌های یک رینگ بر روی نیروهای وارد بر لاینینگ سه حالت در نظر گرفته شده است. تعداد سگمنت‌ها ۵،۶و۷ سگمنت به اضافه‌ی یک سگمنت کلید در نظر گرفته شده است. در این سه حالت نیروهای وارد بر لاینینگ (رینگ۲۰) به دست آورده شده و با هم مقایسه شده است.

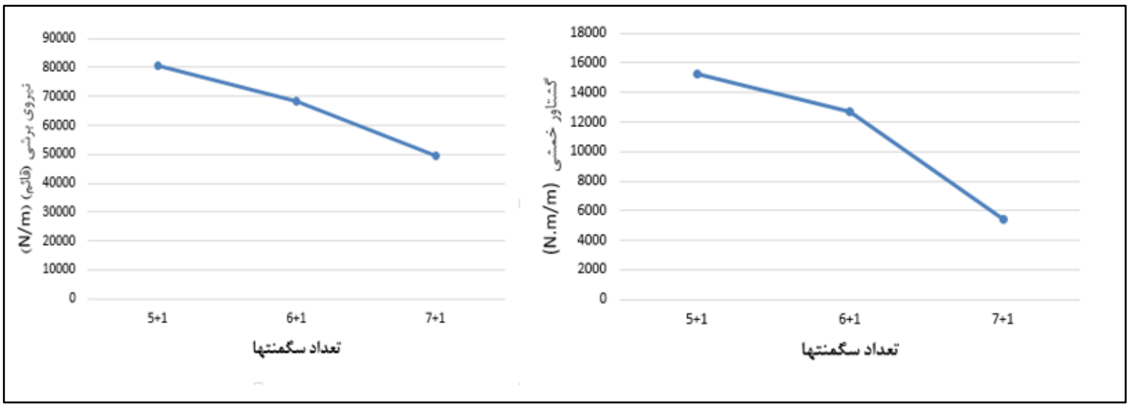


ج) ۷+۱ سگمنت　　ب) ۶+۱ سگمنت　　الف) ۵+۱ سگمنت

شکل ۵–۱۸ : حالت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای تعداد سگمنت‌های یک رینگ

جدول ۵-۱۲: نیروهای وارد بر لاینینگ به ازای تعداد سگمنت‌های مختلف

تعداد سگمنت‌ها	۱+۵	۱+۶	۱+۷
حداکثر گشتاور خمشی (N.m/m)	۱۵۲۵۵	۱۲۷۲۰	۵۴۱۷
حداکثر نیروی نرمال (برشی)(N/m)	۸۰۸۱۰	۶۸۳۵۰	۴۹۴۱۰



شکل ۵–۱۹: نیروهای وارد بر لاینینگ به ازای تعداد سگمنت‌های مختلف

با مشاهده نتایج بالا می‌توان این نتیجه را گرفت که با افزایش تعداد سگمنت‌ها گشتاور خمشی و نیروی برشی وارد بر رینگ کاهش می‌یابد

۵-۹ جمع بندی فصل

در این فصل ابتدا بر روی مشخصات مکانیکی دوغاب تحلیل حساسیت انجام‌گرفته و نیروهای سازه‌ای وارد بر پوشش بتنی و نشست سطحی زمین در سه حالت به دست آورده شده و باهم مقایسه شده است. در ادامه شش مدل آرایش درز برای پوشش بتنی در نظر گرفته‌شده و نیروهای سازه‌ای وارد بر پوشش بتنی و نشست سطح زمین در این شش حالت به دست آورده شده و باهم مقایسه شده است و در آخر نیز بر روی مقادیر سختی درزها و تعداد سگمنت‌های یک رینگ تحلیل حساسیت انجام شده است.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادها

۶-۱ نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از این تحقیق نشان می‌دهد که جانمایی سگمنت در رینگ‌های متوالی و وضعیت اتصال درزها دو پارامتر مهم هستند که نیروهای سازه‌ای و تغییر شکل پوشش را تحت تاثیر قرار می‌دهند. به همین دلیل باید درزها در پوشش تونل برای اطمینان از تخمین دقیق نیروهای سازه‌ای شبیه‌سازی شوند. علاوه بر این جانمایی‌های سگمنت رینگ باید از طریق مدل‌سازی سه‌بعدی به‌منظور تعیین مطلوب‌ترین موقعیت سگمنت برای طراحی پوشش بتنی تحلیل شود.

آرایش درز تاثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر گشتاور خمشی وارد بر پوشش بتنی دارد. حداکثر اختلاف گشتاور خمشی بین دو رینگ ۶۸/۵ درصد است. بااین‌حال حداکثر اختلاف نیروهای برشی، طولی و جابجایی‌های قائم وارد بر پوشش بتنی بین دو رینگ متوالی در یک محدوده مشابه به ترتیب ۳۶/۹، ۲۰/۹و۶/۲۵ درصد است.

حداقل اختلاف بین گشتاور خمشی در رینگ‌های متوالی از بین سه مدل پوشش سگمنتی در مدل پوشش M۴ به‌دست‌آمده است. به‌عبارت‌دیگر استفاده از پوشش متناوب با اختلاف کمتر در زاویه مرجع بین رینگ‌های متوالی، منجر به کاهش گشتاور خمشی ایجادشده در پوشش بتنی می‌شود. درنتیجه برای طراحی، مدل پوشش M۴ بهتر از دو مدل دیگر است.

به‌منظور برجسته کردن تاثیر اتصال (جفت‌شدگی) بین رینگ‌های متوالی بر روی رفتار تونل نیروهای سازه‌ای و نشست سطحی به‌دست‌آمده با استفاده از سه مدل پوشش (M۳،M۵وM۶) باهم مقایسه شده است. . اثرات جفت‌شدگی منجر به پاسخ صلب‌تر پوشش شده است. درنتیجه در تغییر شکل قائم در دو مدل (M۳وM۵) نسبت به مدل M۶ کاهش می‌یابد اما نیروهای سازه‌ای افزایش پیدا می‌کند به‌طورکلی اتصال صلب‌تر بین دو رینگ متوالی باعث افزایش نیروهای سازه‌ای و کاهش جابجایی پوشش می‌شود. به‌غیراز مدل M۶، که در آن اثر اتصال (جفت‌شدگی) بین مفاصل در نظر گرفته نشده است، در بقیه موارد آرایش درز تاثیر ناچیزی بر نشست نهایی سطح زمین دارد.

پر کردن مداوم فضای خالی ایجادشده پشت پوشش سگمنتال تونل، از عملیات بسیار مهم حفاری

مکانیزه بوده که هدف اصلی آن به حداقل رساندن نشست در سطح زمین است. در تحقیق حاضر سعی بر آن شد تاثیر خصوصیات مکانیکی دوغاب بر نشست زمین و نیروهای وارده بر لاینینگ موردبررسی قرار گیرد، که این نیروها برای سه مقادیر مختلف مدول یانگ بررسی و باهم مقایسه شد. که نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

با افزایش مدول یانگ مقدار نشست سطح زمین کاهش پیدا کرد به‌عبارتی‌دیگر هرچقدر مدول یانگ دوغاب به مدول یانگ زمین نزدیک باشد میزان ترخیص تنش کمتر خواهد بود و درنتیجه مقدار نشست سطح زمین کاهش پیدا کرد. ازآنجاکه با افزایش مدول یانگ ترخیص تنش کمتر خواهد بود درنتیجه گشتاور خمشی وارد بر پوشش بتنی افزایش پیدا می‌کند این در حالی است که تغییرات نیروی برشی در سه حالت ناچیز بوده است.

۶-۲ پیشنهادات

رفتار سازه تونل یک پدیده پیچیده است. به‌منظور انجام یک آنالیز خیلی دقیق باید تمام فرآیندهایی را که در طول حفاری اتفاق می‌افتد در نظر گرفته شود به همین منظور پیشنهاد می‌گردد در تحقیقات بعدی مخروطی بودن سپر، جک‌های پیشروی سپر و اضافه حفاری سپر لحاظ گردد تا نتایج به حالت واقعیت نزدیک‌تر شود.

همچنین رفتار زمین‌های اطراف تونل که به‌عنوان یکی از جنبه‌های اصلی حفاری تونل است باید در نظر گرفته شود. با این وجود بسیاری از محاسبات هنوز با استفاده از مدل‌های رفتاری ساده انجام می‌گردد چون نیازمند تعداد محدودی پارامتر و زمان محاسباتی کمتری است. ازاین‌رو انتخاب یک مدل رفتاری واقع‌گرایانه برای تخمین نیروهای سازه‌ای ناشی از سازه تونل و جابجایی زمین بسیار حائز اهمیت است، ازاین‌رو پیشنهاد می‌گردد به‌منظور در نظر گرفتن بسیاری از جنبه‌های اساسی رفتار خاک مانند تغییر مدول سختی با توجه به وضعیت تنش، تفاوت در مدول در طول فازهای بارگذاری باربرداری از مدل‌های رفتاری پیچیده‌تری مانند مدل تسلیم پوش (cy soil) استفاده گردد.

منابع

حیدری شیبانی ر، زارع ش، (۱۳۹۱) " بررسی تاثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونل سازی مکانیزه در زمین نرم- مطالعه‌ی موردی: تونل قطعه‌ی شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران "، فصل‌نامه علمی پژوهشی مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی، دوره ۱، شماره ۱، صفحه ۵۷-۶۷.

دستجردی ب، کریمی م، چاکری ح،(۱۳۹۴) "بررسی تحلیلی و عددی رفتار پوشش سگمنتی تونل" دومین کنفرانس منطقه‌ای و یازدهمین کنفرانس تونل ایران.

راهنمای طراحی و اجرای پوشش داخلی تونل‌های راه و راه‌آهن (۱۳۹۴)، ضابطه شماره ۶۸۴ .

راهنمای کاربرد روش‌های عددی در طراحی ژئومکانیکی معادن (۱۳۹۳)، ضابطه شماره ۶۸۶.

شرکت مهندسین مشاور ایمن‌سازان، (۱۳۸۹) " خدمات مهندسی پروژه تونل خط ۲ قطار شهری تبریز از ابتدای تونل تا ایستگاه G_2 ".

شرکت مهندسین مشاور ایمن‌سازان، (۱۳۹۵) " گزارش مطالعات ژئوتکنیک مسیر و پارکینگ شرقی".

فرخ، ابراهیم، " قطعات بتنی پیش‌ساخته" ، انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیرکبیر، ویرایش اول، ۱۳۸۶.

کاوسیان ا , یاراحمدی ع, غلام نژاد ج، (۱۳۹۱) " بررسی اثر درزه‌داری لاینینگ تونل در میزان جابجایی لاینینگ تونل با استفاده از نرم‌افزار flac3d ". چهارمین کنفرانس مهندسی معدن ایران , دانشگاه تهران.

مجدی ع، ظهیری م، (۱۳۹۱) " بررسی روش‌های طراحی پوشش نگهداری سگمنتی تونل‌ها "، فصلنامه جاده، دوره: ۲۹، شماره: ۷۳.

معصومی فشانی ح، ابراهیمی فرسنگی م،(۱۳۹۱)"طرح بهینه اختلاط دوغاب در منطقه خشک مسیر حفاری EPB TBM های مترو شیراز"، نشریه علمی– پژوهشی مهندسی معدن، دوره هفتم، شماره چهاردهم، صفحه ۶۹ تا ۸۲.

Arnau, Oriol, and Climent Molins. "Three dimensional structural response of segmental tunnel linings." Engineering Structures 44 (2012): 210-221.

Bezuijen, A., and A. M. Talmon. "Grout properties and their influence on back fill grouting." Proceedings of the 5th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. 2013.

Blom, C. B. M., E. J. Van der Horst, and P. S. Jovanovic. "Three-dimensional structural analyses of the shield-driven “Green Heart” tunnel of the high-speed line south." Tunnelling and Underground Space Technology 14.2 (1999): 217-224.

Carranza-Torres, C., B. Rysdahl, and M. Kasim. "On the elastic analysis of a circular lined tunnel considering the delayed installation of the support." International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 61 (2013): 57-85.

Chakeri, Hamid, Yılmaz Ozcelik, and Bahtiyar Unver. "Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB." Tunnelling and Underground Space Technology 36 (2013): 14-23.

Duddeck, Heinz, and J. Erdmann. "Structural design models for tunnels in soft soil." Underground Space ; (United States) 9 (1985).

Do, Ngoc-Anh, et al. "Three-dimensional numerical simulation for mechanized tunnelling in soft ground: the influence of the joint pattern." Acta Geotechnica 9.4 (2014): 673-694.

Do, Ngoc Anh, and Daniel Dias. "A comparison of 2D and 3D numerical simulations of tunnelling in soft soils." Environmental Earth Sciences 76.3 (2017): 102.

Do, N-A., et al. "3D modelling for mechanized tunnelling in soft ground-Influence of the constitutive model." American Journal of Applied Sciences 10.8 (2013): 863-875.

Guan, Zhenchang, et al. "Studies on the key parameters in segmental lining design." Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 7.6 (2015): 674-683.

Guglielmetti, Vittorio, et al., eds. Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control. CRC Press, 2008.

Hudoba, I. "Contribution to static analysis of load-bearing concrete tunnel lining built by shield-driven technology." Tunnelling and Underground Space Technology 12.1 (1997): 55-58.

Hefny, Ashraf Mohamed, and Heng-Choon Chua. "An investigation into the behaviour of jointed tunnel lining." Tunnelling and Underground Space Technology 21.3 (2006): 428.

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.

Itasca, (**1993-2002**). Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3Dimension, Version 5.00-261 User's manual, Itasca consulting Group, Inc. Minneapolis, MN.

ITA-WG2, (2000) "Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining", International Tunnelling Association, Working Group No. 2 - Research.

Kasper, Thomas, and Günther Meschke. "A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunnelling." Computers and Geotechnics 33.4-5 (2006): 234-247.

Klappers, C., F. Grubl, and B. Ostermeier. "Structural analyses of segmental lining-coupled beam and spring analyses versus 3 D-FEM calculations with shell elements." Tunnelling and Underground Space Technology 21.3 (2006): 254-255.

Lambrughi, A., L. Medina Rodríguez, and R. Castellanza. "Development and validation of a 3D numerical model for TBM–EPB mechanised excavations." Computers and Geotechnics 40 (2012): 97-113.

Muir Wood, A. M. (1975). The circular tunnel in elastic ground. *Géotechnique, 25(1),*

115-127.

Peck, Ralph B., A. J. Hendron, and B. Mohraz. "State of the art of soft-ground tunneling." N Am Rapid Excav & Tunneling Conf Proc. Vol. 1. 1972.

Sinha, R.S, (1989), "Underground Structures Design and instrumentation", Amesterdam, Netherlands, Elsevier.

Teachavorasinskun, Supot, and Tanan Chub-uppakarn. "Influence of segmental joints on tunnel lining." Tunnelling and Underground Space Technology 25.4 (2010): 490-494.

Toan, N. D. (2006). " TBM and lining: Essential Interfaces ", Politecnico di Torino, Consortium for the Research and Permanent Education (COREP), Msc Thesis.

Wittke, W., Druffel, R., Erichsen, C., Gattermann, J., Kiehl, J., Schmidt, D., et al. (2007). Stability analysis and design for mechanized tunnelling. (W. WBI Professor Dr.-Ing. Wittke, Éd.) Grundbau und Felsbau GmbH, Aachen.

Abstract

Urban transportation is one of the most important issues that has been taken into account in all the courses in urban planning. One of the public transport networks is the Metro Network. With the increasing use of tunnels, tunnel drilling machines have also been remarkably developed. One of the common ways to drill and install a tunnel support system is the TBM. The range of application of segmental lining has increased in mechanized drilling. One of the most important factors in the design of the tunnel segmentation lining is the effect of segment joint on lining. Studies in the field of numerical analysis of the behavior of the lining mechanized drilling tunnels show that most researchers have used simplified models. The study of the stability of lining often been carried out without considering the joint between the concrete segments in a continuous manner, which results in a large error in the results. Segmentation in sequential rings and joint link conditions are two important parameters that influence structural forces and deformation of the lining. For this reason, joints in the tunnel must be simulated to ensure accurate estimation of structural forces. Another important operation is the mechanized concrete grout injection molding, the main purpose of which is to minimize the ground Settlement.

In this study, six pattern were used to lining of Tabriz Metro. For these six pattern , the structural forces involved in lining, displacement and surface settlement have been obtained. The joint pattern has a significant effect on the bending moment applied to lining. Maximum bending moment difference between the two ring for different pattern is 68.5%. However, the maximum difference between shear forces, longitudinal forces and vertical displacements on lining between two successive rings in a similar range is 36.9, 20.9 and 6.25%, respectively. Also, in order to investigate the effect of grout mechanical properties on lining, three states are considered which, with the increase of the Young's modulus, the stress release is less and, as a result, the bending moment on lining is increased. This is while the shear force variation has been low.

Keywords : TBM, Segment, Tabriz Metro, Lining

Shahrood University of Technology

Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

MSc Thesis in Rock Mechanics Engineering

Influence of longitudinal joints pattern between segments and mechanical properties of back fill grouting on tunnel lining by numerical method-case study:Tabriz metro line 2

Mohsen Bakhtiari

Supervisor:

Shokrollah Zare

July 2018