



مطالعه عددی تاثیر درزه‌های سگمتی و فشار تزریق بر رفتار پوشش سگمتی تونل (مطالعه موردی: تونل انتقال آب سبزکوه)

مرتضی کریمی^{*}، شکراله زارع

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۶ دی ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۱ بهمن ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۵ اسفند ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۲۰ اسفند ۱۳۹۵

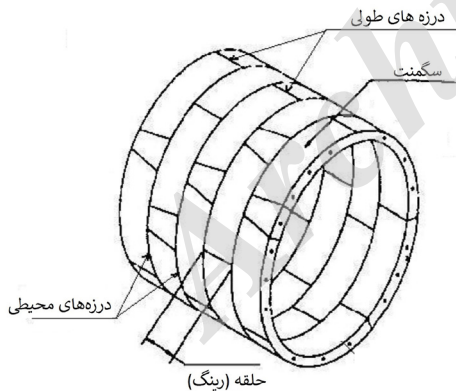
کلمات کلیدی:

حفاری مکانیزه پوشش سگمتی
درزه سگمتی
فشار تزریق
مدلسازی عددی

چکیده: ماشین تونل‌زنی (TBM) کاربرد گسترده‌ای در حفر مکانیزه‌ی تونل‌های طویل در سنگ سخت دارد. در صورت انتخاب ماشین تونل‌زنی سپری، از سگمت‌های پیش‌ساخته‌ی بتنی به عنوان پوشش دائمی تونل استفاده می‌شود. این نوع پوشش ذاتاً ناپیوسته بوده و فرض یکپارچگی آن جهت ساده‌سازی در مطالعات تحلیلی و عددی نمی‌تواند فرض کاملی باشد. پوشش سگمتی، تحت بارهای مختلف وارده از سمت زمین، ماشین تونل‌زنی و فرایندهای مختلف تونل‌سازی (مانند تزریق) رفتار خاصی از خود نشان می‌دهد که متفاوت از پوشش یکپارچه (بدون درزه) است. در این مقاله رفتار پوشش سگمتی تونل انتقال آب سبزکوه با تخصیص مقادیر سختی نرمال و برشی برای درزه‌های طولی و عرضی مابین سگمت‌ها تحلیل و با حالت پوشش یکپارچه مقایسه شده است. همچنین تاثیر فشار دوغاب تماسی مابین سنگ و سگمت‌ها بر رفتار پوشش سگمتی تونل بررسی شده است. طبق نتایج به دست آمده از مدلسازی عددی انجام شده در این مقاله توسط روش تفاضل محدود و تحت باریکنواخت تزریق، بیشینه نیروهای داخلی در موقعیت درزه‌های سگمتی رخ می‌دهد. همچنین با افزایش فشار تزریق، نیروی محوری و ممان خمشی در درزه‌های سگمتی کاهش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش فشار تزریق می‌تواند موجب افزایش جابجایی‌ها در پوشش سگمتی شود. در واقعیت، چنانچه مقدار این جابجایی‌ها از مقدار جابجایی مجاز بیشتر باشد امکان ترک خوردن سگمت‌ها و یا پله‌شدگی بین آن‌ها وجود دارد.

۱- مقدمه

ماشین تونل‌زنی (TBM) کاربرد گسترده‌ای در حفر مکانیزه‌ی تونل‌های طویل در سنگ سخت دارد. با بررسی خصوصیات ژئومکانیکی، هیدروژئولوژی و زمین‌شناسی مسیر تونل می‌توان در مورد نوع ماشین تونل‌زنی تصمیم‌گیری کرد. در صورت انتخاب ماشین تونل‌زنی سپری باید پوشش بتنی پیش‌ساخته‌ی که به صورت سگمت‌های مجزا از یکدیگر نصب می‌گردند، تحلیل و طراحی شوند. این پوشش‌های بتنی به دلیل وجود درزه‌های طولی و محیطی که به ترتیب مابین سگمت‌های یک حلقه^۱ و مابین دو حلقه متوالی وجود دارد (شکل ۱)، ذاتاً ناپیوسته بوده و فرض یکپارچگی کامل این پوشش در محاسبات تحلیلی و عددی نمی‌تواند منطقی باشد. علاوه بر این هر کدام از این درزه‌ها دارای سختی برشی و نرمال ویژه‌ای هستند که باید در تحلیل‌های سازه‌ای، برای دستیابی به مقادیر واقعی نیروهای داخلی و جابجایی‌های پوشش تونل به درستی در نظر گرفته شوند.



شکل ۱: اجزای پوشش سگمتی تونل

Fig. 1. Components of tunnel's segmental lining

در این مقاله رفتار پوشش تونل در دو حالت سگمتی و یکپارچه^۲، بر اساس روش عددی تفاضل محدود و با استفاده از نرم‌افزار FLAC^{3D}، برای تونل انتقال آب سبزکوه تحلیل و نتایج با در نظر گرفتن تاثیر فشار دوغاب تماسی با یکدیگر مقایسه شده است.

^{*}نویسنده‌ار عهده‌دار مکاتبات: morteza.karami@shahroodut.ac.ir

مشکه^۶ مقالاتی بر روی تحلیل عددی حفاری مکانیزه در محیط خاکی نرم و چسبیده با تمرکز بر روی فشار سینه کار، فشار دوغاب، وزن و طول سپر ارائه داده‌اند ولی در هیچکدام سگمندی بودن پوشش تونل لحاظ نشده است [۱۲-۱۴]. کلپرز^۷ و همکاران (۲۰۰۶) در یک مدل اجزای محدود سه بعدی، سگمندی‌ها را با یک المان پوسته‌ای چهارگره‌ای مدل کرده‌اند. نتیجه‌ی آن‌ها این بوده که دامنه‌ی ممان خمشی برای هر دو پوشش سگمندی و یکپارچه در یک محدوده قرار داشته و تغییر شکل‌ها تفاوت چندانی نداشته است [۷]. بلوم^۸ و همکاران (۱۹۹۹) تاثیر زمین، اندرکنش بین سگمندی‌ها، نیروهای ناشی از جک‌های پیشران TBM، تغییر فاز دوغاب پشت سگمندی‌ها از حالت مایع به جامد را در مدل‌سازی عددی با روش اجزای محدود در نظر گرفته‌اند. آن‌ها برای لحاظ اندرکنش بین سگمندی‌ها در نرم‌افزار انسیس^۹ از المان‌های کانتکت^{۱۰} استفاده کرده‌اند [۵]. در سال ۲۰۰۲، بلوم یک مدل تحلیلی برای مطالعه‌ی تاثیر سختی درزه‌های محیطی بین سگمندی‌های تونل در یک محیط خاکی در نظر گرفته و نشان داده است که درزه‌های صلب‌تر به طور چشمگیری باعث افزایش نیروهای خمشی داخلی حلقه شده و به میزان کمی نیز موجب کاهش جابجایی‌ها می‌شود [۱۵]. هودوبا^{۱۱} (۱۹۹۷) مدل‌های عددی مختلفی با آرایش متفاوت درزه‌های طولی برای مقاطع یکسان تونل در نظر گرفته و درزه‌ها را به صورت مفصلی مدل کرده است. در این مدل‌ها سایر خصوصیات اجرایی تونلسازی مانند ماشین تونل‌زنی، فشار سینه کار و فشار تزریق نادیده گرفته شده است [۶].

هدف اصلی این مطالعه ساخت یک مدل سه بعدی برای بررسی جزئی و دقیق رفتار پوشش سگمندی تونل در اندرکنش با عوامل مختلفی مانند زمین، تنش‌های برجا و فشار تزریق دوغاب است. در این مطالعه سختی نرمال و برشی درزه‌های محیطی و طولی بر اساس روابط آزمایشگاهی تعیین و تاثیر درزه‌ها بر میزان جابجایی و توزیع نیروهای داخلی (ممان خمشی و نیروی محوری) در سگمندی‌ها بررسی شده است. برای این منظور، تونل انتقال آب سبزکوه به عنوان مطالعه موردی در این مقاله به کار رفته است.

۲- پوشش سگمندی تونل

تونل‌های حفاری شده به وسیله ماشین تونل‌زنی در صورت نیاز سنگ به پایدارسازی و برای جلوگیری از نشست سطحی باید به وسیله پوشش سگمندی بتنی نگهداری شوند. برخی از محققین و جوامع علمی، پوشش سگمندی تونل را به صورت یک حلقه کامل و با صلبیت کاهش یافته مدل کرده‌اند که ضریب کاهش کمتر از یک ($\eta \leq 1$) به سختی خمشی پوشش (EI) اعمال شده است [۱۶]. محققان دیگری نیز با تخصیص سختی چرخشی (K_θ) به المان‌های سازه‌ای تیر در روش‌های عددی به مدل‌سازی

توسعه‌ی کدهای کامپیوتری و ضعف روش‌های تحلیلی برای حل مسائل پیچیده، سبب استفاده از روش‌های عددی جهت طراحی و تحلیل پوشش تونل شده است به گونه‌ای که روش‌های عددی برای طراحی و تحلیل پوشش تونل در ارجحیت قرار گرفته است [۱]. در بسیاری از تحلیل‌های عددی از فرض ساده‌سازی برای حذف درزه‌های طولی و محیطی پوشش تونل استفاده شده و تنها مقالات محدودی به نقش این درزه‌ها در ساختار پوشش تونل پرداخته‌اند [۲-۶]. درزه‌های مابین سگمندی‌های پوشش بتنی تونل تاثیر خاصی بر رفتار تونل و پوشش آن داشته [۲ و ۸-۵] که این تاثیر تاکنون به خوبی بررسی نشده است.

احمدی و همکاران (۲۰۱۶) برای تونل انتقال آب قمرود مکانیزم اندرکنش درزه‌های پوشش پیش‌ساخته‌بتنی را به صورت عددی و با نرم‌افزار المان مجزا UDEC بررسی کرده‌اند. در این بررسی بارهای اعمال شده بر پوشش تونل شامل فشار زمین، وزن سگمندی‌ها و بار ثقیل روبراه تونل بوده که تاثیر زون برشی متقاطع نیز با محور تونل بر سگمندی‌ها لحاظ شده است. با انجام تحلیل حساسیت مشخص شد که تغییر ضریب تنش و شرایط زمین‌شناسی زون برشی می‌تواند بر رفتار درزه‌های سگمندی تاثیر بگذارد [۹]. نیکخواه و همکاران (۲۰۱۶) پوشش سگمندی تونل را از منظر سازه‌ای به گونه‌ای بررسی کردند که درزه‌های سگمندی همانند یک مفصل الاستیک و یا یک فنر پیچشی عمل کنند. طبق تحلیل این محققین، درزه‌های سگمندی می‌توانند مقدار ممان خمشی ایجاد شده در سگمندی‌ها را کاهش دهند. در نهایت با بررسی نحوه قرارگیری سگمندی‌ها در یک حلقه و نیز سختی فنر پیچشی درزه‌ها، میزان بهینه تسلیح فولادی برای سگمندی‌های تونل انتقال آب چمشیر محاسبه شد [۱۰]. دو^۱ و همکاران (۲۰۱۳) با روش تفاضل محدود، پوشش سگمندی تونل را مدل‌سازی کرده ولی تحلیلی پیرامون نحوه‌ی تاثیر فشار تزریق بر رفتار پوشش یکپارچه سگمندی تونل انجام نداده‌اند [۱]. لامبروگی^۲ و همکاران (۲۰۱۲) حفاری مکانیزه با استفاده از ماشین تونل‌زنی تعادل فشار زمین را به صورت سه بعدی با استفاده از کد تفاضل محدود FLAC^{3D} مدل کرده‌اند. در این مدل علیرغم مدل‌سازی خصوصیات مانند سپر ماشین تونل‌زنی، پوشش بتنی، توالی زمانی حفاری و تحکیم، اضافه‌حفاری، تزریق و فرایند گیرش دوغاب سیمانی از سگمندی بودن پوشش تونل صرف‌نظر شده است [۱۱]. آرنائو^۳ و مولینز^۴ (۲۰۱۱، ۲۰۱۲) تاثیر سختی زمین بر اندرکنش حلقه‌های مجاور را به صورت سه بعدی مدل و تحلیل حساسیت کرده‌اند. آن‌ها اندرکنش سازه-زمین را با المان‌های فنی مستقر در جهات طولی، شعاعی و مماسی مدل‌سازی کرده‌اند ولی هیچ اشاره‌ای به خصوصیات اجرایی مانند سپر ماشین و بارهای عملیاتی مانند فشار سینه کار و فشار تزریق نداشته‌اند [۲ و ۳]. در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۰۶، کاسپر^۵ و

- 6 Meschke
- 7 Klappers
- 8 Blom
- 9 ANSYS
- 10 Contact Elements
- 11 Hudoba

- 1 Do
- 2 Lambrughi
- 3 Arnau
- 4 Molins
- 5 Kasper

پوشش سگمتی پرداخته‌اند [۱ و ۳ و ۱۷ و ۱۸].

۳- تزریق تماسی

پس از نصب سگمت‌ها و تکمیل یک حلقه در زیر سپر فولادی، ماشین‌تونل‌زنی می‌تواند با اعمال نیروی جک‌های پیشران به آخرین حلقه سگمتی، به پیشروی خود ادامه دهد. پس از گذر سپر فولادی از روی آخرین حلقه‌های نصب شده، فضای خالی پشت سگمت‌ها که در حدود ۱۵-۱۰ سانتی‌متر است باید برای توزیع یکنواخت تنش‌های وارده توسط ماده‌ای همگن و چسبنده‌ای تحت عنوان دوغاب سیمانی تزریق شود. در صورت اجرای عملیات تزریق، تحت فشارکافی و با دوغاب مناسب می‌توان از پر شدن فضای پشت سگمت‌ها اطمینان یافت. فشار تزریق دوغاب یکی از پارامترهای کلیدی در طراحی سگمت‌های پیش ساخته است. تنش حاصل از این فشار به سطح سگمت‌ها وارد شده و به صورت موضعی می‌تواند باعث ترک برداشتن سگمت‌ها، خروج حلقه‌ها از حالت دایره‌ای و پله‌شدگی بین حلقه‌ها گردد. در این مطالعه فرض شده است که تنش فشاری حاصل از دوغاب مایع در پشت دو حلقه منتهی به سپر ماشین‌تونل‌زنی یکنواخت بوده و با تغییر فشار دوغاب در سه حالت ۲، ۳ و ۴ بار، شرایط پایداری سازه‌ای سگمت‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۴- تونل انتقال آب سبزکوه

در این مطالعه برای مدل‌سازی عددی از پارامترهای مقاومتی و شرایط تنش توده‌سنگ تونل انتقال آب سبزکوه به عنوان داده‌های ورودی بهره‌گرفته شده است. تونل انتقال آب سبزکوه به طول ۱۱ کیلومتر در ارتفاعات رشته کوه زاگرس برای انتقال آب از رودخانه سبزکوه به سد چغاخور طراحی شده و هم‌اکنون در حال حفاری است. بر اساس خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ و شرایط زمین‌شناسی مسیر تونل، برای حفاری این تونل که در سنگ‌های مارنی، آهکی و دولومیتی قرار گرفته، از یک ماشین‌تونل‌زنی دو سپری استفاده شده است [۱۹]. در شکل ۱ زون‌بندی ژئوتکنیکی سازندهای سنگی در مسیر تونل سبزکوه و در جدول ۲ خصوصیات سنگ‌شناسی و ژئومکانیکی هر زون نشان داده شده است. در جدول ۳ نیز خصوصیات پوشش سگمتی این تونل ارائه شده است [۲۰].

وقتی یک پوشش سگمتی تحت بارگذاری‌های مختلف از قبیل بار زمین، فشار جک‌های پیشران TBM، فشار دوغاب و غیره قرار می‌گیرد رفتار واقعی آن به نحوه‌ی اندرکنش سطح اتصال دو سگمت در یک حلقه و سطح اتصال حلقه‌های مجاور بستگی دارد. سگمت‌ها ممکن است بر روی این سطوح بلغزند، فرو بروند و یا بچرخند که سختی مربوطه به ترتیب سختی برشی، نرمال و دورانی نام دارد. یکی از روش‌های متداول مدل‌سازی پوشش سگمتی اعمال این سختی‌ها به درزه‌های طولی و محیطی است.

در سال ۲۰۱۵، سالمی و همکاران با انجام آزمایش‌های متعدد برش مستقیم بر روی سگمت‌های گسکت دار^۱ و سگمت‌های بدون گسکت، سختی برشی (K_s) و نرمال (K_n) درزه‌ها را به صورت توابعی از تنش نرمال اعمالی به پوشش بتنی تونل و مساحت سطح درزه‌ها طبق روابط ۱ تا ۴ ارائه دادند [۱۶]. روابط ۱ و ۳ برای سگمت‌های بدون گسکت و روابط ۲ و ۴ برای سگمت‌های گسکت‌دار است. در این روابط، L طول سگمت‌ها بر حسب متر، t ضخامت پوشش تونل بر حسب متر، P تنش هیدرواستاتیک اطراف تونل در اثر وزن روباره بر حسب مگاپاسکال، r شعاع داخلی تونل بر حسب متر است. همچنین σ_n تنش نرمال اعمالی به پوشش بتنی تونل بر حسب مگاپاسکال بوده که بر اساس رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

بنابراین واحد سختی نرمال و برشی درزه مگانیتون بر میلی‌متر خواهد بود.

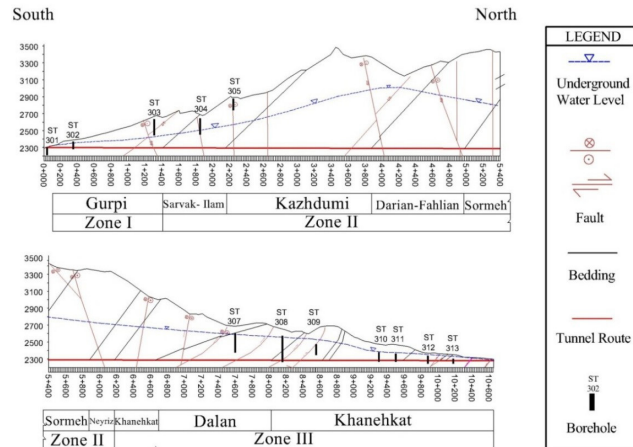
$$K_s = (1.4725\sigma_n - 0.1684)Lt \quad (1)$$

$$K_s = (1.4948\sigma_n - 0.2504)Lt \quad (2)$$

$$K_n = (1.0638\sigma_n + 0.7307)Lt \quad (3)$$

$$K_n = (1.1186\sigma_n + 0.6329)Lt \quad (4)$$

$$\sigma_n = \frac{P.r}{t} \quad (5)$$



شکل ۲: زون بندی ژئوتکنیکی مسیر تونل انتقال آب سبزکوه [۲۰]

Fig. 2. Geotechnical zoning along Sabzkouh water conveyance tunnel

جدول ۱: خصوصیات سنگ شناسی و ژئومکانیکی زون های مسیر تونل انتقال آب سبزکوه [۲۰]

Table 1. Lithology and geomechanical properties of zones along Sabzkouh water conveyance tunnel

زون	سازند	سنگ شناسی	روباره بیشینه (m)	E (MPa)	C (GPa)	φ (°)
I	گورپی سروک	مارن، آهک مارنی، آهک	۵۸۰	۳	۱	۲۵
II	کژدمی داریان سرمه نیریز	آهک چرت دار، دولومیت آهکی و دولومیت	۱۱۰۰	۶	۱/۵	۳۰
III	خانه کت دالان	آهک و دولومیت برشی	۸۷۰	۴	۰/۵	۲۰

جدول ۲: خصوصیات پوشش سگمندی تونل انتقال آب سبزکوه [۲۰]

Table 2. Properties of segmental lining used in Sabzkouh water conveyance tunnel

پارامترها	مقدار	واحد
مدول یانگ	۳۰	GPa
ضریب پواسون	۰/۱۵	-
ضخامت	۰/۲۵	m
قطر خارجی	۵	m
دانسیته	۲۳	kN/m ³
عرض	۱/۵	m

(۱۹۶۹) روش تحلیلی فرم بسته‌ای برای محاسبه تنش‌ها و جابجایی‌های ناشی از حفاری یک فضای دایره‌ای شکل در یک محیط الاستیک خطی-پلاستیک کامل و تحت میدان تنش برجای یکنواخت ارائه داده است (روابط ۶ تا ۱۳) [۲۲]. نتایج این تحلیل عددی با نتایج به دست آمده از تحلیل عددی توسط نرم‌افزار FLAC^{3D} مقایسه شده است. مدل رفتاری ماده، موهر-کولمب انتخاب شد و مساله به دلیل کوچک بودن شعاع فضا نسبت به طول آن، تحت شرایط کرنش مسطح تحلیل شد. خصوصیات ماده طبق جدول ۳ تعیین شده است.

جدول ۳: خصوصیات ماده برای اعتبارسنجی نرم‌افزار FLAC^{3D}

Table 3. Properties of material for verification of FLAC^{3D} software

پارامتر (نماد)	مقدار
مدول برشی (G)	۳ گیگاپاسکال
مدول حجمی (K)	۴ گیگاپاسکال
چسبندگی (c)	۳ مگاپاسکال
زاویه اصطکاک (φ)	۳۰ درجه

مقدار تنش برجای یکنواخت (P_0) ۳۰ مگاپاسکال لحاظ شده و از فشار داخلی (P_i) بر جداره فضای حفاری شده صرف نظر می‌شود.

• شعاع منطقه تسلیم

$$R_0 = a \left[\frac{2}{K_p + 1} \frac{P_0 + \frac{q}{K_p - 1}}{P_i + \frac{q}{K_p - 1}} \right]^{1/(K_p - 1)} \quad (6)$$

که در آن

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

$$q = 2c \tan(45 + \phi / 2)$$

$$P_i = \text{فشار داخلی} = 0 \text{MPa}$$

• تنش شعاعی در فصل مشترک الاستیک - پلاستیک

$$\sigma_{re} = \frac{1}{K_p + 1} (2P_0 - q) \quad (7)$$

۵- مدل سازی عددی با نرم‌افزار FLAC^{3D}

روش تفاضل محدود یکی از قدیمی‌ترین روش‌های عددی برای حل دستگاه‌های معادلات دیفرانسیلی است که فضای مساله را به صورت پیوسته با المان‌هایی که در گره‌ها به هم متصل هستند، مدل می‌کند. نرم‌افزار سه‌بعدی FLAC^{3D} یک برنامه تفاضل محدود است که توسط شرکت آیتسکا^۱ و بر اساس محاسبات لاگرانژی توسعه یافته است. در این نرم‌افزار برای تحلیل تنش و تغییر مکان، مواد به صورت شبکه‌های سه بعدی که از المان‌های چندوجهی تشکیل شده‌اند، 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 توسعه یافته 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:

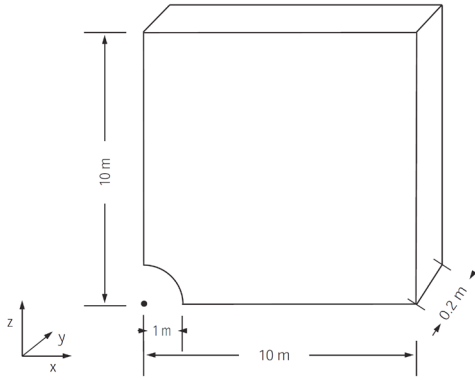
- این نرم‌افزار می‌تواند به خوبی رفتار سازه‌های ساخته شده در خاک و سنگ را تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی شبیه‌سازی کند.
- فرمولاسیون این نرم‌افزار به گونه‌ای است که می‌تواند جابه‌جایی‌ها و کرنش‌های بزرگ و رفتار غیرخطی مواد را حتی در حالتی که تسلیم یا شکست در ناحیه بزرگی نیز رخ دهد و یا گسیختگی کامل رخ دهد، به خوبی مدل کند.
- وجود مدل‌های رفتاری متنوع الاستیک و پلاستیک از جمله معیار شکست موهر-کولمب، دراگر-پراگر و هوک-براون، نرم شوندگی و سخت شوندگی و غیره.
- امکان استفاده از ماژول‌های اختیاری متنوعی مانند تحلیل حرارتی و خزش، قابلیت تجزیه و تحلیل دینامیکی و مدل جریان سیال دو فازی بسته به الزامات طراحی.
- امکان توسعه روابط و مدل‌های جدید رفتاری با استفاده از کدنویسی مخصوص نرم‌افزار که تحت عنوان فیش (FISH) شناخته می‌شود.
- امکان مدل‌سازی المان‌های سازه‌ای مورد استفاده در پروژه‌ها مانند شمع‌ها، پیچ‌سنگ‌ها، شاتکریت، قاب فولادی، ژئوگرید و غیره.
- دارا بودن رابط گرافیکی قوی.

در این مقاله از نسخه شماره ۵ نرم‌افزار FLAC^{3D} استفاده شده که سرعت و قابلیت‌های گرافیکی بالاتری نسبت به نسخه‌های قبل دارد [۲۱].

۵-۱- اعتبارسنجی نتایج نرم‌افزار FLAC^{3D}

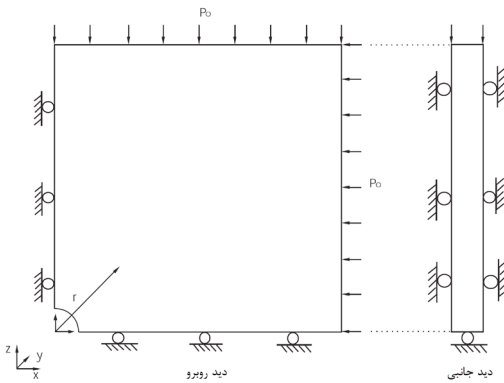
با حل یک مساله یکسان به روش تحلیل و عددی و مقایسه نتایج آن‌ها با یکدیگر می‌توان یک نرم‌افزار عددی را اعتبارسنجی نمود. سالنچون^۲

1 Itasca
2 Salençon



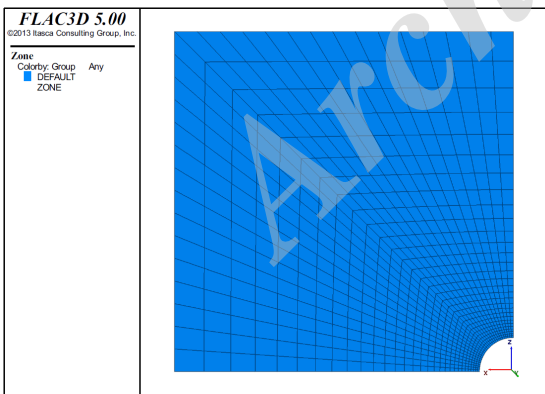
شکل ۳: ابعاد مدل ساخته شده در نرم افزار FLAC^{3D}

Fig. 3. Domain for FLAC^{3D} Simulation – quarter symmetry



شکل ۴: شرایط مرزی در مدل ساخته شده در نرم افزار FLAC^{3D}

Fig. 4. Boundary conditions for FLAC^{3D} analysis – quarter symmetry



شکل ۵: شبکه بندی مدل در نرم افزار FLAC^{3D}

Fig. 5. FLAC^{3D} grid - quarter symmetry

در شکل ۶ تنش‌های نرمالایز شده σ_r/P_0 و $-\sigma_\theta/P_0$ در مقابل شعاع نرمالایز شده r/a ترسیم شده است. همچنین جابجایی‌های نرمالایز شده $-u_r/a$ در برابر r/a در شکل ۷ نشان داده شده است. در این دو شکل مقادیر عددی و تحلیلی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

• تنش‌ها و جابجایی شعاعی در منطقه الاستیک

$$\sigma_r = P_0 - (P_0 - \sigma_{re}) \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 \quad (8)$$

$$\sigma_\theta = P_0 + (P_0 - \sigma_{re}) \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 \quad (9)$$

$$u_r = \frac{R_0^2}{2G} \left(P_0 - \frac{2P_0 - q}{K_p + 1} \right) \frac{1}{r} \quad (10)$$

• تنش‌ها و جابجایی شعاعی در منطقه پلاستیک

$$\sigma_r = -\frac{q}{K_p - 1} + \left(P_i + \frac{q}{K_p - 1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{(K_p - 1)} \quad (11)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{q}{K_p - 1} + K_p \left(P_i + \frac{q}{K_p - 1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{(K_p - 1)} \quad (12)$$

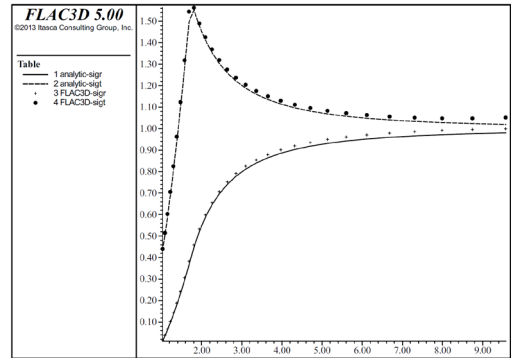
$$u_r = \frac{r}{2G} \left[(2\nu - 1) \left(P_0 + \frac{q}{K_p - 1} \right) + \frac{(1 - \nu)(K_p^2 - 1)}{K_p + K_{ps}} \left(P_i + \frac{q}{K_p - 1} \right) \left(\frac{R_0}{a} \right)^{(K_p - 1)} \left(\frac{R_0}{r} \right)^{(K_{ps} + 1)} + \left(\frac{(1 - \nu)(K_p K_{ps} + 1)}{K_p + K_{ps}} - \nu \right) \left(P_i + \frac{q}{K_p - 1} \right) \left(\frac{r}{a} \right)^{(K_p - 1)} \right] \quad (13)$$

$$K_{ps} = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (14)$$

در معادلات فوق، ν ضریب پواسون، ψ زاویه اتساع و G مدول برشی است.

در شکل ۳ ابعاد مدل ساخته شده در FLAC^{3D} و در شکل ۴ شرایط مرزی نشان داده شده است. به دلیل وجود دو صفحه تقارن، تنها یک چهارم مساله شبکه بندی شده است (شکل ۵).

به حل دقیق ریاضی در محیط الاستیک با استفاده از روابط کرش است که حداکثر فاصله تحت تاثیر یک فضای زیرزمینی، دو تا سه برابر قطر آن تخمین زده می‌شود و پس از این فاصله، تنش‌ها تقریباً به وضعیت اولیه خود بازمی‌گردند [۲۱]. با بررسی تغییر تنش‌ها در زون‌ها نسبت به فاصله از مرکز تونل در شکل ۶ مشخص شد که در فاصله تقریبی ۱۰ برابر شعاع تونل، درصد اختلاف میان تنش اولیه (P_0) و تنش مجدد در اثر حفاری (σ_r و σ_θ) به کمتر از ۲ درصد رسیده که قابل چشم‌پوشی است. بنابراین ابعاد مدل از مرکز تونل ۱۰ برابر شعاع تونل در نظر گرفته شده است که با توجه به شعاع ۲/۵ متری، باید مرز مدل از طرفین ۲۵ متر لحاظ شود (شکل ۸). پس از نهایی شدن شکل و ابعاد مدل، تعداد نهایی زون‌ها به ۱۶۱۲۸ زون رسید.



شکل ۶: تنش‌ها (خطوط: مقادیر تحلیلی؛ نقاط: مقادیر عددی)

Fig. 6. Stress solution comparison – (analytical values = lines; numerical values = crosses)

۵-۳- مدل رفتاری و خصوصیات مصالح

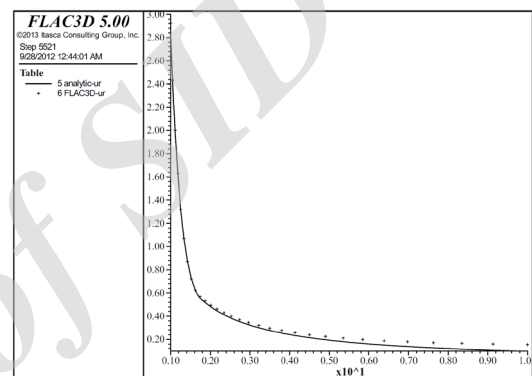
بسته به شرایط مسئله و نوع محیط، می‌توان از مدل‌های رفتاری مختلفی در نرم‌افزار FLAC^{3D} وجود دارد، استفاده نمود. از میان مدل‌های رفتاری موجود در این نرم‌افزار، مدل رفتاری موهر-کلمب مدل مناسبی برای حالت پلاستیک توده‌سنگ و خاک بوده که نمایانگر موادی است که تنها در اثر برش به حد تسلیم می‌رسند. برای تعریف مدل موهر-کلمب باید سه پارامتر الاستیک ماده شامل مدول حجمی، مدول بالک و دانسیته و دو پارامتر پلاستیک ماده شامل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مشخص باشند [۲۱].

تحلیل عددی برای زون ژئوتکنیکی II که مطابق شکل ۲ دارای بیشترین روباره سنگی در مسیر تونل سبزکوه می‌باشد، انجام شده است. بر اساس داده‌های جدول ۲ و با فرض دانسیته 2700 kg/m^3 برای سنگ‌های زون II مسیر تونل سبزکوه، می‌توان ۵ پارامتر لازم برای مدل رفتاری موهر-کولمب را محاسبه کرد.

۵-۴- شرایط اولیه و مرزی

شرایط مرزی مساله به گونه‌ای است که باید از مدل‌سازی مستقیم روباره ۱۱۰۰ متری در زون II به دلیل بالا رفتن حجم و زمان محاسبات اجتناب نمود. بنابراین تنها ۲۵ متر از روباره تونل مدل شده و مابقی به عنوان یک بار ثابت به مرز فوقانی اعمال می‌شود. با این کار زمان حل مساله بسیار کمتر خواهد شد. همچنین مرزها مطابق شکل ۹ با شرایط تکیه‌گاهی غلتکی و مفصلی مقید شده‌اند. ضمناً شرایط تنش اولیه ناشی از وزن روباره بوده و ضریب تنش منطقه ۰/۷ لحاظ شده است.

با توجه به اینکه آرایش سگمنت‌های تونل در هر رینگ نسبت به رینگ مجاور متفاوت است و هدف اصلی این مطالعه، بررسی تاثیر درزه‌های سگمنتی بر رفتار این سگمنت‌ها است نمی‌توان تنها نصف و یا یک‌چهارم مدل تونل سبزکوه را ساخت و مورد تحلیل قرار داد. به عبارت دیگر مطابق شکل ۱۰، وجود درزه‌های طولی و محیطی مانع از متقارن شدن حلقه‌های



شکل ۷: جابجایی شعاعی (خط: مقادیر تحلیلی؛ نقاط: مقادیر عددی)

Fig. 7. Radial displacement solution comparison – (analytical values = lines; numerical values = crosses)

با توجه به نمودارهای نشان داده شده در شکل‌های ۶ و ۷ مقدار متوسط خطای نسبی برای تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها کمتر از ۲ درصد است. این مقدار خطا قابل چشم‌پوشی بوده و نتایج عددی حاصل از نرم‌افزار قابل اعتماد است.

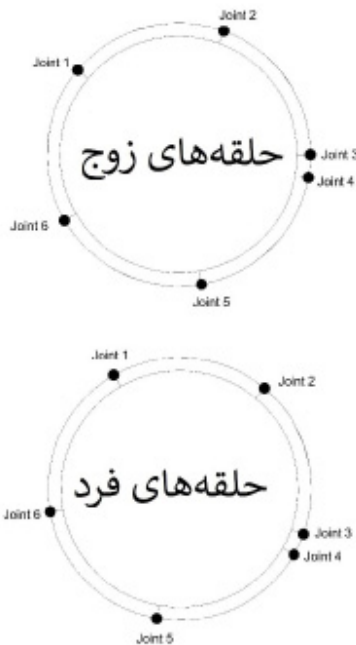
۵-۲- هندسه مدل عددی تونل سبزکوه

در روش تفاضل محدود، المان یا زون، کوچکترین واحد هندسی است که برای آن تغییرات یک پارامتر در اثر تغییر شرایط سنجیده می‌شود (مانند تنش در اثر کرنش). این المان‌ها می‌توانند اشکال مختلفی مانند آجری، گوه‌ای، هرمی و چهار وجهی داشته باشند و برای ساخت هندسه مدل به کار روند [۲۱]. برای مدل‌سازی تونل سبزکوه از المان‌های آجری و گوه‌ای استفاده شده که در راستای شعاع تونل به سمت مرزها، ابعادشان بیشتر می‌شود^۲ (شکل ۸).

ابعاد یک مدل عددی با هدف به حداقل رسیدن آشفتگی در مرزها در اثر حفاری فضای زیرزمینی تعیین می‌شود. ایده اولیه در این زمینه مربوط

- 1 Brick
- 2 radially graded mesh around cylindrical-shaped tunnel

در یک امتداد، حلقه‌ها نسبت به یکدیگر تحت زاویه $\pm 20^\circ$ درجه چرخش یافته‌اند. مهمترین عامل چرخش سگمنت‌ها نسبت به یکدیگر در حلقه‌های متوالی، امکان آب‌بندی بهتر پوشش تونل و جلوگیری از ایجاد خطوط ضعف در پوشش سگمنتی است. بر این اساس حلقه‌های زوج و فرد مطابق با شکل ۱۰ در مدل مشخص شده‌اند.



شکل ۱۰: موقعیت و شماره درزه‌های طولی در حلقه‌های فرد و زوج

Fig. 10. Position and number of longitudinal joints in even and odd rings

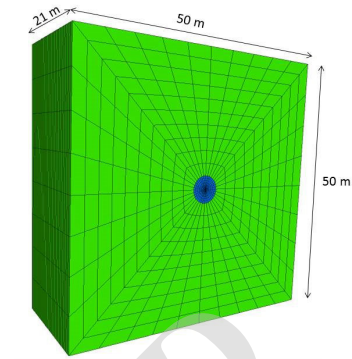
برای ایجاد پوشش تونل به صورت یک پوشش سگمنتی، باید درزه‌های سگمنتی پس از ایجاد پوشش تونل در موقعیت‌های خاصی ایجاد شوند. این درزه‌ها همان درزه‌های طولی و محیطی بین سگمنت‌ها هستند که در روش عددی، به صورت لینک^۲‌های طولی و محیطی بین المان‌های سازه‌ای پوسته‌ای تعریف می‌شوند که در شکل ۱۱ نشان داده شده‌اند. در این لینک‌ها، سگمنت‌ها مجازند تا نسبت به یکدیگر حرکت داشته باشند. هر کدام از این لینک‌ها شش درجه آزادی دارند که جابجایی یا چرخش آن‌ها می‌تواند صلب باشد و یا به صورت یک فنر تغییرشکل خطی^۳ و یا فنر تغییرشکل تسلیمی برشی^۴ عمل کند. با توجه به اینکه هدف بررسی تاثیر درزه‌های سگمنتی بر رفتار پوشش بتنی تونل است، عملکرد این درزه‌ها غیرصلب لحاظ شده است. مقادیر سختی این لینک‌ها بر اساس روابط (۲) و (۴) تعیین شده و در جدول ۴ ارائه شده است.

2 Link

3 Linear Deformation Spring

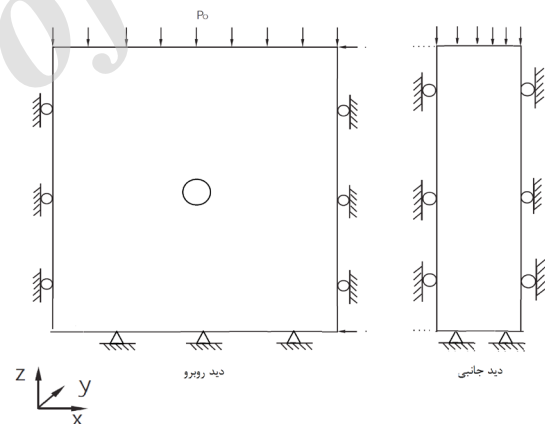
4 Shear Yield Deformation Spring

سگمنتی شده و نمی‌توان هیچ صفحه تقارنی برای آن در نظر گرفت. لاجرم با علم بر افزایش حجم و زمان محاسبات، مدل به صورت کامل تحلیل شده است.



شکل ۸: ابعاد مدل تونل سبزکوه در نرم‌افزار FLAC^{3D}

Fig. 8. Geometry of Sabzkouh water conveyance tunnel in FLAC^{3D} Software



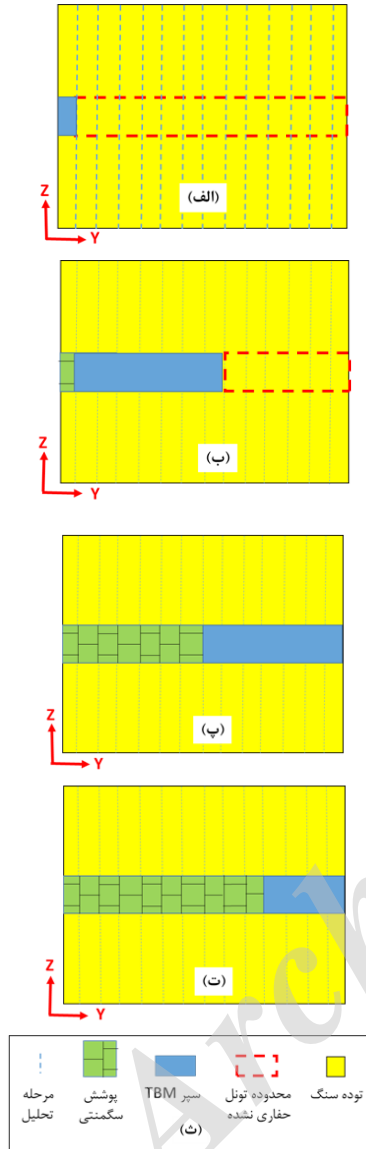
شکل ۹: شرایط اولیه و مرزی تونل سبزکوه در نرم‌افزار FLAC^{3D}

Fig. 9. Initial and boundary conditions for Sabzkouh water conveyance tunnel in FLAC^{3D} Software

۵-۵- مدل‌سازی پوشش سگمنتی و درزه‌های آن
پوشش بتنی تونل به دلیل ضخامت کم آن نسبت به قطر تونل با المان‌های سازه‌ای پوسته‌ای^۱ مدل شده است. برای بررسی تاثیر درزه‌ها بر روی رفتار پوشش سگمنتی در مدل‌های عددی، تمامی تاریخچه‌های نیروی محوری، ممان خمشی، جابجایی قائم و افقی در موقعیت درزه‌های سگمنتی ثبت و پس از اجرای برنامه، قرائت شده تا امکان مقایسه در شرایط یکسان را برای همه مدل‌ها فراهم سازد. به منظور جلوگیری از تداوم درزه‌های طولی

1 Shell Structural Elements

پوشش یکپارچه پرداخت. تنها تفاوت این مدل‌سازی با مدل‌سازی قبلی در این است که پوشش تونل بدون درزه‌های سگمندی و به صورت یکپارچه مدل می‌شود. در نهایت نتایج به دست آمده از هر دو شیوه تحلیل و با یکدیگر مقایسه خواهد شد.



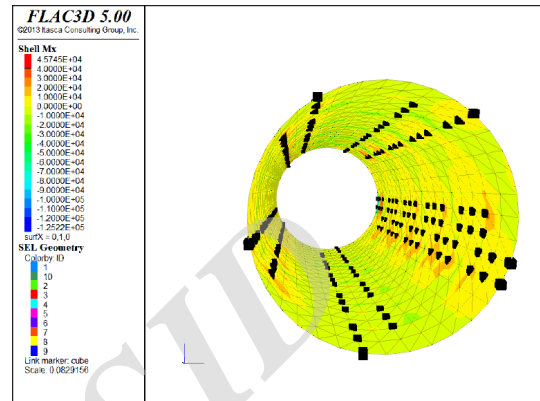
شکل ۱۲: مراحل حل مساله: (الف) ورود اولین گام سپر فولادی ماشین تونل‌زنی به داخل مدل - مرحله ۱؛ (ب) نصب اولین حلقه سگمندی پشت سپر فولادی - مرحله ۸؛ (پ) رسیدن سپر فولادی به انتهای مدل - مرحله ۱۵؛ (ت) خروج ۴/۵ متر از سپر فولادی از مدل - مرحله ۱۸؛ (ث) راهنما

Fig. 12. Stages of numerical analysis: (a) the first stroke (i.e. 1.5 m) of TBM's steel shield is imported into the model - 1st stage; (b) the first segmental ring is installed after the tail shield - 8th stage; (c) the steel shield is arrived to end of the model - 15th stage; (d) 3 strokes (i.e. 4.5 m) of TBM's steel shield is exited from the model - 18th stage; (e) legend.

جدول ۴: مقادیر سختی نرمال و برشی درزه‌ها برحسب (N/m)

Table 4. Normal stiffness and shear stiffness of segmental joints (in N/m)

سختی برشی (K_s)	سختی نرمال (K_n)
1.5e8	1.1e8



شکل ۱۱: موقعیت درزه‌های طولی در مدل عددی

Fig. 11. Position of longitudinal joints in even and odd rings

۵-۶- مراحل حل مساله

پس از ساخت هندسه مدل، تخصیص مدل رفتاری و خصوصیات مصالح به زون‌ها و نیز اعمال شرایط اولیه و مرزی باید مدل به تعادل اولیه برسد (مرحله صفر). پس از به تعادل رسیدن مدل، جابه‌جایی‌ها و سرعت‌های گره‌ای صفر شده و حفاری تونل اجرا می‌شود. مطابق شکل ۱۲ که مراحل مختلف مدل‌سازی را نشان می‌دهد، در مرحله ۱، سپر فولادی ماشین تونل‌زنی به میزان یک گام حفاری داخل تونل حفاری شده می‌شود و مدل دوباره به تعادل می‌رسد. گام پیشروی تونل در هر بار ۱/۵ متر لحاظ شده که معادل عرض یک سگمنت پیش‌ساخته است (جدول ۲). پس از به تعادل رسیدن مدل، دوباره فرایند حفاری و پیشروی سپر ماشین تونل‌زنی اجرا شده و مدل حل می‌شود. این فرایندهای تکراری تا زمانی که طول ۱۰/۵ متری سپر وارد تونل شود ادامه خواهد یافت. سپس اولین حلقه سگمندی به گونه‌ای ساخته می‌شود که به جداره سنگی تونل متصل باشد. پس از تکمیل شبیه‌سازی فرایند حفاری و سگمنت‌گذاری مساله حل خواهد شد (مرحله ۸) و جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها در سنگ و نیروهای داخلی سگمنت‌ها و تغییر شکل آن‌ها در موقعیت درزه‌های سگمندی ثبت می‌شود. سپس گام‌های بعدی حفاری تونل و سگمنت‌گذاری و حل مساله انجام می‌شود به گونه‌ای که در نهایت سپر فولادی به انتهای مدل می‌رسد (مرحله ۱۵). در تمام این مراحل سگمنت‌ها نسبت به سگمنت‌های مرحله قبل ۲۰ درجه چرخیده‌اند. این فرایندهای تکراری تا نصب ۱۰ حلقه سگمندی و خروج ۴/۵ متر از سپر ماشین تونل‌زنی از مدل ادامه می‌یابد (مرحله ۱۸). پس از اتمام عملیات مدل‌سازی پوشش سگمندی، باید با استفاده از مدل جدیدی به بررسی رفتار

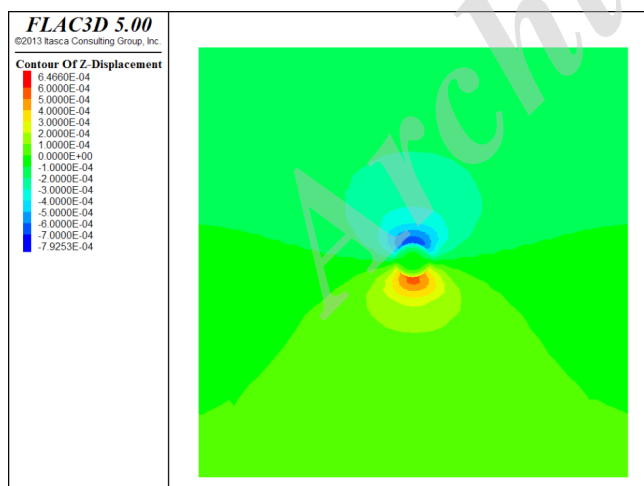
در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ جابجایی قائم توده‌سنگ اطراف تونل به ترتیب برای پوشش یکپارچه و پوشش سگمتی نمایش داده شده است. بر اساس این شکل‌ها، جابه‌جایی‌های پوشش سگمتی به دلیل صلبیت کمتر، تا ۲ برابر بیشتر از جابجایی‌های پوشش یکپارچه می‌باشد. در جدول ۵ نیز بیشینه جابجایی در سقف و کف تونل پس از نصب پوشش یکپارچه به ترتیب برابر 4×10^{-4} و $6/5 \times 10^{-4}$ متر و پس از نصب پوشش سگمتی به ترتیب 3×10^{-4} و $1/6$ متر ارائه شده است.

با توجه به اینکه نسبت تنش افقی به قائم برابر با $0/7$ در نظر گرفته شده است، لذا بیشینه جابه‌جایی در جداره تونل در راستای قائم رخ داده است. در صورتی که عمق حفاری تونل کم باشد، این جابه‌جایی‌های قائم می‌تواند معرف نشست زمین باشد ولی در مقاله حاضر، چون عمق تونل بیش از ۱۰۰۰ متر بوده و فقط ابعاد خاصی از توده‌سنگ مجاور به عنوان شرایط مرزی مدل شده است، این جابه‌جایی‌ها صرفاً جابجایی قائم توده‌سنگ اطراف تونل است.

جدول ۵: بیشینه جابجایی قائم سنگ پس از نصب پوشش (برحسب میلی‌متر)

Table 5. Maximum vertical displacement of the surrounding rock after installation of lining

پوشش سگمتی	پوشش یکپارچه	
۱/۶۲	۰/۶۵	کف تونل
-۲/۰۱	-۰/۷۹	سقف تونل

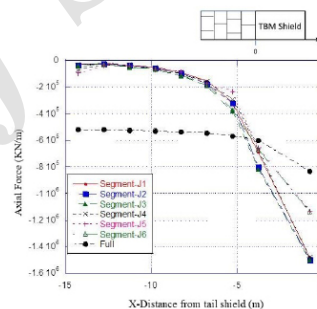


شکل ۱۵: جابجایی قائم سنگ پس از نصب پوشش بتنی یکپارچه

Fig. 15. Vertical displacements of the surrounding rock after installation of full (continuous) lining

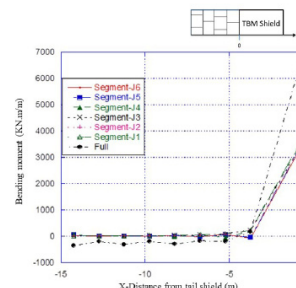
۵-۷ رفتار پوشش یکپارچه و پوشش سگمتی تحت فشار زمین

برای بررسی اثر درزه‌های سگمتی، پوشش تونل یک بار به صورت یکپارچه (بدون درزه‌های محیطی و طولی) و بار دیگر به صورت سگمتی مدل شده است. در اثر پیشروی ماشین تونل‌زنی، نیروی محوری و ممان خمشی به وجود آمده در پوشش یکپارچه و درزه‌های پوشش سگمتی به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. طبق شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نیروهای داخلی برای همه‌ی درزه‌های طولی استخراج شده که با عنوان Segment-J مشخص شده‌اند. شماره‌گذاری این درزه‌ها بر اساس شماره درزه‌ها در شکل ۱۰ می‌باشد. همچنین محور افقی، فاصله‌ی سگمت‌ها را از انتهای سپر فولادی ماشین تونل‌زنی به گونه‌ای نشان می‌دهد که با دور شدن سگمت‌ها از آن، این فاصله به صورت منفی تعریف می‌شود. بر اساس شکل ۱۳، در فاصله ۱۵- تا ۵- نیروی محوری در پوشش یکپارچه تا ۲۵ برابر بیشتر از نیروی محوری در پوشش سگمتی است. در حالی که در فاصله ۵- تا ۰، این اختلاف عکس شده و حداکثر به ۲ برابر می‌رسد. همچنین طبق شکل ۷، ممان خمشی در پوشش یکپارچه همواره از پوشش سگمتی بیشتر است و بیشینه این اختلاف به ۲۰ برابر می‌رسد.



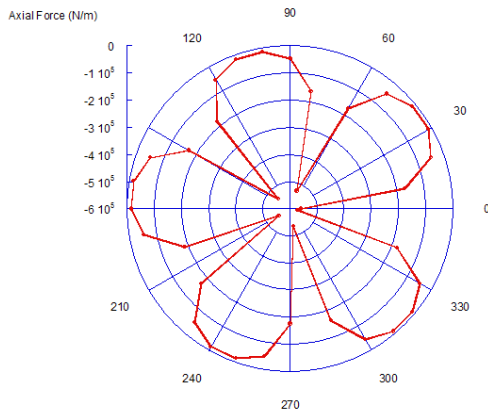
شکل ۱۳: نیروی محوری وارد بر پوشش سگمتی و پوشش یکپارچه در محل درزه‌ها بر اساس فاصله از انتهای سپر

Fig. 13. Axial forces induced in both segmental and continuous linings locally in joints based on distance from tail skin



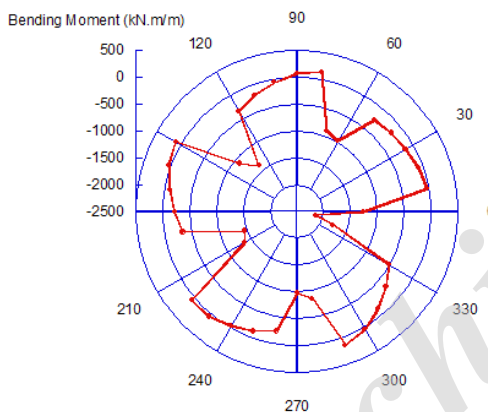
شکل ۱۴: ممان خمشی وارد بر پوشش سگمتی و پوشش یکپارچه در محل درزه‌ها بر اساس فاصله از انتهای سپر

Fig. 14. Bending moments induced in both segmental and continuous linings locally in joints



شکل ۱۸: نیروی محوری وارد بر آخرین حلقه سگمتنی (مجاور انتهای سپر) تحت تزریق با فشار ۴ بار

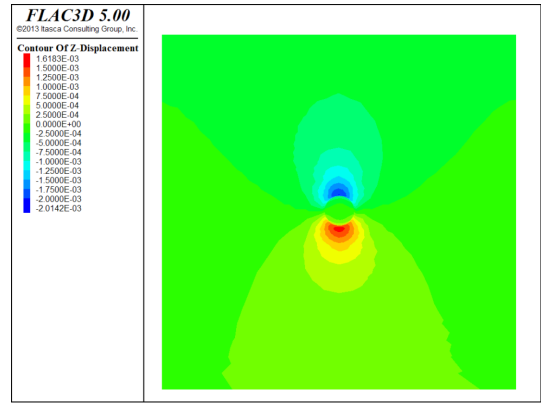
Fig. 18. Axial forces induced in the last segmental ring (near to the tail shield) under grouting pressure 4 bar



شکل ۱۹: ممان خمشی وارد بر آخرین حلقه سگمتنی (مجاور انتهای سپر) تحت تزریق با فشار ۴ بار

Fig. 19. Bending moments induced in the last segmental ring (near to the tail shield) under grouting pressure 4 bar

در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ به ترتیب نیروی محوری و ممان خمشی ایجاد شده در سگمت‌های حلقه آخر در برای سه فشار تزریق ۲، ۳ و ۴ بار نشان داده شده است. از شکل‌های ۲۰ و ۲۱ می‌توان دریافت که با افزایش فشار تزریق از ۲ به ۴ بار، نیروی محوری و ممان خمشی در درزه‌های سگمتی به ترتیب ۱۵ و ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. کاهش نیروی محوری ناشی از تاثیر فشار تزریق بر روی سنگ اطراف است. زیرا دوغاب با فشار زیاد می‌تواند بخشی از فشار زمین را جبران کرده و نیروی محوری وارد بر پوشش سگمتی را در موقعیت درزه‌ها کاهش دهد. کاهش ممان خمشی نیز متأثر از

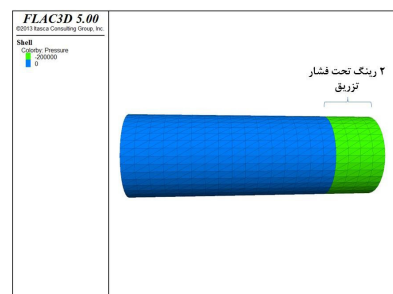


شکل ۱۶: جابجایی قائم سنگ پس از نصب پوشش بتنی سگمتی

Fig. 16. Vertical displacements of the surrounding rock after installation of full segmental lining

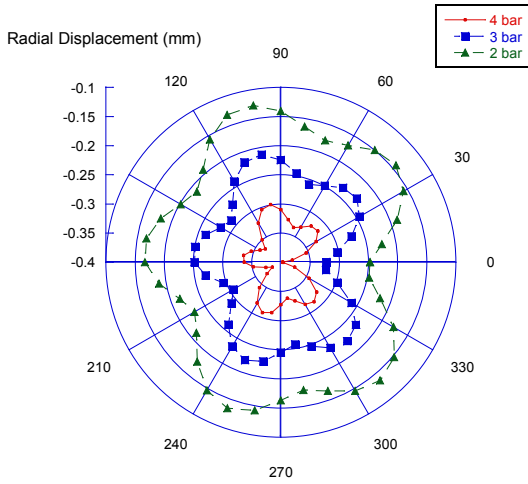
۵-۸- پوشش سگمتی تحت فشار تزریق دوغاب

برای بررسی تاثیر فشار تزریق دوغاب بر رفتار درزه‌های سگمتی، سه سطح فشار ۲، ۳ و ۴ بار بر دو حلقه متصل به انتهای سپر وارد شده است. این فشار مطابق شکل ۱۷ به صورت یکنواخت و بدون گردایان اعمال می‌شود (سگمت‌های سبز رنگ). این فشار چون مابین حلقه سگمتی و سنگ اعمال می‌شود علاوه بر سگمت‌ها، سنگ را نیز تحت تاثیر قرار می‌دهد. در اثر این تنش فشاری، بخشی از جابه‌جایی‌های سنگ خنثی و جبران می‌شود. از این رو در تونل‌های کم عمق، سطح زمین در بالای حلقه‌های تحت تزریق، نشست کمتری را نسبت به حالت بدون تزریق تجربه می‌کند. البته همانگونه که پیشتر بدان اشاره شد در صورت عدم کنترل این فشار، ممکن است که جابه‌جایی و پله‌شدگی در سگمت‌ها رخ داده و یا سگمت‌ها ترک بردارند. در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ نیروی محوری و ممان خمشی ایجاد شده در حلقه آخر (متصل به سپر فولادی) به ترتیب برای فشار تزریق ۴ بار نشان داده شده است. بر اساس این دو شکل، بیشینه نیروهای داخلی در موقعیت درزه‌ها رخ می‌دهد. بنابراین اتصالات به کار رفته در درزه‌ها باید استحکام کافی برای مقاومت در برابر این نیروها را داشته باشند. این اتصالات بیشتر به شکل پیچ و مهره‌ی فولادی هستند.



شکل ۱۷: موقعیت اعمال فشار تزریق به سگمت‌های تونل

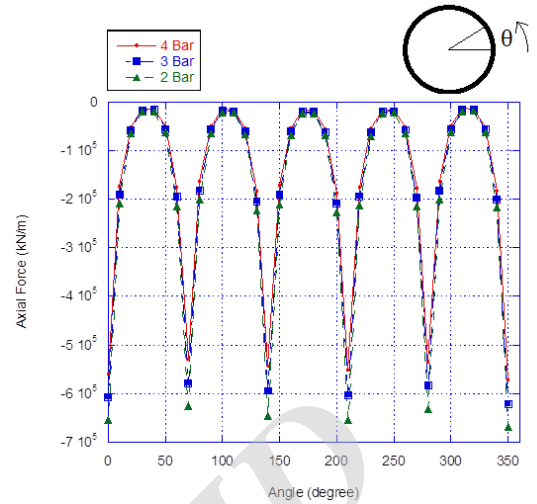
Fig. 17. Position of applying grouting pressure to tunnel's segments



شکل ۲۲: جابجایی شعاعی ایجاد شده در آخرین حلقه سگمتی (مجاور سپر انتهایی) تحت تزریق با فشارهای مختلف

Fig. 22. Radial displacements in the last segmental ring (near to the tale shield) due to various grouting pressures

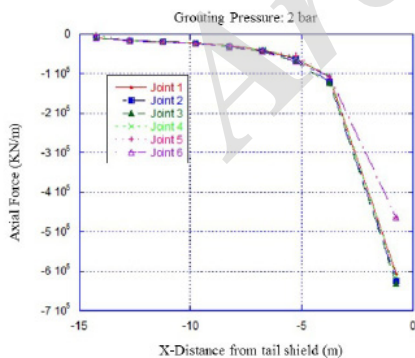
کاهش تنش اعمالی از سمت زمین بر روی پوشش سگمتی در اثر افزایش فشار تزریق است.



شکل ۲۰: نیروی محوری وارد بر آخرین حلقه سگمتی (مجاور انتهای سپر) تحت تزریق با فشارهای مختلف

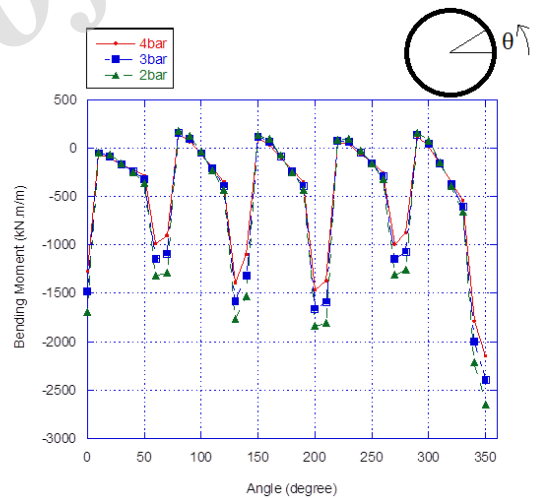
Fig. 20. Axial forces induced in the last segmental ring (near to the tail shield) under various grouting pressures

در شکل ۲۳ و ۲۴ به ترتیب روند تغییرات نیروی محوری و ممان خمشی در طول تونل برای حالت تزریق با فشار ۲ بار نشان داده شده است. در این شکل‌ها نیروهای داخلی سگمت‌ها از ابتدای مدل تا حلقه آخر (مجموعاً ۱۵ متر) ترسیم شده‌اند. بر اساس این دو شکل، نیروی محوری و ممان خمشی ایجاد شده در درزه‌ها برای سگمت‌های تحت فشار تزریق به مراتب بیشتر از سگمت‌هایی است که خارج از محدوده تزریق قرار دارند (سگمت‌های آبی رنگ در شکل ۱۷).



شکل ۲۳: روند تغییرات نیروی محوری در درزه‌های طولی سگمت‌ها بر اساس فاصله از انتهای سپر برای حالت تزریق با فشار ۲ بار

Fig. 23. Axial forces in longitudinal joints of segmental rings induced by grouting under pressure 2 bar

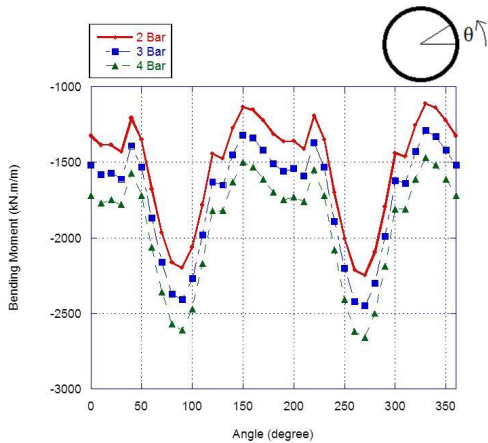


شکل ۲۱: ممان خمشی وارد بر آخرین حلقه سگمتی (مجاور انتهای سپر) تحت تزریق با فشارهای مختلف

Fig. 21. Bending moments induced in the last segmental ring (near to the tail shield) under various grouting pressures

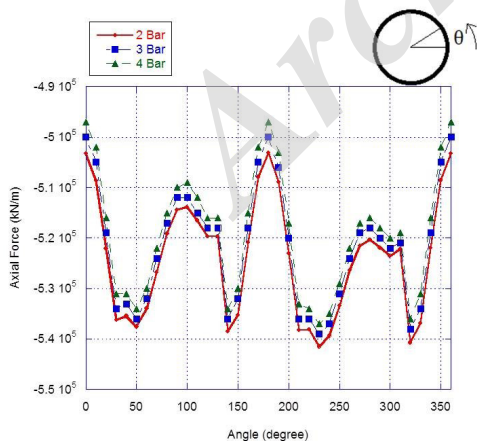
در شکل ۲۲ جابجایی شعاعی در حلقه آخر برای سه حالت تزریق با فشار ۲، ۳ و ۴ بار نشان داده شده است. بر اساس افزایش فشار تزریق از ۲ به ۴ بار، می‌تواند موجب افزایش جابجایی‌ها در پوشش سگمتی تا ۸۵ درصد شود.

جدول ۴، بیشینه جابه‌جایی‌های قائم در هر دو حالت مدل‌سازی یعنی پوشش بتنی یکپارچه و پوشش بتنی سگمتی به ترتیب ۰/۰۷۹ و ۰/۲۰۱ میلی‌متر بوده که کمتر از حد مجاز است و پایداری پوشش تونل تامین می‌شود. همچنین در خصوص کنترل تنش‌های وارده به پوشش سگمتی از نمودار اندرکنش نیروی محوری-ممان خمشی استفاده شده است (شکل ۲۷) به گونه‌ای که اگر نقاط مربوط به زوج مرتب (ممان خمشی، نیروی محوری) در داخل این نمودار قرار گیرند، ترکیب این نیروها نمی‌تواند بتن سگمتی‌ها را دچار شکست و گسیختگی کند و در نتیجه سگمتی‌ها پایدار هستند.



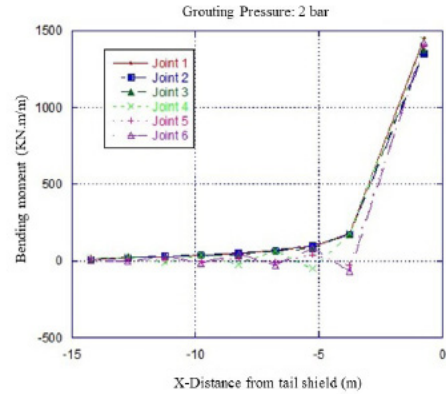
شکل ۲۵: ممان خمشی وارد بر آخرین مقطع پوشش یکپارچه (مجاور انتهای سپر) تحت تزریق با فشارهای مختلف

Fig. 25. Bending moments induced in the last section of full (continuous) lining (near to the tail shield) under various grouting pressures



شکل ۲۶: نیروی محوری وارد بر آخرین مقطع پوشش یکپارچه (مجاور انتهای سپر) تحت تزریق با فشارهای مختلف

Fig. 26. Axial forces induced in the last section of full (continuous) lining (near to tail shield) under various grouting pressures



شکل ۲۴: روند تغییرات ممان خمشی در درزه‌های طولی سگمتی‌ها بر اساس فاصله از انتهای سپر برای حالت تزریق با فشار ۲ بار

Fig. 24. Bending moments in longitudinal joints of segmental rings induced by grouting under pressure 2 bar

۵-۹- تاثیر فشار تزریق دوغاب بر پوشش یکپارچه

مشابه آنچه که در بخش ۵-۸ بیان شد، فشار تزریق بر روی پوشش یکپارچه تونل تحت سه حالت ۲، ۳ و ۴ بار اعمال می‌شود. در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ به ترتیب ممان خمشی و نیروی محوری به وجود آمده در پوشش یکپارچه در اثر تزریق با فشارهای ۲، ۳ و ۴ بار نشان داده شده است. در جدول ۶ درصد تغییرات نیروهای داخلی در اثر تغییر فشار ۳ و ۴ بار نسبت به فشار ۲ بار، برای پوشش سگمتی و یکپارچه ارائه شده است. بر این اساس، با افزایش فشار تزریق، نیروی محوری ایجاد شده در پوشش یکپارچه به میزان حداکثر ۰/۸ درصد کاهش می‌یابد که چندان چشمگیر نیست. این در حالی است که ممان خمشی وارد بر پوشش یکپارچه با افزایش فشار تزریق، تا ۱۹ درصد افزایش یافته که این تغییرات قابل ملاحظه است. این نتیجه ناشی از عملکرد درزه‌های سگمتی در افزایش صلبیت پوشش تونل است که باعث ناچیز شدن تاثیر فشار بر رفتار پوشش تونل می‌شود.

۵-۱۰- مقادیر مجاز جابه‌جایی‌ها و نیروهای داخلی

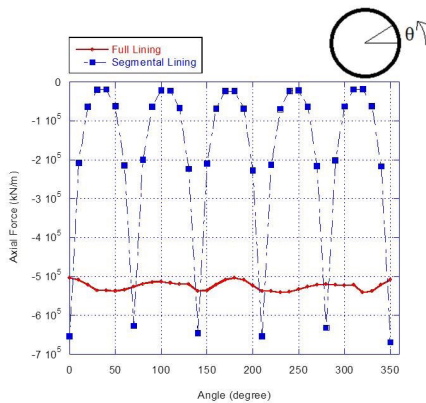
مقدار مجاز جابه‌جایی سگمتی‌ها نسبت به یکدیگر بر حسب نوع کاربری تونل (مترو، انتقال آب و غیره)، شرایط بارگذاری (مقدار و جهت بار، بارگذاری دینامیکی و استاتیکی و غیره)، مقاومت سگمت (ضخامت، میزان تسلیح، مقاومت بتن و غیره) و مقاومت سنگ (سنگ پایدار، نیمه پایدار و یا ناپایدار) متغیر است. در تونل انتقال آب سبزکوه، جابجایی مجاز سگمتی‌های پیش ساخته بتنی حداکثر ۱ سانتی‌متر بوده که اصطلاحاً پله‌شدگی نام دارد. در اثر افزایش مقدار پله‌شدگی از حد مجاز، مشکلات متعددی ممکن است در کف‌تونل (در اثر اعوجاج سیستم ریلی تونل) و در سقف و دیواره‌های آن (در اثر آسیب رسیدن به لوله هوارسانی و نوار نقاله باطله) رخ دهد. بر اساس

جدول ۶: تغییرات نیروهای داخلی در اثر تغییر فشار تزریق برای پوشش سگمتی و یکپارچه

Table 6. Effects of the grouting's pressure on the internal forces for both full (continuous) and segmental linings

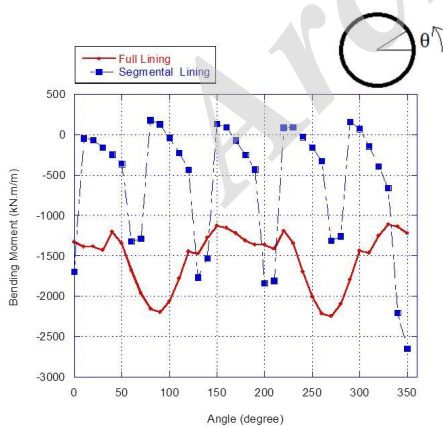
پوشش سگمتی		پوشش یکپارچه		
درصد تغییرات در فشار ۴ بار (%)	درصد تغییرات در فشار ۳ بار (%)	درصد تغییرات در فشار ۴ بار (%)	درصد تغییرات در فشار ۳ بار (%)	
-۱۴/۵	-۷/۲	-۰/۸	-۰/۴	نیروی محوری
-۱۹	-۹/۵	۱۸/۴	۹/۲	ممان خمشی

سگمتی و یکپارچه به ازای فشار تزریق ۲ بار ارائه شده است.



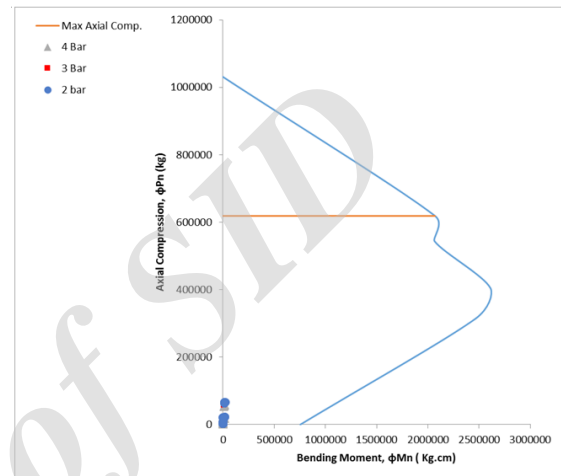
شکل ۲۸: نیروهای محوری وارد بر آخرین مقطع پوشش یکپارچه و سگمتی (مجاور انتهای سپر) تحت تزریق با فشار ۲ بار

Fig. 28. Axial forces induced in the last section of full lining and segmental lining (near to the tail shield) under grouting pressure 2 bar



شکل ۲۹: ممان‌های خمشی وارد بر آخرین مقطع پوشش یکپارچه و سگمتی (مجاور انتهای سپر) تحت تزریق با فشار ۲ بار

Fig. 29. Bending moments induced in the last section of full lining and segmental lining (near to the tail shield) under grouting pressure 2 bar



شکل ۲۷: نمودار اندرکنش نیروی محوری - ممان خمشی جهت کنترل پایداری سگمتی‌ها تحت فشار تزریق ۲، ۳ و ۴ بار

Fig. 27. Interaction diagram of Axial force – Bending moment to check stability of segments under grouting pressures 2, 3 and 4 bar

۵-۱۱- مقایسه رفتار پوشش سگمتی و یکپارچه تحت فشار تزریق پس از بررسی جداگانه‌ی تاثیر فشار تزریق بر میزان نیروهای داخلی پوشش سگمتی (درزه‌دار) و پوشش یکپارچه (بدون درزه)، باید به مقایسه هم‌زمان این دو نوع پوشش پرداخت. در شکل ۲۸ نیروی محوری به وجود آمده در اثر فشار تزریق ۲ بار، در پوشش یکپارچه و سگمتی تونل با یکدیگر مقایسه شده است. همان‌گونه که مشخص است نیروی محوری به وجود آمده در پوشش سگمتی جز در موقعیت درزه‌ها تا ۲۶ برابر کمتر از پوشش یکپارچه است. این در حالی است که در پوشش یکپارچه، نیروی محوری تقریباً یکنواخت بوده و می‌توان مقدار متوسطی را برای آن در نظر گرفت. در شکل ۲۹ نیز ممان خمشی ایجاد شده در پوشش سگمتی و یکپارچه تحت فشار تزریق ۲ بار به صورت هم‌زمان نشان داده شده است. در پوشش یکپارچه، مقدار ممان خمشی در سقف بیشینه و در دیواره‌ها کمینه است. در حالی که در پوشش سگمتی، ممان خمشی بیشینه تنها در موقعیت درزه‌ها رخ می‌دهد و بدنه‌ی سگمتی‌ها تا ۶ برابر ممان کمتری را تجربه می‌کنند. در جدول ۷، مقادیر کمینه و بیشینه نیروی محوری و ممان خمشی برای پوشش

یابد. علاوه بر این کاهش ممان خمشی نیز متاثر از یکنواختی فشار تزریق در اطراف سگمنت‌ها و جبران بارهای وارده از سنگ اطراف سگمنت‌ها است. این نتایج در حالی ارائه می‌شود که با در نظر گرفتن پوشش بتنی به صورت یکپارچه، افزایش فشار تزریق تاثیر چندانی بر مقدار نیروی محوری ندارد به طوری که با افزایش فشار تزریق از ۲ بار به ۴ بار تنها حدود ۰/۸ درصدی از مقدار نیروی محوری کاهش می‌یابد. این درحالی است که تاثیر افزایش فشار تزریق بر ممان خمشی پوشش یکپارچه، صعودی و قابل ملاحظه است به طوری که به ازای افزایش فشار تزریق از ۲ بار به ۴ بار، ممان خمشی به میزان حدود ۱۸ درصد افزایش می‌یابد. این رفتار به دلیل افزایش صلبیت پوشش یکپارچه به دلیل نداشتن درزه‌های سگمنتی است.

با مقایسه همزمان پوشش بتنی سگمنتی و یکپارچه تحت فشار تزریق یکسان (۲ بار) می‌توان گفت که نیروی محوری به وجود آمده در پوشش سگمنتی جز در موقعیت درزه‌ها به مراتب کمتر از پوشش یکپارچه است. در محل درزه‌ها، نیروی محوری ایجاد شده در پوشش سگمنتی حدود ۱۹ درصد بیشتر از پوشش یکپارچه است. در پوشش یکپارچه، ممان خمشی بیشینه در سقف تونل رخ داده ولی در پوشش سگمنتی، ممان خمشی بیشینه تنها در موقعیت درزه‌ها ایجاد شده و بدنه‌ی سگمنت‌ها به مراتب ممان کمتری را تجربه می‌کند.

در مورد جابجایی شعاعی پوشش سگمنتی نیز باید اشاره کرد که با افزایش فشار تزریق، این جابه‌جایی‌ها افزایش می‌یابند. بر این اساس افزایش فشار تزریق از ۲ به ۴ بار، می‌تواند موجب افزایش جابه‌جایی‌ها در پوشش سگمنتی تا ۸۵ درصد شود. یکی از پدیده‌های مرسوم در تزریق تماسی پشت سگمنت‌ها این است که در صورت عدم کنترل فشار تزریق، ممکن است بار قابل توجه‌ای به طور موضعی به سگمنت‌ها وارد شود و موجب جابجایی، ترک خوردگی و در نهایت شکست سگمنت شود.

با جمع‌بندی نتایج فوق می‌توان اظهار داشت که فرض یکپارچگی برای پوشش سگمنتی تونل و نادیده گرفتن تاثیر درزه‌ها، طراحی را غیراقتصادی و غیرفنی کرده و نمی‌تواند فرض مناسبی باشد. در حالی که با در نظر گرفتن نقش درزه‌ها در کنترل رفتار پوشش سگمنتی، می‌توان پیش‌بینی‌های صحیح و قابل‌قبولی را در فاز طراحی و اجرا داشت. به عبارت دیگر با مدل‌سازی پوشش تونل به صورت سگمنتی علاوه بر کاهش صلبیت پوشش، نیروهای داخلی کمتری در پوشش ایجاد شده و طراحی‌ها منطقی‌تر و اقتصادی‌تر خواهد شد و از آن جایی که بیشینه نیروهای داخلی در درزه‌ها رخ می‌دهد و نه در بدنه سگمنت‌ها، باید در طراحی‌سازه‌ای توجه ویژه‌ای به تقویت این درزه‌ها معطوف داشت.

مراجع

- [1] N.A. Do, D. Dias, P. Oreste, I. Djeran-Maigre, 2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior, *Tunneling and Underground Space Technology*, 37 (2013) 115-127.

جدول ۷: مقادیر کمینه و بیشینه نیروی محوری و ممان خمشی برای پوشش سگمنتی و یکپارچه به ازای فشار تزریق ۲ بار

Table 7. Maximum and minimum values of internal forces for both full (continuous) and segmental linings under grouting pressure 2 bar

نوع پوشش	نیروی محوری kN/m		ممان خمشی kN.m/m	
	بیشینه	کمینه	بیشینه	کمینه
یکپارچه	-۵/۵۴	-۵۵	-۲۵۰۰	-۱۱۰۰
سگمنتی	-۶/۵۷	-۴۲	-۲۷۰۰	۰

۶- نتیجه‌گیری

با توجه به مدل‌سازی عددی انجام شده در این مطالعه، می‌توان ادعا داشت که مدل‌سازی پوشش تونل به صورت یکپارچه و سگمنتی نتایج متفاوتی را در پی دارد که باید در طراحی‌ها در نظر داشت. این تفاوت‌ها ناشی از ماهیت رفتاری خاص درزه‌های سگمنتی است که وابسته به سختی نرمال و برشی درزه‌ها است. موارد زیر به عنوان نتیجه‌گیری این مطالعه ارائه می‌شوند.

حضور درزه‌های سگمنتی باعث می‌شود تا صلبیت پوشش کاهش یابد و نیروی محوری و ممان خمشی سگمنت‌ها نسبت به حالتی که سگمنت‌ها، یکپارچه طراحی شده‌اند و درزه‌ای ندارند، به ترتیب ۲۵ تا ۲۰ برابر کمتر باشد. این اختلاف معنادار می‌تواند طراحی سگمنت‌های پیش‌ساخته بتنی را از منظر فنی و اقتصادی تحت تاثیر قرار دهد. زیرا نیروهای داخلی سگمنت‌ها یکی از پارامترهای اصلی برای طراحی ضخامت سگمنت‌ها و میزان تسلیح فولادی‌آن‌ها است. هرچه مقادیر این نیروها بیشتر باشد، طراح بایستی ضخامت سگمنت‌ها و میزان تسلیح فولادی آن را افزایش دهد تا بارهای وارده به خوبی تحمل شوند.

مقدار بیشینه جابه‌جایی‌های قائم در پوشش بتنی سگمنتی تا ۳ برابر بیشتر از پوشش بتنی یکپارچه است که ناشی از کاهش صلبیت پوشش تونل در اثر حضور درزه‌های سگمنتی است. این جابه‌جایی‌ها کمتر از حد مجاز (یک سانتی‌متر) بوده و گسیختگی و شکست در بدنه سگمنت‌ها و در محل درزه‌ها رخ نمی‌دهد.

با اعمال فشار تزریق به پوشش سگمنتی تونل، رفتار خاصی در آن القاء می‌شود. طبق نتایج مدل‌سازی عددی ارائه شده در این مطالعه تحت بار یکنواخت تزریق، بیشینه نیروهای داخلی در موقعیت درزه‌ها رخ می‌دهد. در سگمنت‌ها با افزایش فشار تزریق از ۲ بار به ۴ بار، نیروی محوری حدود ۱۴/۵ درصد و ممان خمشی حدود ۱۹ درصد کاهش می‌یابد. برای توضیح این پدیده باید گفت که کاهش نیروی محوری ناشی از تاثیر فشار تزریق برای جبران بخشی از بار وارده از سنگ اطراف به روی پوشش سگمنتی است که باعث شده نیروی محوری وارد بر پوشش سگمنتی در موقعیت درزه‌ها کاهش

- [12] T. Kasper, G. Meschke, A numerical study of the effect of soil and grout material properties and cover depth in shield tunneling, *Computers and Geotechnics*, 33(4) (2006a) 234-247.
- [13] T. Kasper, G. Meschke, On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunneling, *Tunneling and Underground Space Technology*, 21(2) (2006b) 160-171.
- [14] T. Kasper, G. Meschke, A 3D finite element simulation model for TBM tunneling in soft ground, *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 28(14) (2004) 1441-1460.
- [15] C. B. M. Blom, Design philosophy of concrete linings for tunnels in soft soils, Delft University of Technology, Netherlands, 2002.
- [16] A. Salemi, M. Esmaeili, F. Sereshki, Normal and shear resistance of longitudinal contact surfaces of segmental tunnel linings, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 77 (2015) 328-338.
- [17] H. Mashimo, T. Ishimura, Evaluation of the load on shield tunnel lining in gravel, *Tunneling and underground space technology*, 18(2) (2003) 233-241.
- [18] K.M. Lee, X. Y. Hou, X. W. Ge, Y. Tang, An analytical solution for a jointed shield-driven tunnel lining, *International journal for numerical and analytical methods in Geomechanics*, 25(4) (2001) 365-390.
- [19] M. Karami, L. Faramarzi, R. Bagherpour, D.R. Gahrooei, Influence of geological features and geomechanical properties of rock mass on TBM selection for Sabzkouh water conveyance tunnel, in: *Journal of Engineering Geology*, University of Kharazmi, 2014, pp. 2169-2198.
- [20] M. Karami, Selection of mechanized excavation and segmental lining for Sabzkouh water conveyance tunnel to Choghakhor dam, *Isfahan University of Technology*, Iran, 2011 (in Persian).
- [21] M. Karami, B. Abrah, L. Faramarzi, a practical guide for FLAC3D software, , *Jahad publication*, Isfahan university of technology, Iran, 2012 (in Persian).
- [22] J. Salençon, Contraction quasi-statique d'une cavité à symétrie sphérique ou cylindrique dans un milieu elastoplastique, *Annales Des Ponts Et Chaussées*, 4 (1969) 231-236.
- [2] O. Arnau, C. Molins, Three dimensional structural response of segmental tunnel linings. *Engineering Structures*, 44 (2012) 210-221.
- [3] O. Arnau, C. Molins, Analytical study of the structural response of segmental tunnel linings based on an in situ loading test. Part 2: Numerical simulation, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26(6) (2011) 778-788.
- [4] W. Wittke, C. Erichsen, J. Gattermann, Stability analysis and design for mechanized tunneling, *PD-IWWCE & in Rock Ltd. (WBI)*, 2007.
- [5] C. B. M. Blom, E. J. Van der Horst, 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.
- [6] I. Hudoba, 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.
- [7] C. Klappers, F. Grubl, 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.
- [8] S. Teachavorasinskun, T. Chub-uppakarn, Influence of segmental joints on tunnel lining, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25(4) (2010) 490-494.
- [9] M. H. Ahmadi, A. Mortazavi, S. M. Davarpanah, H. Zarei, A numerical investigation of segmental lining joints interactions in tunnels-qomrud water conveyance tunnel, *Civil Engineering Journal*, 2(7) (2016) 334-347.
- [10] M. Nikkhash, S. S. Mousavi, S. Zare, O. Khademhosseini, Evaluation of structural analysis of tunnel segmental lining using beam-spring method and force-method (Case study: Chamshir water conveyance tunnel), *Journal of Mining and Environment*, (2016).
- [11] A. Lambrughi, L. M. Rodríguez, R. Castellanza, Development and validation of a 3D numerical model for TBM-EPB mechanized excavations. *Computers and Geotechnics*, 40 (2012), 97-113.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

M. Karami, Sh. Zare, Numerical study of the effects of segmental joints and grouting pressure on the behavior of tunnel segmental lining. *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(1) (2018) 3-18.

DOI: 10.22060/ceej.2017.11284.5002

