«مجله علمی تخصصی علوم و فنون سازندگی»

سال سوم ، شماره۱، فصل بهار ۱۴۰۱؛ صفحه ۱ الی ۱۰

علمی – تخصصی

استفاده از میله راهنمای توخالی اتصال سگمنت‌ها در حفاری مکانیزه تونل خط ۳ متروی مشهد

حمیدرضا معصومی پسند[۱*]، حسین رضایی مقدم[۱]، ناصر حاتمی[۱]، رامین محمدی[۱]

۱- کارشناسی ارشد(موسسه رهاب)

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۳)

چکیده

در سال‌های اخیر، تقاضا برای استفاده از پوشش سگمنتی تونل برای تونل طویل و عمیق در سنگ و تونل کم‌عمق در زمین نرم، به‌ویژه در مناطق شهری افزایش‌یافته است. ازنظر فنی و اقتصادی، ابعاد مناسب سگمنت و اتصالات آن همواره موردتوجه بسیاری از طراحان درزمینه تونل سازی بوده است. میله‌های راهنما در درزهای افقی سگمنت قرار می‌گیرد تا هم باعث نصب راحت‌تر سگمنت گردد و هم مقاومت برشی در محل درز را تأمین نماید. در این مقاله ابتدا به انواع درزها در سگمنت‌های تونل و نحوه عملکرد اتصالات در این درزها پرداخته می شود. در ادامه عملکرد میله راهنما (Guiding Rod) موردبررسی قرار می‌گیرد. در ادامه به بررسی نحوه عملکرد میله راهنما در تونل پرداخته می‌شود که برای این منظور ابتدا تونل با شرایط واقعی ژئوتکنیکی زمین محدوده پایانه تا شهرک ابوذر در نرم‌افزار plaxis2D مدل سازی می شود و مقادیر نیروهای محوری و برشی در سازه تونل به دست می‌آید. بر اساس خروجی‌های مدل plaxis2D میزان مقاومت برشی تحمل شده توسط مقطع سگمنت و میله راهنما ارائه می شود. در ادامه جهت تحلیل رفتار میله راهنما از نرم‌افزار آباکوس استفاده می شود و خروجی این مدل نشان می‌دهد که میله‌های راهنمای توپر و توخالی رفتاری خطی دارند و می‌توان از میله راهنمای توخالی نیز برای این قسمت از مسیر تونل استفاده نمود که در کاهش هزینه‌های اجرا تأثیرگذار خواهد بود.

کلیدواژه‌ها: حفاری مکانیزه، سگمنت، میله راهنما، خط ۳ مترو مشهد

۱. مقدمه

نگهداری دائمی تونل‌ها توسط قطعات پیش‌ساخته بتنی (سگمنت) انجام می‌شود. برای حفظ مقطع دایروی رینگ اتصالاتی در جهت طولی و شعاعی بین سگمنت‌ها استفاده می‌شود. میله‌های راهنما در درزهای افقی سگمنت قرار می‌گیرد تا هم باعث نصب راحت‌تر سگمنت گردد و هم مقاومت برشی در محل درز را تأمین نماید. معمولا طراحی سازه تونل (اعم از بتن، آرماتورگذاری و اتصالات) بر اساس حداکثر بارهای کل مسیر و داده‌های ژئوتکنیکی موجود انجام می‌شود. با بازطراحی میله‌های راهنما برای مقاطع مختلف حفاری تونل بر اساس داده‌های پایش رفتار زمین و تونل می‌توان هزینه تامین میله راهنما و بالطبع هزینه تمام شده ساخت پروژه را با رعایت اصول و آیین‌نامه‌های سازه کاهش داد. در این مقاله جهت بررسی عملکرد میله راهنما در رینگ در خط ۳ متروی مشهد (محدوده پایانه تا شهرک ابوذر)، یک مقطع از تونل در محدوده مذکور مورد مدل‌سازی و بررسی قرار گرفت. در ادامه به رفتار رینگ در محل اتصالات و انواع اتصالات پرداخته می‌شود[۱].

۲. درز های و اتصالات رینگ بتنی در حفاری مکانیزه

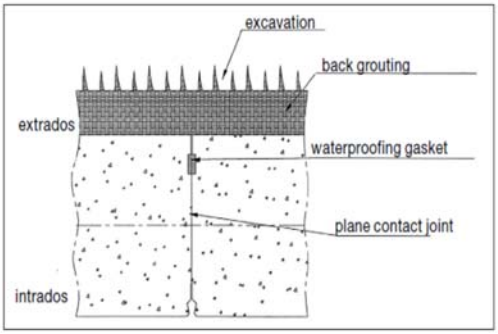
عملکرد اتصالات در این درزها پرداخته می شود. Osgoui و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی برش در انواع اتصالات طولی سگمنت‌ها در درزهای تخت و محدب و مقعر پرداختند[۲]. برای بررسی نحوه عملکرد میله راهنما در تونل ابتدا تونل با شرایط واقعی ژئوتکنیکی زمین محدوده پایانه تا شهرک ابوذر در نرم‌افزار

* نویسنده مسئول: hmasoumi36@gmail.com

plaxis2D مدل‌سازی می‌شود و مقادیر نیروهای محوری و برشی در سازه تونل به دست می‌آید. بر اساس خروجی‌های مدل plaxis2D میزان مقاومت برشی تحمل شده توسط مقطع سگمنت و میله راهنما ارائه می‌شود [۳].

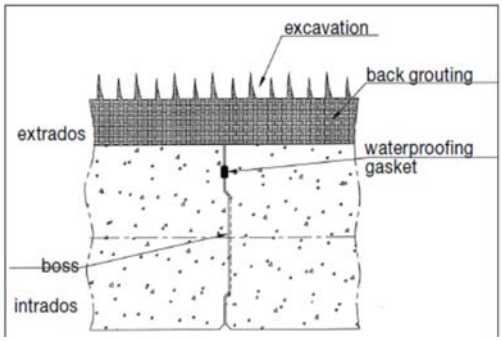
۲-۱. سطح تماس سگمنت‌ها

سطوح تماس محیطی سگمنت اغلب متحمل بارهایی همانند بارهای فشاری حاصل از نیروی پیشران ماشین حفاری که توسط جک‌های ماشین به این صفحات وارد می‌گردد و همچنین شامل نیروهای برشی حاصل از جابجایی‌های غیرمتقارن رینگ‌های مجاور می‌باشد. در طرح هندسی سطوح عرضی سگمنت دو حالت را می‌توان بکار برد. یکی استفاده از حالت سطح مسطح که در شکل ۱ نشان داده‌شده است. در این حالت امکان لغزش در امتداد عمود بر محور تونل وجود دارد که استفاده از سیستم‌های مکانیکی از قبیل بولت و کانکس داول و ... می‌تواند این جابجایی‌ها را محدود نماید.



شکل (۱). سطح درز مسطح

نوع دیگر سطح درز به‌صورت درز نوع کام و زبانه می‌باشد. این نوع درز باهدف داشتن گیرداری رینگ‌های سگمنتی ساخته و در برخی پروژه‌ها اجرا گردیده است. از معایب این نوع اتصال، وجود محدودیت در رواداری‌های نصب، سختی جاگذاری سگمنت و امکان ایجاد خرابی و آسیب‌دیدگی سگمنت به هنگام بیرون آوردن از داخل قالب و تمرکز تنش در برخی نقاط است شکل ۲ جزئیات این نوع سطح تماس را نشان می‌دهد.

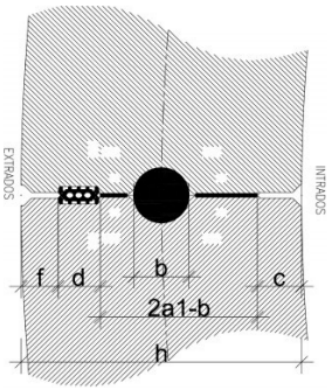


شکل (۲). درز نوع کام و زبانه

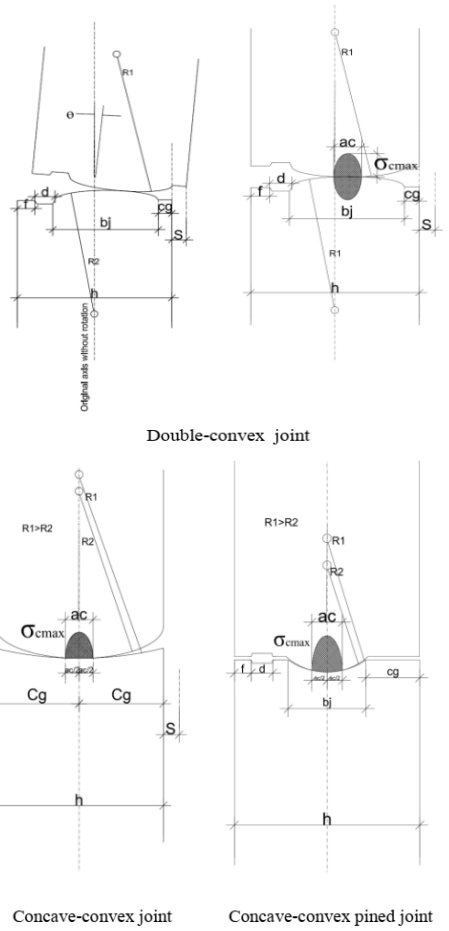
شکل درز طولی سگمنت‌های پروژه خط ۳ متروی مشهد به‌صورت مسطح تعریف گردیده و مسئله احتمال و امکان جابجایی رینگ‌ها نسبت به همدیگر توسط اتصالات پینی (داول) کنترل می‌گردد. با در نظر گرفتن فشار زمین و تزریق پشت سگمنت سطوح تماس طولی سگمنت تحت اثر نیروی برشی، نیروی فشاری و لنگر خمشی قرار می‌گیرد. بنابراین لازم است در طراحی، وضعیت و سطح مقطع این سطوح موردتوجه قرار گیرد. هندسه نهایی این سطوح می‌بایست امکان انتقال تنش بین سطوح را امکان‌پذیر نموده و احتمال خروج از موقعیت تعریف‌شده را محدود کند [۴].

۲-۲. درزهای طولی مسطح

این نوع سطح تماس به دلیل کفایت لازم در انتقال نیروهای اعمالی در رینگ به‌طورمعمول در طراحی هندسی درز طولی مورداستفاده قرار می‌گیرد (شکل ۳).



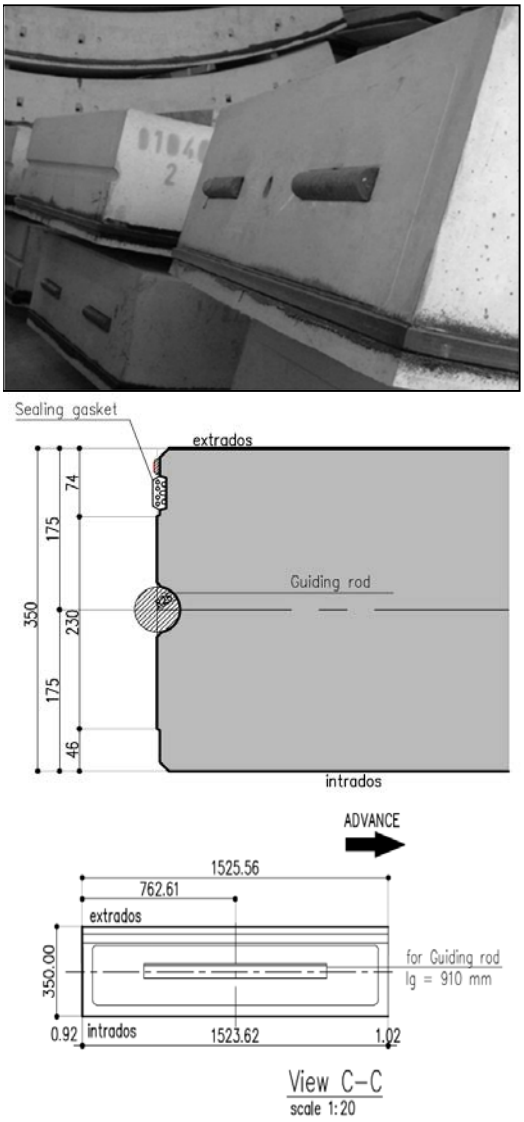
شکل (۳). سطح درز طولی مسطح [۵]



شکل (۴). درز استوانه‌ای محدب-محدب، پایین: درز استوانه‌ای محدب-مقعر [۵]

زمانی که تنش‌های موجود در رینگ بالا باشد، سطوح درز به‌صورت استوانه‌ای انتخاب می‌شوند.

این نوع سطوح تماس دارای انواع مختلفی از قبیل درز محدب-مقعر، محدب-محدب استوانه‌ای و اشکال دیگر هستند که در آن از میله راهنما استفاده‌شده است. این نوع درزها در شکل ۴ نشان داده‌شده است. درزهای مقعر-محدب، امکان دوران را به رینگ سگمنتی می‌دهند در عوض قابلیت آب‌بندی آن را کاهش می‌دهند. سگمنت‌هایی که با سطح درز حاوی میله راهنما (Guiding Rod) طراحی می‌گردند، دقت بیشتری در جانمایی دو سگمنت مجاور در یک رینگ را دارند. بدین شکل که در دو سگمنت مجاور هم، در هر دو سگمنت شیاری ایجاد می‌گردد و با قرار دادن میله راهنما در یک سگمنت سعی می‌گردد خروج از موقعیت در سگمنت‌ها رخ ندهد. استفاده از این نوع درز در پروژه‌های حفاری مکانیزه رو به افزایش است. شکل ۵ نوعی از میله راهنمای بکار رفته در درز طولی سگمنت را نشان می‌دهد .



شکل (۵). میله راهنما و شیار مربوطه به درز طولی سگمنت

۲-۳. اتصالات بین سگمنت‌ها در رینگ

از اتصالات بین سگمنت‌ها در درزهای عرضی و طولی جهت تأمین دقت در نصب و جلوگیری از بیرون‌زدگی سگمنت و بازشدگی در درزه‌های پوشش و حفظ نیروهای فشاری اعمال‌شده به نوارهای آب‌بند مخصوصاً در نزدیکی دهانه‌های خروجی تونل همچنین برآورده نمودن پایداری سگمنت حتی در مواقعی که

جک‌های پیشـــران TBM نیرویی به ســـگمنت اعمال نمی‌کنند، استفاده می‌گردد [۵]. پارامترهای هندسی و مقاومتی میله راهنما در جدول ۱ ارائه‌شده است.

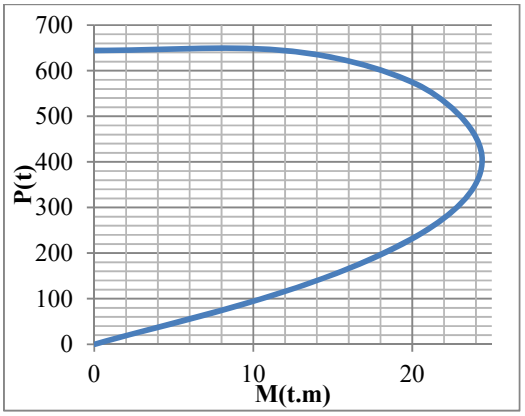
جدول (۱). مشخصات هندسی و مقاومتی میله راهنما

عنوان	واحد	مقدار
طول	mm	۹۰۰
قطر	mm	۴۸,۷
جنس	پلی‌اتیلن بازیافتی	
کرنش برشی در شکست	MPa	۵-۱۰
سطح برش	mm2	۴۳۸۳۰
مقاومت برشی	KN	۲۱۹

به‌منظور حصـــول اطمینان از عدم بازشـــدگی درز بین ســـگمنت‌های یک رینگ براثر نیروهای وارده، تلاش‌های وارده با منحنی ظرفیت درز (شکل ۶) مقایسه خواهد شد.

$$\sigma = \frac{P}{A} + \frac{6 \times M}{h^2} = \frac{4080}{0.35} + \frac{6 \times 24.5}{0.35^2} = 23.66 \ MPa \quad (۱)$$

در رابطه فوق عدد ۷۴ میلی‌متر فاصـــله پایین نوار آب‌بند تا پشت سگمنت است. درنتیجه در تنش حداکثر بیشترین میزان بازشدگی برابر ۵ میلی‌متر است. معمولاً در چک‌لیست‌های کنترل کیفیت مقدار گپ مجاز تا ۶ میلی‌متر لحاظ می‌شود.



شکل (۶). منحنی ظرفیت درزهای طولی

۲-۴. بررسی کنترل برش در محل اتصال سگمنت

سگمنت‌های مجاور در محل اتصال، یک مادگی دارند که این مادگی دو ســـگمنت مجاور با میله راهنما پر می‌شـــود. مطابق مشـــخصـــات میله راهنما (جدول ۱)، بار قابل‌تحمل آن ۲۱۹ کیلو نیوتن اســـت. در محل درز علاوه بر مقاومت میله راهنما، نیروی مقاوم ناشی از اصطکاک سگمنت نیز وجود دارد که به روش زیر محاسبه می‌شود. مجموع این دو نیرو باید بزرگ‌تر از نیروی برشی بیشـــینه در مقاطع متناظر باشـــد تا مقاومت کافی در برابر برش را داشته باشد. در جدول ۲ مقادیر نیروی برشی و مقاومت برشی برای تونل بخش غربی پروژه خط ۳ مترو مشـــهد در کیلومترهای مختلف ارائه‌شده است.

$$V_c = v_c(\frac{N_u}{12A_g})b_w d = 0.055 \ N_u \quad (۲)$$

جدول (۲). مقادیر نیروی محوری و نیروی برشی در مقاطع مختلف

مقطع	۱	۲	۳	۴	۵
کیلومتر	1+000	2+000	3+100	3+600	4+000
نیروی محوری	۱۹۲۴	۱۹۴۶	۳۰۸۳	۲۴۴۵	۲۳۱۸
نیروی برشی بیشینه	۱۰۸	۲۳۴	۲۹۱	۳۱۷	۲۹۶
نیروی مقاوم اصطکاکی	۱۱۷	۱۱۹	۱۸۸	۱۴۹	۱۴۱
مقاومت برشی میله راهنما	۲۱۹	۲۱۹	۲۱۹	۲۱۹	۲۱۹
مقاومت برشی نهایی درز	۳۳۶	۳۳۸	۴۰۷	۳۶۸	۳۶۰
S.F	۳,۱	۱,۴	۱,۴	۱,۲	۱,۲

۳. مدل‌سازی عددی و تحلیل نتایج

۳-۱. بررسی کنترل برش در محل اتصال سگمنت

جهت بررسی عملکرد میله راهنما در رینگ در خط ۳ متروی مشـــهد (محدوده پایانه تا شـــهرک ابوذر)، یک مقطع از تونل در محدوده مذکور مورد مدل‌سازی و بررسی قرار گرفت.

نرم‌افزار *PLAXIS 2D* به‌عنوان یک نرم‌افزار المان محدود ارائه‌شـــده اســـت. این نرم‌افزار به‌عنوان یک نرم‌افزار قدرتمند در مدل‌سازی مسائل مربوط به حوزه ژئومکانیک توانایی حل مسائل متعددی ازجمله تحلیل پایداری تونل، تحلیل ترانشـــه، تحلیل حرارتی و ... را دارا است. در ادامه برای مقطع بحرانی انتخاب شده نحوه بارگذاری و نتایج آن‌ها به‌طور جداگانه ارائه می‌گردد. خروجی‌های آن شـــامل کانتورهای تغییر شـــکل، کرنش برشـــی،

نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی و ضریب اطمینان سازه است. در تونل با نگهداری سگمنتی به جهت وجود درزه‌های ساختاری سگمنت سختی سیستم کاهش می‌یابد[۶]. این پدیده به دو صورت قابل‌بررسی است، در روش اول بایستی موقعیت درزه‌ها با توجه به موقعیت سگمنت کلید مشخص شود و برای هر مقطع حالت‌های مختلف موقعیت درزه در رینگ مدل‌سازی و حالت بحرانی مشخص گردد. در روش دوم ممان اینرسی مقطع در ضریبی کاهشی ضرب می شود تا اثر تأثیر درزه‌ها بر سختی سیستم اعمال شود. آقای وود رابطه‌ای برای اعمال اثر درزه بر ممان اینرسی مؤثر مقطع در تونل‌های با نگهداری سگمنتی ارائه داده است. این روش بر اساس ممان اولیه مقطع و تعداد درزه است و به‌صورت زیر بیان می‌شود [۷].

$$I = \left(\left[\frac{4}{N}\right]^2 \times I_0\right) + I_j \quad (۳)$$

که در آن I_0 ممان اینرسی مقطع لاینینگ بدون اعمال درزه و I_j ممان اینرسی درزه و N تعداد درزه در یک رینگ است. با توجه به آرایش سگمنت که به صورت ۱+۱۷ ست ۸ درزه در یک رینگ ایجاد می‌شود. ممان اینرسی درزه اگر برابر صفر فرض شود درنتیجه داریم:

$$I_0 = \frac{1}{12}bh^3 = 3.57 * 10^{-3} m^4 \quad (۴)$$

$$I = \left(\frac{4}{8}\right)^2 \times I_0 = 0.25 \times 3.57 \times 10^{-3} = 8.93 \times 10^{-4} m^4 \quad (۵)$$

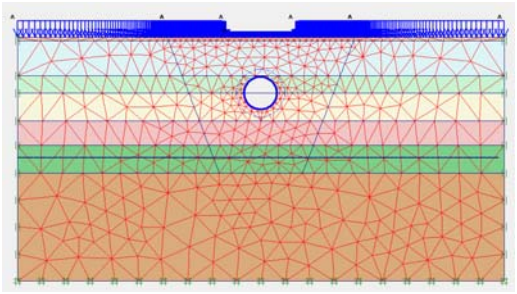
در ادامه خواص ژئوتکنیکی لایه‌های مختلف زمین در محدوده مذکور ارائه‌شده است (جدول ۳) که جهت مدل‌سازی عددی از آن‌ها استفاده می‌شود. همچنین پارامترهای سازه تونل (جدول ۴) جهت مدل‌سازی در نرم‌افزار ارائه‌شده است. مقادیر خروجی نرم‌افزار (شکل‌های ۷ -۹) برای طول واحد است و جهت اعمال بر رینگ با توجه به اینکه طول رینگ ۱,۵ متر و ضریب اطمینان طراحی ۱,۳۵ است مقادیر خروجی نرم‌افزار در ضریب ۱,۵*۱,۳۵ ضرب خواهد شد (جدول ۵) [۸].

جدول (۳). پارامترهای ژئوتکنیکی لایه‌های خاک [۹]

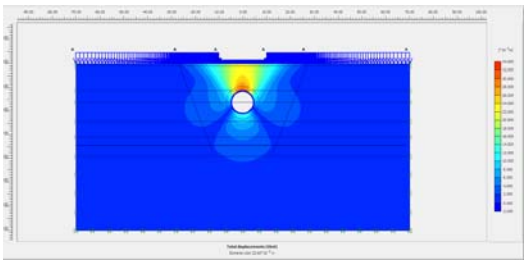
مقطع	Fill	L1	L2	L3	L4	L5	L6
ضخامت	۱	۱۰	۱۳	۸	۷	۸	۲۱
دانسیته	۱۷	۱۸	۱۸,۵	۱۹	۱۹	۱۹	۲۰
پواسون	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳	۰,۳
مدول یانگ	۷	۲۰	۳۰	۳۵	۴۰	۳۵	۵۰
چسبندگی	۵	۴	۳	۸	۵	۱۵	۲۰
زاویه اصطکاک	۲۵	۳۳	۳۷	۳۶	۳۴	۳۷	۳۳

جدول (۴). پارامترهای مقاومتی سازه تونل در نرم‌افزار

پارامتر	واحد	مقدار
ضخامت سگمنت	cm	35
مقاومت بتن	MPa	45
مدول تغییر شکل	GPa	35
EA	KN/m	12.25e6
EI	KN.m²/m	31250

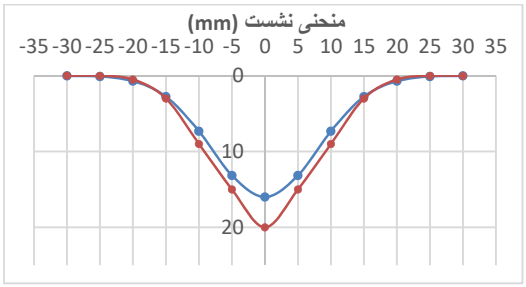


شکل (۷). مقطع مدل‌سازی تونل در نرم‌افزار plaxis2D

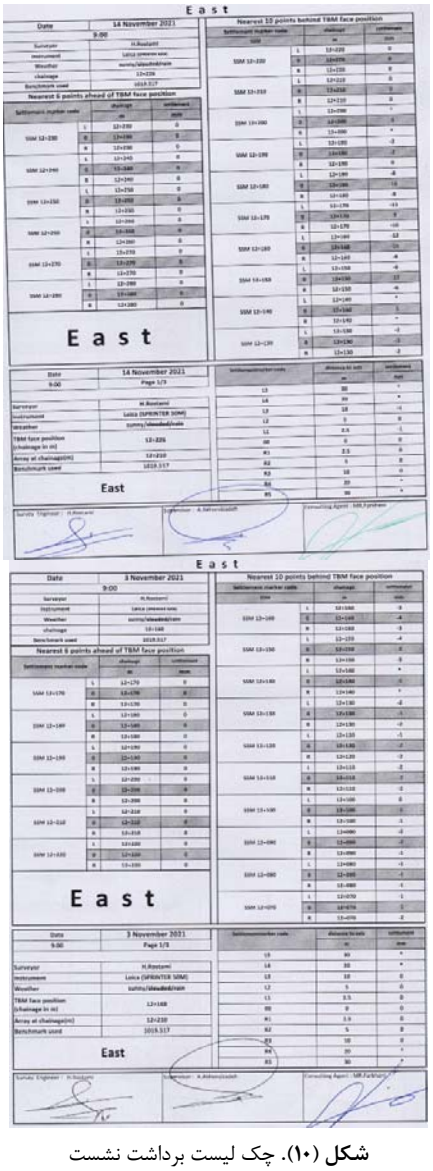


شکل (۸). کانتور نشست ناشی از حفر تونل در plaxis2D

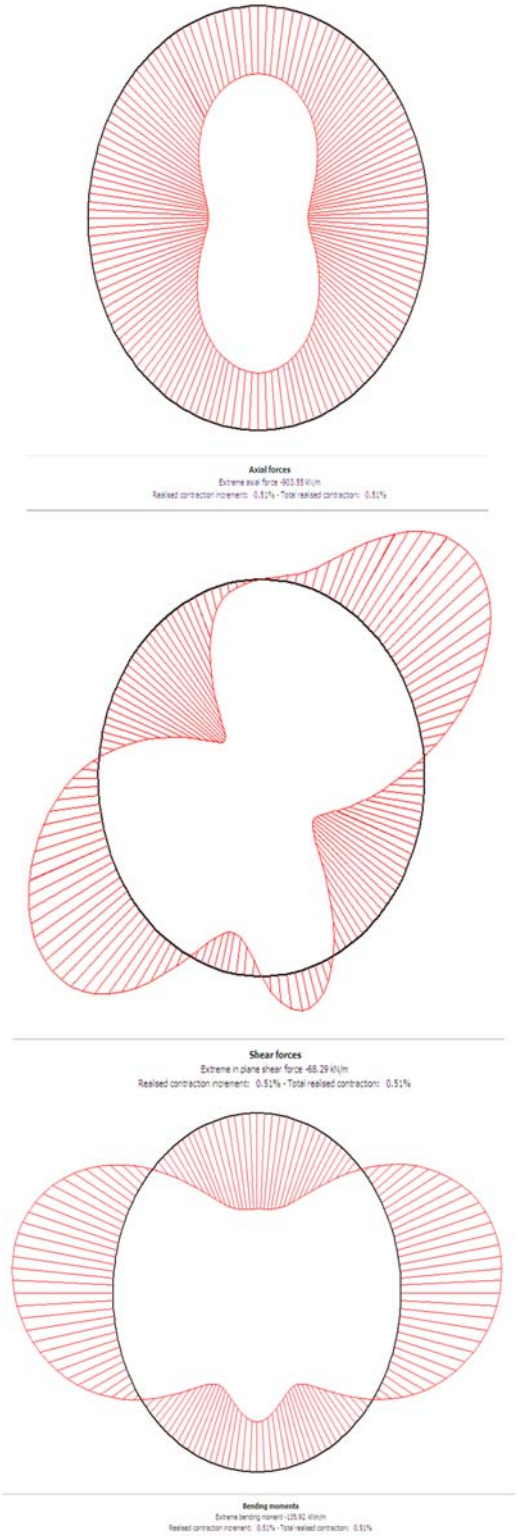
در ادامه برای اعتبارسنجی نتایج تغییرشکل و نشست مدلسازی مقادیر نشست حاصل از مدلسازی با مقادیر کنترل نشست در پروژه مذکور مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۹ و ۱۰ چک لیست‌های برداشت نشست و مقایسه منحنی‌های نشست ارائه شده است. خط آبی نشست مدلسازی و خط قرمز نشست برداشت شده است.



شکل (۹). منحنی نشست ناشی از حفر تونل در plaxis2D و برداشت سطحی



شکل (۱۰). چک لیست برداشت نشست



شکل (۱۱). نیروهای محوری، برشی و لنگر خمشی سازه تونل

جدول (۵). خروجی‌های سازه نرم‌افزار

پارامتر	نیروی محوری (KN)	نیروی برشی (KN)	لنگر خمشی (KN.m)
خروجی مدل	۹۰۳	۶۸	۱۳۵
مقادیر طراحی	۱۸۳۰	۱۳۸	۲۷۳

$$V_U \times SF = V_\mu + V_G \quad (۶)$$

$$V_\mu = 0.055 N_u = 0.055 \times 1830 = 101 KN \quad (۷)$$

$$V_G = V_U \times SF - V_\mu = 138 * 1.5 - 101 = 106 KN \quad (۸)$$

درنتیجه طبق محاسبات فوق مقاومت برشی میله راهنما (V_G) باید حداقل ۱۰۶ کیلو نیوتن برای محدوده موردنظر باشد. بدیهی است این مقدار جهت استفاده در مقاطع دیگر مسیر خط ۳ باید مورد بازبینی قرار گیرد. چون درزمین‌ها و اعماق مختلف میزان نیروی برشی وارد بر تونل متفاوت از مقدار فوق خواهد بود.

با توجه به اینکه مقاومت برشی میله راهنمای توپر برابر ۲۱۹ کیلو نیوتن است درنتیجه با توجه به نیروی برشی موردنیاز میله راهنما در مقطع مذکور (۱۰۶ کیلو نیوتن)، می‌توان ضخامت میله راهنمای توخالی را مطابق زیر به دست آورد.

$$106 D^2 = 219(D^2 - d^2) \Rightarrow d = 0.72D = 35mm \quad (۹)$$

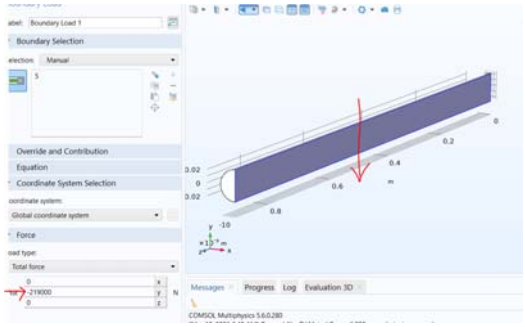
که در آن D قطر میله راهنما برابر ۴۸,۷ میلی‌متر و d قطر ناحیه توخالی می‌باشد.

۳-۲. بررسی و تحلیل اتصالات طولی در آباکوس

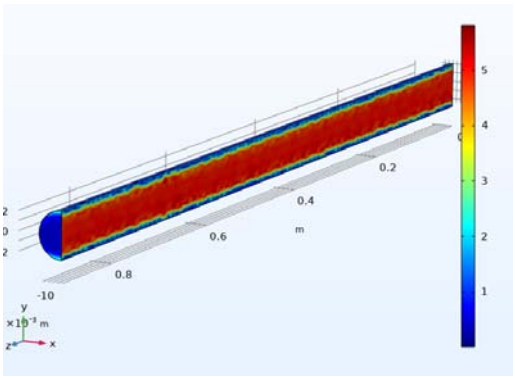
در این تحقیق به بررسی مقاومت برشی اتصالات محیطی سکشن‌ها پرداخته‌شده است. ازآنجاکه در این مرحله اطلاعات کافی جهت شبیه سازی کامل وجود نداشت، بررسی‌ها بر اساس تنش تسلیم ارائه شده در مستندات انجام شده است. بخش اصلی این تحقیق بررسی اتصال توپر و توخالی می‌باشد. در بخش بعد پیشنهادهایی جهت چگونگی آزمون برش در جهت طولی ارائه گردیده و درنهایت مواردی جهت شبیه‌سازی بهتر این نمونه‌ها ارائه‌شده است.

لازم به ذکر است همواره در اتصالات و سازه‌های بحرانی که نقص در آن‌ها باعث خسارات جانی و مالی فراوان می‌شود، بارگذاری‌های بحرانی نیز در شرایطی دور از تنش تسلیم در نظر گرفته می‌شود. این شبیه‌سازی‌ها در دو نرم‌افزار آباکوس و کامسول انجام‌شده است.

در ادامه بررسی نمونه‌های توپر و توخالی انجام می‌شود. با توجه به مستندات تنش برشی تسلیم ۵ مگاپاسکال و تحمل نیروی ۲۱۹ کیلو نیوتن جهت سازه موردمطالعه ارائه‌شده است (شکل ۱۲ و ۱۳). لذا این شرایط به‌صورت الاستیک بررسی شده است. بخش محیطی نیز کاملاً ثابت در نظر گرفته‌شده است.

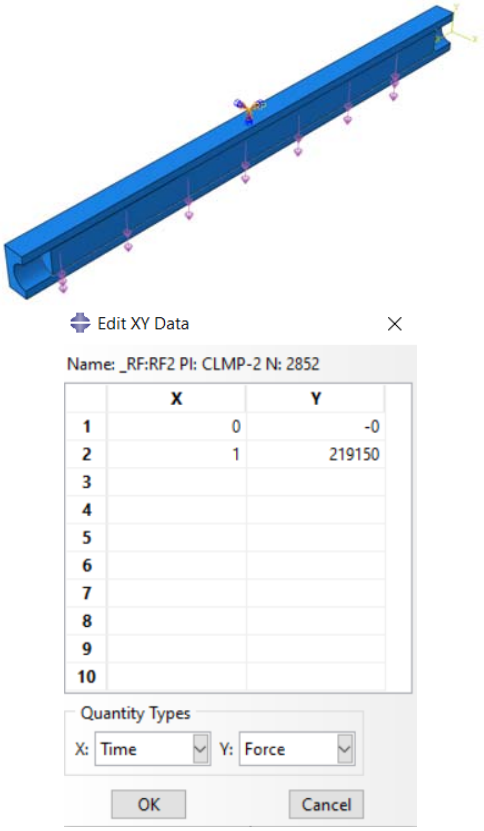


شکل (۱۲). اعمال بار برشی ۲۱۹ کیلو نیوتن به سطح



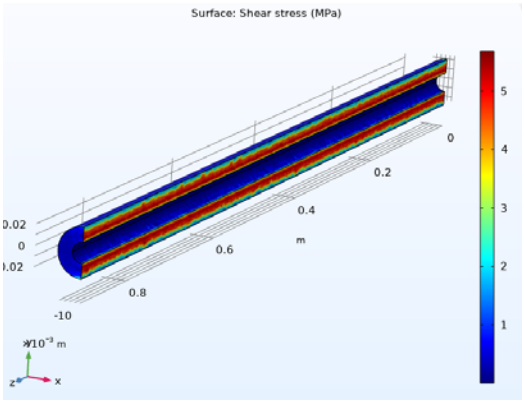
شکل (۱۳). تنش برشی میله راهنمای توپر

همان‌طور که ملاحظه می‌شود رابطه خطی تنش و بارگذاری که مرتبط با سطح بوده است. این امر در آباکوس به‌صورت عکس انجام شده است تا تأییدی بر این موضوع باشد (شکل ۱۴)، یعنی تنش برشی ۵ مگاپاسکالی به سطح هدف اعمال‌شده و نیروی عکس‌العملی برداشت‌شده است.

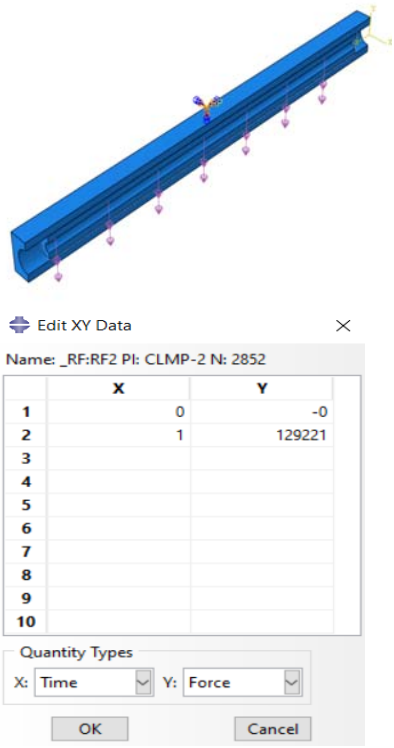


شکل (۱۴). بارگذاری در آباکوس و برداشت بار عکس‌العملی

همان‌طور که ملاحظه می‌شود در اینجا نیز انطباق اعداد دیده می‌شود. ازآنجاکه در منطقه الاستیک هستیم بارگذاری‌ها وابسته به تنش و سطح می‌باشد. بررسی بعد بارگذاری همین شرایط در نمونه توخالی می‌باشد (شکل ۱۵ و ۱۶).



شکل (۱۵). تحمل تنش ۵ مگاپاسکال در نمونه توخالی

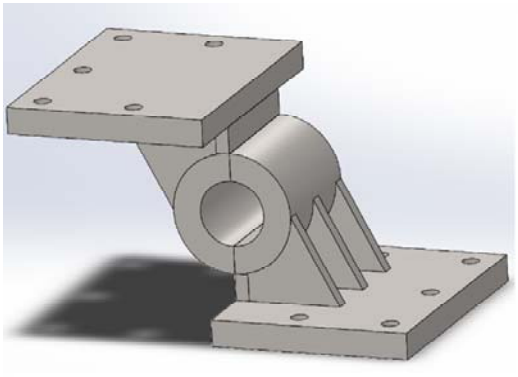


شکل (۱۶). تنش تسلیم اعمالی به نمونه توخالی

همان‌طور که ملاحظه می‌شـــود در این حالت بار مورد تحمل افت شـدید ۱۰۰ کیلونیوتنی پیدا کرده اسـت. چراکه سـطح مؤثر تحمل تنش کاهش پیدا کرده است. نکته بسیار مهمی که باید به آن توجه کرد این است که در واقعیت به دلیل خالی بودن فضای بین دو سطح وضعیت نیز ازآنچه در اینجا بررسی گردید وخیم‌تر خواهد بود، چراکه این دو ســطح بینشــان فضــای خالی بوده و نمی‌توانند به‌صـورت مسـتقیم تنش‌ها را به یکدیگر منتقل کرده و تحمل بار کمتری را شاهد خواهیم بود.

در ادامه به بررسی شبیه سازی شرایط موجود جهت تسهیل آزمون برش پرداخته شده و فرضیه‌هایی ارائه شده است. ازآنجاکه طول نمونه اصـلی ۹۰ سـانتی‌متر می‌باشـد، جهت تسـهیل آزمون رفتار تغییر طول نمونه با توجه به تنش ۵ مگاپاســکال با نرم‌افزار آباکوس موردبررسی قرار گرفت. این تحقیق نشان داد که نسبت این تغییرات کاملاً خطی و ثابت می‌باشـــد. لازم به ذکر اســـت

ماهیت این آزمون طبیعتاً سخت و دارای خطای زیادی خواهد بود. نمونه فیکسچر این آزمون در زیر قابل‌مشاهده است (شکل ۱۷).



شکل (۱۷). نمونه فیکسچر جهت آزمون برش میله راهنما

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مشکلاتی اعم از پیچیدن نمونه در این فیکسچر، عدم پوشش کورس جک و بازه آزمون، ایجاد شرایط اولیه آزمون همگی دشوار بوده و خود ممکن است سبب خطا در نمونه گردد. لذا آزمون برش به این شکل پیشنهاد نمی‌شود.

نکته حائز اهمیت و قابل‌توجه این است که تنش‌های مورد تحمل یک ماده جزء خواص ذاتی ماده بوده و تنش تسلیم هر ماده منحصر به خودش می‌باشد. نکته دیگر این است که طبق اصل تعادل المان و عدم چرخش المان‌ها همواره تنش‌های برشی در راستاهای مختلف اثر یکدیگر را خنثی نموده و باهم برابر می‌باشد. نکته دیگر این است که خواص یک ماده را می‌توان از آزمون خواص مکانیکی به دست آورد. ازجمله مهم‌ترین خروجی‌ها نمودار تنش کرنش است که می‌توان با استفاده از آن شرایط پلاستیک حتی تحت‌فشار را نیز بررسی نمود. البته که نمودار تنش کرنش از آزمون کشش به دست می‌آید ولی می‌توان از آن در آزمون‌های فشار جهت شبیه‌سازی پلاستیک استفاده نمود. لذا ملاحظه می‌شود خواص مکانیکی یک ماده منحصربه‌فرد و قابل‌انتقال به شرایط مختلف شبیه‌سازی می‌باشد[۱۰].

با توجه به این دو نکته آزمون راحت‌تری پیشنهاد می‌گردد. می‌توان نمونه را در جهت عرضی تحت آزمون برش قرارداد و آن آزمون‌ها را به‌عنوان مرجع تحمل تنش‌ها رعایت کرد و به جهت طولی تعمیم داد. این مورد نیز به‌وسیله نرم‌افزار با توجه به تنش برشی ۵ مگاپاسکال موردبررسی قرار گرفته‌شده است.

با توجه به نکات فوق می‌توان بررسی آزمون عرضی این نمونه را انجام داد. درنهایت پیشنهادهایی جهت شبیه‌سازی کلی نیز مطرح می‌گردد. نکات قابل‌توجه که مطرح شد منحصربه‌فرد بودن خواص است. آزمون‌هایی می‌توان انجام داد و آن آزمون‌ها را شبیه سازی نمود. ضمناً باید دقت داشت در این تحلیل‌ها اصل تنش تسلیم ماده و دور بودن از این نقطه می‌باشد. لذا پیشنهاد می‌شود جهت به دست آوردن تنش تسلیم واقعی نمونه تلاش شود و نمونه‌ها طوری انتخاب شود که در شرایط بحرانی به ۷۰ درصد از این مقدار نیز نرسد.

۴. نتیجه‌گیری

در این تحقیق ابتدا به انواع درزها در سگمنت‌های تونل و نحوه عملکرد اتصالات در این درزها پرداخته شد. در ادامه تمرکز گزارش بر روی عملکرد میله راهنما (Guiding Rod) قرار گرفت و خواص و رفتار آن ارائه شد. در ادامه به بررسی نحوه عملکرد میله راهنما در تونل پرداخته شد که برای این منظور ابتدا تونل با شرایط واقعی ژئوتکنیکی زمین محدوده پایانه تا شهرک ابوذر در نرم‌افزار plaxis2D مدل‌سازی شد و مقادیر نیروهای محوری و برشی در سازه تونل به دست آمد. بر اساس خروجی‌های مدل plaxis2D میزان مقاومت برشی تحمل شده توسط مقطع سگمنت و میله راهنما ارائه شد. در ادامه جهت تحلیل رفتار میله راهنما از نرم‌افزار آباکوس استفاده و خروجی این مدل نشان داد که میله‌های راهنمای توپر و توخالی رفتاری خطی دارند و درنهایت فیکسچر مناسب جهت آزمون برشی آن ارائه‌شده است.

با توجه به اینکه میزان نیروی برشی در میله راهنما در محدوده مذکور کمتر از حداکثر ظرفیت ۲۱۹ کیلو نیوتن است، لذا می‌توان در این محدوده از میله راهنمای توخالی نیز استفاده نمود. بدیهی است استفاده از این میله راهنما در مقاطع دیگر همچون بخش غربی خط ۳ یا خط ۴ منوط به مدل‌سازی مجدد رفتار تونل و میزان نیروهای برشی در سازه تونل است.

۵. مراجع

[1] M.A. Iranmanesh, A. Arianfar, S. Amoon, “Investigation of the effect of geotechnical parameters on the settlement curve due to EPB-TBM tunnelling in urban area with alluvial soil with numerical modeling”, STC_Volume 2_Issue 2_Pages 14-25, 2021 (In Persian)

[2] R. Osgoui, A. Poli & M. Pescara, “Critical comparison between the double-convex and flat radial joints features in segmental tunnel lining,” Rock Mechanics and Rock Engineering, Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-03265-1, 2016

[3] R. R. Osgoui, A. Poli, G. Quaglio, “Performance Analysis of Different Radial Joint Shapes in Segmental Tunnel Lining,” Proceedings of the World Tunnel Congress 2017 – Surface challenges – Underground solutions. Bergen, Norway, 2017

[4] V.B. Maji, A. Adugna, “Numerical modelling of tunnelling induced ground deformation and its control,” International Journal of Mining and Geo-Engineering IJMGE, VOL.50, NO.2, 183–188, 2016

[5] D.J. Kunst, “Modelling construction phases of bored tunnels with respect to internal lining forces,” M.Sc. Thesis, Delft Univ, Delf 2017

[6] M. Bakhshi, V. Nasri, “New ACI 533 guide on general design and construction aspects of precast concrete tunnel segments”, Geomechanics and Tunnelling 12, No. 5, 2019.

[7] P. Gehwolf, A. Walter, R. Galler, H. Wagner, “Shear tests on flexible shear dowels for use at cross passages with thin segmental linings,” Geomechanics and Tunnelling 9, No. 3, 2016

[8] Y.H. Takano, “Guidelines for the Design of Shield Tunnel Lining Working Group No. 2”, International Tunnelling Association, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 15, No. 3, pp. 303-331, 2000

[9] Guglielmetti, V. Grasso.P, Mahtab, A and Xu, S. 2007. Mechanized Tunnelling in Urban Areas- design methodology and construction control. Taylor & Francis Group.

[10] MaharAb consulting engineers, “Geotechnical report of Mashhad Railway line 3 - between Hafez Square to Saba Boulevard”, 2015 (In Persian)