

مدل سازی سه بعدی تقاطع تونل و تأثیر آن در جابه جایی ها و نیروهای داخلی پوشش (مطالعه‌ی موردی: تونل حکیم - تهران)

علی اکبر گلشانی* (استادیار)

مهدی جنیدی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

سینا مجیدیان (دکتر)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۷ (۱۳-۱۵)
دوری ۲ - ۳۴، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۲۳-۱۵

در تقاطع‌ها حالت تنش و جابه‌جایی‌های زمین سه بعدی است. بنابراین فقط با تحلیل‌های سه بعدی می‌توان رفتار تونل در این نواحی را بررسی کرد. در پژوهش حاضر، یکی از تقاطع‌های ایجاد شده در تونل حکیم - تهران با مدل‌سازی سه بعدی و با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس بررسی شده است. در مطالعه‌ی حاضر، بیشتر تمرکز بر روی اثر ساخت تقاطع در جابه‌جایی‌ها و نیروهای داخلی پوشش تونل است. نتایج نشان داد که با ساخت تقاطع، بیشینه‌ی نشست سطحی نسبت به تونل تک تا ۲۹٪ افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به توزیع نیروهای داخلی مشاهده شد که ساخت تقاطع (جهت محیطی) فقط در نیسی از مقطع پوشش اثر می‌گذارد و پتانسیل خرابی در تاج و دیواره‌های تقاطع به نسبت دیگر بخش‌های تونل بسیار بیشتر است. با بررسی مقاطع مختلف تونل اصلی، نتایج نشان داد که بیشینه‌ی ناحیه‌ی تأثیر پوشش، در فاصله‌ی ۱۵ متری از مرکز تقاطع است.

واژگان کلیدی: تونل حکیم، تحلیل سه بعدی، ناحیه‌ی تقاطع، نشست سطحی، نیروهای داخلی پوشش.

golshani@modares.ac.ir
mehdi.joneidi@modares.ac.ir
sina_majidian@modares.ac.ir

۱. مقدمه

تقاطع‌های زیرزمینی هستند که در محل برخورد دو یا چند بازو مجزا قرار گرفته‌اند. بازوها می‌توانند از نظر هندسه، کاربری و شرایط زمین‌شناسی، یکسان و یا متفاوت باشند. از کاربری تقاطع‌ها می‌توان به رابط بین دو تونل و یا خروج اضطراری در شرایط بحرانی نام برد. در تقاطع‌ها به دلیل تغییر ناگهانی مقطع تونل در جهت طولی، تنش‌های اطراف بازو سه بعدی هستند. در نواحی مذکور به دلیل تنش‌های سه بعدی، به بارهای وارد بر پوشش و جابه‌جایی‌های تونل بیشتر توجه می‌شود. معمولاً برای جلوگیری از ریزش تونل در تقاطع‌ها، پوشش‌های سنگین‌تری نسبت به دیگر نواحی طراحی می‌شود. به عنوان مثال، ساخت ۴۲ تقاطع در مسیر تونل سوشان^۲ در کشور تاپوان، هزینه‌های پروژه را به طور قابل توجهی افزایش داد.^[۱] بنابراین با توجه به هندسه‌ی نامنظم و پیچیده‌ی تقاطع‌ها، پیدا کردن حل تحلیلی برای توزیع تنش‌ها غیرممکن است.^[۲] هندسه، تنش‌های برجا و زاویه‌ی تقاطع بیشترین تأثیر را در بازتوزیع تنش‌ها در نواحی مذکور دارند.^[۳] به هر حال استفاده از یک رویکرد منطقی برای بررسی این‌گونه از سازه‌ها، بسیار حائز اهمیت است. در پژوهشی در سال ۱۹۶۴، به منظور بررسی تمرکز تنش در تقاطع‌ها از مصالح فوتوکشسان استفاده

شد و نتایج نشان داد که با ایجاد بازو، تنش‌های فشاری در ناحیه‌ی تقاطع تا ۱/۶ برابر افزایش می‌یابند.^[۴] همچنین در یک تحلیل سه بعدی تقاطع با زاویه‌ی ۴۵ درجه (۱۹۸۸) نشان داده شد که ناحیه‌ی تأثیر در امتداد تونل اصلی در فاصله‌ی بی به اندازه‌ی یک و سه برابر قطر تونل در دو طرف زاویه‌ی منفرجه و حاده از مرکز تقاطع است.^[۵] در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۰۲)، نتایج نشان داد که با ایجاد بازو در تونل اصلی، افزایش ۱۰ درصدی در جابه‌جایی تاج تونل به عنوان معیار تقویت پوشش^۳ در نظر گرفته می‌شود.^[۶] همچنین مدل‌سازی‌های سه بعدی و مطالعه‌ی غیرخطی تقاطع‌ها نشان داد که تقاطع‌هایی با دو بازو، ناپایدارترین نوع تقاطع به‌شمار می‌روند و پیشروی تونل‌های فرعی در جهت فاصله گرفتن از تقاطع، اثر مطلوب‌تری در نتایج دارند.^[۷] در سال ۲۰۰۸ نیز با بررسی جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها در تقاطع مشاهده شد که ناحیه‌ی تأثیر تا ۲/۵ برابر قطر تونل از مرکز تقاطع است، همچنین تنش‌ها و جابه‌جایی‌ها به شکلی افزایش می‌یابند که تغییرات مذکور با پیشروی تونل تا ۴/۵ برابر قطر به کمترین مقدار خود می‌رسند.^[۸] همچنین در سال ۲۰۰۹ با بررسی ۷۵ مورد تحلیل عددی تقاطع و با توجه به شرایط زمین‌شناسی محل، ۳ حالت برای طراحی پوشش ارائه شد.^[۹] تحلیل عددی تقاطع تونل نیایش نشان داد که نوع اتصال در ناحیه‌ی تقاطع، تأثیری در نشست سطحی ندارد و با مفصلی در نظر گرفتن اتصال، سیستم

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۵/۲/۲۸، اصلاحیه ۱۳۹۵/۷/۲۴، پذیرش ۱۳۹۵/۸/۸

DOI: 10.24200/J30.2018.1363



شکل ۱. موقعیت قرارگیری تونل حکیم.



شکل ۲. تقاطع ایجاد شده در تونل حکیم.

پروژه به ترتیب ۱۰ و ۱۱ متر است. گزارش‌های ژئوتکنیکی فاز ۲ تونل حکیم، دو لایه‌بندی بودن خاک در محل پروژه را نشان می‌دهد. لایه‌ی اول، شامل ۱ متر خاک ریزدانه‌ی سطحی و لایه‌ی دوم، از شن و ماسه‌ی رس‌دار همراه با قله‌سنگ (سازند نوع A) تشکیل شده است.

۳. مدل‌سازی عددی تقاطع

با توجه به هندسه‌ی پیچیده و سه‌بعدی بودن ناحیه‌ی تقاطع، استفاده از تحلیل‌های عددی برای این نواحی ضروری به نظر می‌رسد. در حال حاضر برای تحلیل و طراحی تقاطع‌ها (تونل‌های دسترسی) رویکردهای متفاوتی وجود دارد. انتخاب روش تحلیل در تقاطع‌ها به ابعاد تونل اصلی و فرعی، اختلاف ارتفاع سقف دو تونل، زاویه‌ی تقاطع، شرایط زمین‌شناسی محل، سطح آب زیرزمینی، و روش ساخت بستگی دارد. روش‌های تحلیلی و تجربی معمولاً برای تونل‌های تک‌گسترش یافته‌اند و برای نواحی با پیچیدگی‌های هندسی کاربردی نیستند. بنابراین با استفاده از تجربه، قضاوت مهندسی، و برخی از فرضیات محافظه‌کارانه می‌توان از روش‌های تحلیلی برای طراحی پوشش تونل نیز استفاده کرد. به هر حال استفاده از تحلیل‌های سه‌بعدی، بهترین روش برای بررسی نواحی پیچیده در تونل‌سازی است.

۱.۳. هندسه و مشخصات مکانیکی مدل

شکل ۲، یکی از تقاطع‌های ایجاد شده در مسیر تونل حکیم را نشان می‌دهد. مقطع هر دو تونل در مدل‌سازی مذکور، نعل اسبی است (شکل ۳). ابعاد محیط خاک به شکلی در نظر گرفته شده است که با پیشروی حفاری، جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها در مرزهای مدل به حالت سکون برسند. به عبارتی، شرایط پایدار در مدل ایجاد شود. طول، عرض، و ارتفاع مدل به ترتیب ۱۲۶، ۷۶ و ۵۶ متر است، همچنین تونل اصلی و فرعی در عمق‌های ۱۳ و ۱۴ متری واقع شده‌اند. مش‌بندی محیط خاک و پوشش تونل شامل ۲۷۶۵۷۷ المان ۴ گره‌بندی مثلثی (C3D4) و ۱۸۹۶۰ المان سه

نگهدارنده‌ی سبک‌تری طراحی می‌شود. [۱۰] مدل‌سازی‌های عددی و آزمایشگاهی نیز نشان دادند که افزایش ضخامت خاک درشت‌دانه در ناحیه‌ی اطراف تونل منجر به کاهش ممان‌های ایجاد شده در پوشش تونل می‌شود. [۱۱]

همچنین در سال ۲۰۱۰ با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود انسیس^۴، تقاطع تونل تحت شرایط مختلف بررسی شد و نتایج نشان داد که مقدار آزادسازی بار بعد از نصب پوشش تأثیر زیادی در تنش‌های وارد بر پوشش ندارد. [۱۲] در پژوهشی دیگری (۲۰۱۵) با استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار آباکوس^۵ پاسخ‌های سازه‌ی تونل به دلیل ساخت تقاطع مطالعه و با بررسی نتایج مشاهده شد که تنش‌های کششی در تونل اصلی نسبت به تونل فرعی بحرانی‌تر هستند. [۱۳] در سال ۲۰۱۵ نیز رفتار بلندمدت تونل‌های دسترسی در شهر لندن بررسی شد و نتایج نشان داد که پس از حفاری دو تونل موازی، نشست سطحی به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و ساخت تونل دسترسی تأثیر زیادی در افزایش نشست ندارد. [۱۴] در مطالعه‌ی دیگری (۲۰۱۶)، مدل‌سازی‌های عددی نشان دادند که میزان جابه‌جایی و کرنش‌های کششی در سقف تقاطع به طور قابل توجهی بیشتر از دیگر بخش‌های تونل است. [۱۵] همچنین در سال ۲۰۱۶، مدل‌سازی تقاطع در محیط‌های سنگی بررسی شد، و براساس مدل‌های عددی، ناحیه‌ی تأثیر در جهت طولی (تونل اصلی) برای تنش و جابه‌جایی به ترتیب ۱/۶ و ۲/۴ برابر قطر تونل تعیین شد. [۱۶] با توجه به مطالعات صورت گرفته، استفاده از مدل‌های سه‌بعدی برای بررسی ناحیه‌ی تقاطع امری ضروری است. بنابراین با استفاده از تحلیل‌های عددی می‌توان اطلاعات مفیدی در مورد پایداری این‌گونه از سازه‌ها به دست آورد. یکی از مهم‌ترین عوامل در پایداری ناحیه‌ی تقاطع، اطلاع دقیق از توزیع نیروهای وارد بر پوشش و درصد تغییرات آن‌ها به دلیل ایجاد بازشو است. لذا بررسی افزایش نیرو در پوشش تونل اصلی^۶ بعد از ساخت تقاطع، عامل مهمی در طراحی پوشش و هزینه‌های پروژه است. در بیشتر مطالعات پیشین، در مورد تونل‌هایی با مقاطع دایره‌ی بحث شده و به اثر روش حفاری مرحله‌ی کمتر توجه شده است. همچنین با توجه به مطالعات گذشته، اثر فشار هم‌جانبه‌ی خاک در پاسخ‌های سازه در تقاطع‌ها کمتر استفاده شده است. [۱۳] لذا در پژوهش حاضر، با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس، مراحل حفاری و پایداری‌سازی دو تونل اصلی و فرعی^۷ مدل‌سازی شده است. شبیه‌سازی عددی شامل یکی از تقاطع‌های ایجاد شده در پروژه‌ی تونل حکیم واقع در شهر تهران بوده است. تونل حکیم با عمق ۱۳ متر به عنوان پنجمین تونل ترافیکی شهر تهران به شمار می‌رود. در پژوهش حاضر، به روش و جزئیات حفاری بازشو جانبی نیز توجه شده است. در مدل‌سازی عددی طول پیشروی در هر گام از حفاری مطابق روش اجرا در نظر گرفته شده است. در مطالعه‌ی حاضر، بیشتر تمرکز بر روی تأثیر ساخت تونل فرعی در جابه‌جایی‌ها و نیروهای وارد بر پوشش تونل است. همچنین در ادامه، اثر ضریب فشار جانبی در نتایج تحلیل بررسی شده است.

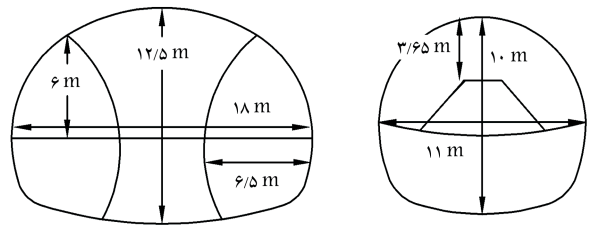
۲. مشخصات پروژه و شرایط ژئوتکنیکی زمین

تونل حکیم در ادامه‌ی بزرگراه آیت‌الله حکیم در منطقه‌ی ۲۲ تهران، حد فاصل بزرگراه آزادگان تا تقاطع ایران خودرو واقع شده است. تونل شامل دو مسیر مجزای رفت و برگشت با سه خط عبور در هر طرف است. شکل ۱، موقعیت قرارگیری تونل در منطقه را نشان می‌دهد. تونل در عمق ۱۳ متری از سطح زمین واقع شده است و با توجه به عمق کم تونل، در گروه تونل‌های سطحی قرار می‌گیرد. ارتفاع و عرض تونل اصلی ۱۲/۵ و ۱۸ متر و همچنین برای تونل‌های دسترسی در مسیر

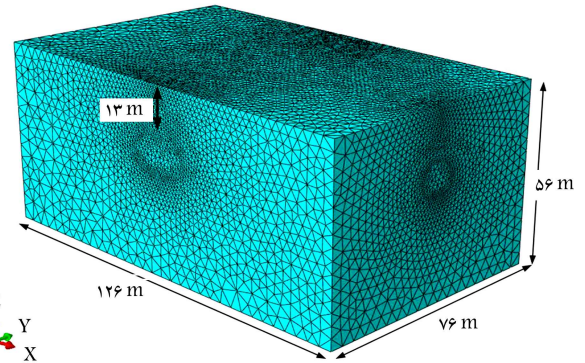
جدول ۱. مشخصات مکانیکی مصالح.

مصالح	خاک	شاتکریت
چگالی (Kn/m^3)	۱۹	۲۴
مدول تغییرشکل (Kn/m^2)	۷۵۰۰۰	۲۵۷
نسبت پواسون (ν)	۰/۳	۰/۳
چسبندگی (Kn/m^2)	۳۰	-
زاویه اصطکاک (ϕ)	۳۶	-
زاویه اتساع (Ψ)	۶	-
ضریب فشار جانبی $^1 (k_0)$	۰/۴۱۲	-
ضخامت (mm)	-	۴۰۰، ۳۵۰، ۳۰۰

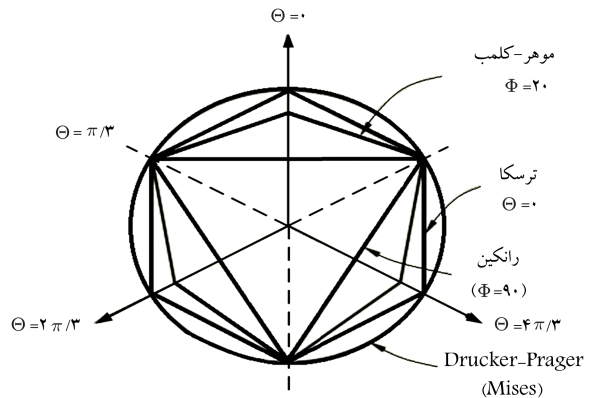
1 ضریب فشار جانبی بر اساس فرمول جکی (k_0)
 $k_0 = 1 - \sin \phi$



شکل ۳. مقاطع تونل اصلی و فرعی. (الف) مقطع تونل اصلی؛ (ب) مقطع تونل فرعی.



شکل ۴. ابعاد و مش بندی تقاطع تونل حکیم.



شکل ۵. سطح تسلیم مدل رفتاری موهر-کلمب در صفحه‌ی تنش‌های انحرافی.

گره‌ی (S3) است (شکل ۴). با توجه به وجود خاک سطحی به عمق ۱ متر و اثر ناچیز در نتایج فقط لایه‌ی دوم (سازند A) در نرم‌افزار مدل‌سازی شده است. مدل رفتاری کشسان‌خمیری با معیار گسیختگی موهر-کلمب و مدل رفتاری کشسان به ترتیب برای محیط خاک و پوشش فرض شده است. شکل ۵، سطح تسلیم مدل رفتاری موهر-کلمب در صفحه‌ی تنش‌های انحرافی را نشان می‌دهد. توابع تسلیم و پتانسیل خمیری در نرم‌افزار آباکوس مطابق روابط ۱ و ۲ ارائه شده‌اند.^[۱۷] در روابط مذکور C ، ϕ و Ψ به ترتیب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع هستند. همچنین p تنش فشاری معادل، q تنش معادل میسر، $|C|$ چسبندگی اولیه‌ی تنش تسلیم و e میزان خروج از مرکزیت تابع پتانسیل جریان از صفحه‌ی تنش‌های میانی هستند. R_{mw} و R_{mc} نیز تابعی از پارامترهای ذکر شده هستند (روابط ۳ الی ۶). در جدول ۱، مشخصات مکانیکی خاک و پوشش شاتکریت ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش بارگذاری صفحه،

با افزایش تنش‌های همه‌جانبه در هر ۱۰ متر، مدول تغییرشکل خاک ۱۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع افزایش می‌یابد که تغییرات مذکور در مدل‌سازی عددی در نظر گرفته شده است.^[۱۸]

$$F = R_{mc}q - p \tan f - c = 0 \quad (1)$$

$$G = \sqrt{(\epsilon c)^2 \tan^2 \psi + (R_{mw}q)^2} - p \tan \psi \quad (2)$$

$$R_{mc}(\theta, \phi) = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \phi} \sin\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{1}{3} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{3}\right) \tan \phi \quad (3)$$

$$R_{mw}(\theta, e) = \frac{4(1 - e^2) \cos^2 \theta + (2e - 1)^2}{2(1 - e^2) \cos \theta + (2e - 1) \sqrt{4(1 - e^2) \cos^2 \theta + \Delta e^2} - 4e} R_{mc} \left(\frac{\pi}{3}, \phi\right) \quad (4)$$

$$R_{mc}\left(\frac{\pi}{3}, \phi\right) = \frac{3 - \sin \phi}{6 \cos \phi} \quad (5)$$

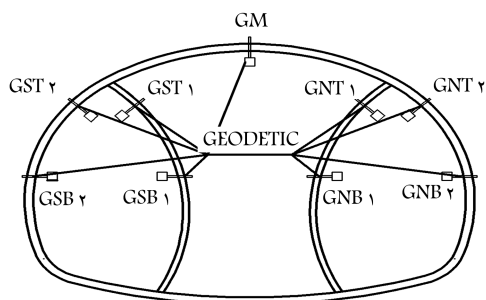
$$e = \frac{3 - \sin \phi}{3 + \sin \phi} \quad (6)$$

۲.۳. اندرکنش بین پوشش شاتکریت و خاک

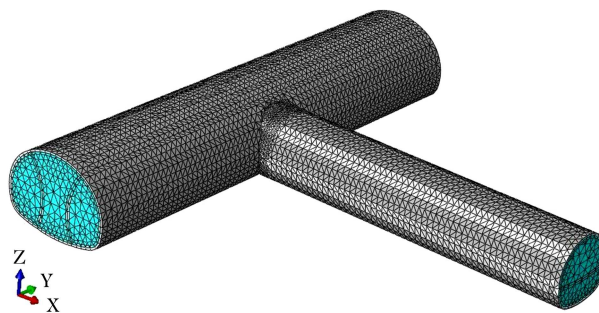
ضخامت شاتکریت برای مرزهای تونل و دیواره‌های موقت به ترتیب ۳۵۰ و ۳۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به افزایش تنش در محل تقاطع، ضخامت شاتکریت تونل فرعی در ۶ متر اولیه، ۴۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. فرض بر این است که بین شاتکریت و خاک هیچ‌گونه لغزشی صورت نمی‌پذیرد و المان‌های پوشش با استفاده از قید Tie به خاک مجاور متصل شده‌اند. در اندرکنش بین خاک و شاتکریت، جابه‌جایی‌های گره‌ی المان‌های پوشش برابر با میزان هم‌گرایی سطح تونل هستند (شکل ۶).

۳.۳. گام‌های حفاری و نصب پوشش

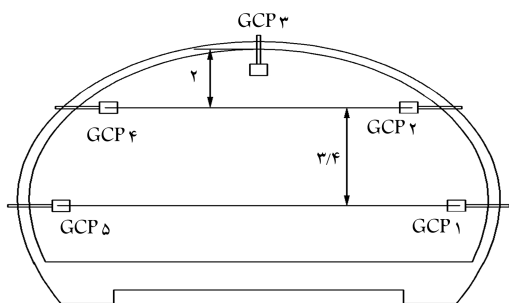
از عوامل مختلف در انتخاب روش حفاری می‌توان به خصوصیات ژئوتکنیکی محل، هندسه‌ی تونل، سطح آب زیرزمینی، و نحوه‌ی توزیع تنش‌های برجا نام برد.^[۱۹] حفاری تونل اصلی و فرعی به روش مرحله‌ی و با تقسیم مقطع تونل به ۶ و ۳ قسمت صورت گرفته است. طول گام حفاری در هر دو تونل، ۱ متر فرض شده است. روش ساخت تقاطع به این صورت است که ابتدا تونل اصلی حفاری می‌شود، سپس تونل فرعی از داخل تونل اصلی ایجاد می‌شود. شکل ۷، توالی حفاری



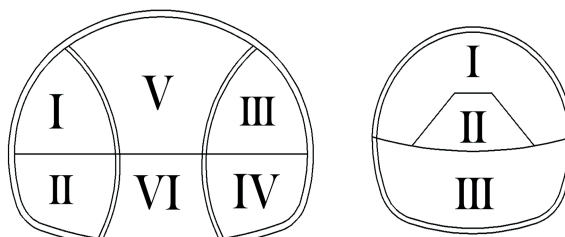
شکل ۸. نقاط رفتارسنجی تونل اصلی.



شکل ۶. استفاده از قید Tie برای اندرکنش بین خاک و شاترکریت.



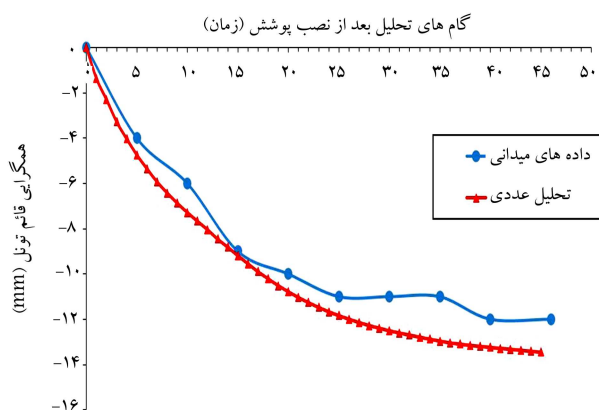
شکل ۹. نقاط رفتارسنجی تونل فرعی.



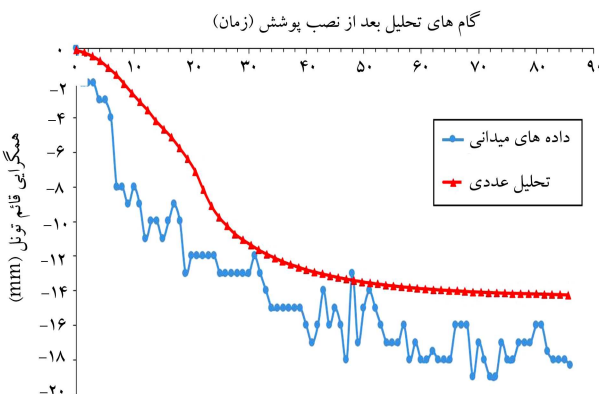
(الف) تونل اصلی؛

(ب) تونل فرعی.

شکل ۷. توالی حفاری برای تونل اصلی و فرعی.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج تحلیل سه بعدی با داده‌های میدانی نقطه‌ی GM تونل اصلی.

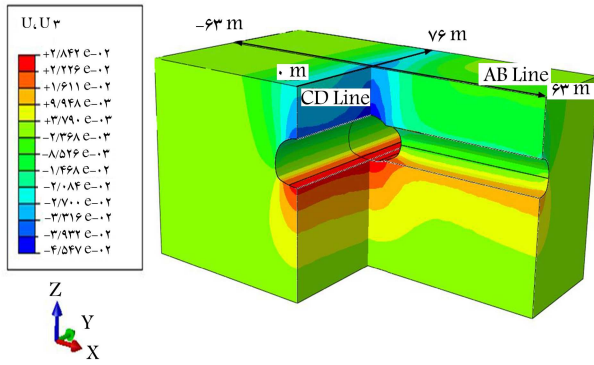


شکل ۱۱. مقایسه‌ی نتایج تحلیل سه بعدی با داده‌های میدانی نقطه‌ی GST2 تونل اصلی.

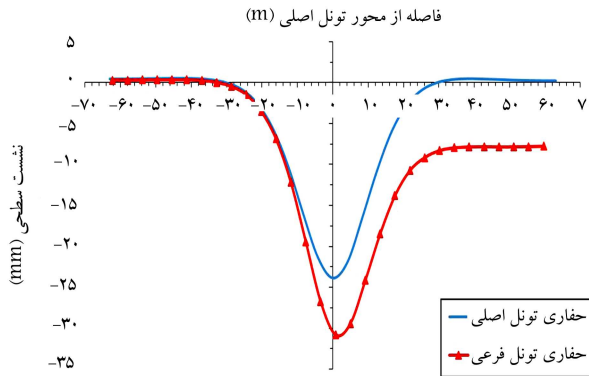
برای هر دو مقطع را نشان می‌دهد. در روش مذکور، ابتدا مقطع شماره‌ی I حفاری می‌شود، پس از پیشروی این مقطع تا ۱۰ متر، هم‌زمان حفاری مقطع شماره‌ی II شروع می‌شود و به همین ترتیب تا مقطع آخرین فرایند ادامه پیدا می‌کند. همچنین به منظور کاهش جابه‌جایی‌های تونل، دیواره‌های موقت میانی پس از حفاری مقطع VI حذف می‌شوند. فعال‌سازی پوشش تونل در هر مقطع یک گام بعد از حفاری صورت می‌گیرد، تا اجازه‌ی آزادسازی تنش به مقطع حفاری‌شده داده شود.

۴. صحت‌سنجی نتایج تحلیل عددی با داده‌های میدانی

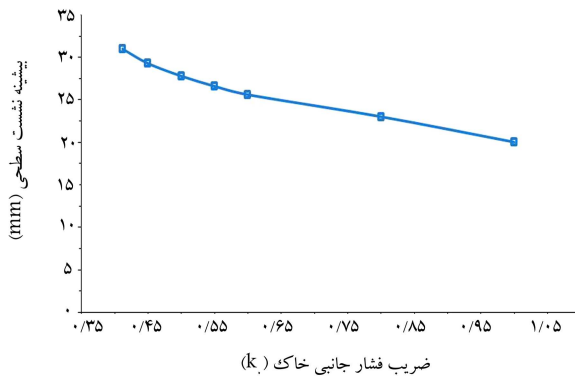
هم‌گرایی دیواره‌های تونل در محل تقاطع با نتایج حاصل از رفتارسنجی مقایسه شده است. نقاط در نظر گرفته شده برای صحت‌سنجی، نقاط GM و GST2 برای تونل اصلی و نقطه‌ی GCP3، برای تونل فرعی در محل تقاطع هستند (شکل‌های ۸ و ۹). با توجه به اینکه هم‌گرایی‌سنج‌ها در دیواره‌های تونل بعد از اجرای پوشش در محل نصب می‌شود، بنابراین برای مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی با داده‌های میدانی، مقدار هم‌گرایی بعد از نصب پوشش در نظر گرفته شده است. در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲، نتایج تحلیل عددی با داده‌های میدانی مقایسه شده است. با توجه به اینکه در پروژه‌ی تونل حکیم، داده‌های میدانی بر حسب روز و هفته قرائت شده‌اند، لذا برای صحت‌سنجی و تفسیر منطقی با نتایج عددی، مقادیر محوری بر حسب گام‌های^۸ تعریف شده در نرم‌افزار مقیاس شده‌اند. داده‌های میدانی نشان می‌دهند که شیب هم‌گرایی تاج تونل اصلی (GM) پس از حذف دیواره به طور ناگهانی افزایش می‌یابد (گام‌های ۱۱ الی ۲۰) که مطابق نتایج هم‌گرایی تاج تونل از ۶ به ۹ میلی‌متر افزایش یافته است؛ که افزایش مذکور در نتایج عددی نیز با تغییر میزان هم‌گرایی از ۶/۸ به ۹/۵ میلی‌متر مشاهده شده است (شکل ۱۰). همچنین با پیشروی تونل اصلی و در پایان حفاری، داده‌های میدانی و نتایج عددی مقدار هم‌گرایی تاج تونل را به ترتیب ۱۲ و ۱۳/۴ میلی‌متر نشان می‌دهند. با مقایسه‌ی نتایج عددی و داده‌های میدانی، ۱۱/۶٪ اختلاف برای مقدار هم‌گرایی تاج تونل مشاهده می‌شود. نتایج



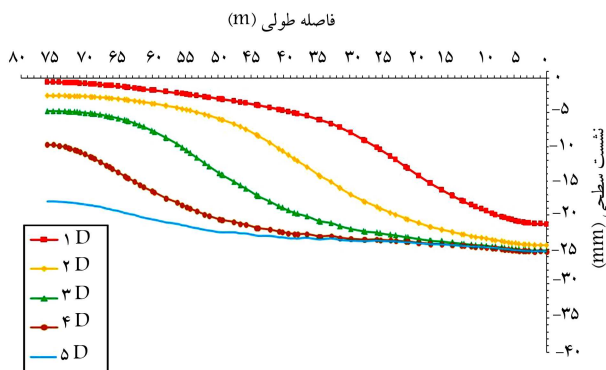
شکل ۱۳. کانور جابه‌جایی قائم مدل و محل خط AB و CD برای کنترل نشست.



شکل ۱۴. منحنی توزیع نشست عرضی پس از حفاری تونل اصلی و حفاری.

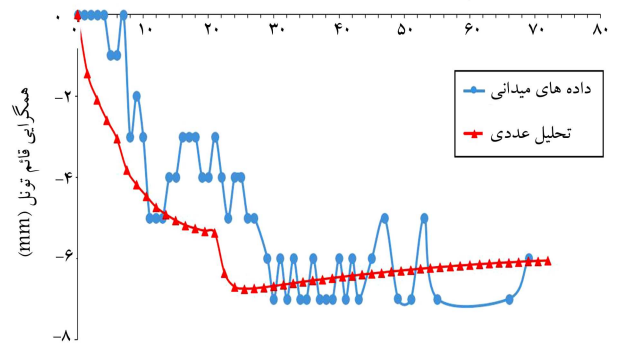


شکل ۱۵. تغییرات بیشینه‌ی نشست زمین در محل تقاطع با افزایش ضریب فشار جانبی.



شکل ۱۶. منحنی توزیع نشست طولی در مسیر حفاری تونل اصلی.

گام‌های تحلیل بعد از نصب پوشش (زمان)



شکل ۱۲. مقایسه‌ی نتایج تحلیل سه بعدی با داده‌های میدانی نقطه‌ی GCP۳ تونل فرعی.

عددی نشان داد که هم‌گرایی نقطه‌ی GST۲ تا شروع حفاری قسمت IV (گام ۳۱) به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد و تا پایان حفاری تونل اصلی (گام ۹۵) این تغییرات به کمترین مقدار می‌رسند. این روند تغییرات در داده‌های میدانی نیز مشاهده می‌شود (شکل ۱۱). مطابق نتایج، هم‌گرایی نقطه‌ی GST۲ (گام ۳۵) برای داده‌های میدانی و نتایج عددی به ترتیب ۱۳ و ۱۱/۵ میلی‌متر به دست آمده است. شکل ۱۲، هم‌گرایی تاج تونل فرعی را نشان می‌دهد. مطابق نتایج با شروع حفاری قسمت III (گام ۲۱)، هم‌گرایی تاج تونل به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. این تغییر ناگهانی به دلیل بالابودن حجم خاک‌برداری در قسمت III نسبت به دو قسمت دیگر است. داده‌های میدانی نیز این افزایش جابه‌جایی را با توجه به گام‌های حفاری نشان می‌دهند.

۵. نتایج تحلیل

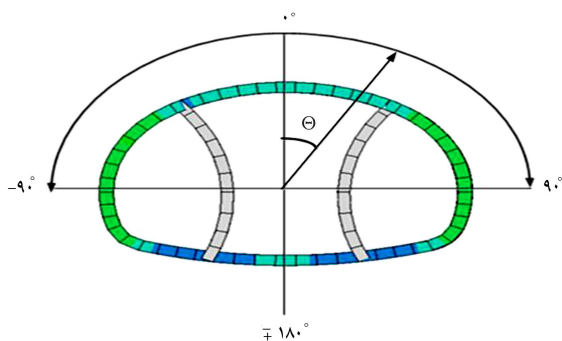
۱.۵. نشست‌های عرضی و طولی

در تقاطع‌ها به دلیل حذف دیواره‌ی تونل و کاهش فشار همه‌جانبه‌ی زمین، تغییرشکل‌های تونل به طور قابل توجهی افزایش می‌یابند. بنابراین کنترل نشست سطحی با پیشروی حفاری، اهمیت بسیاری دارد. دو خط AB و CD برای کنترل نشست‌های عرضی و طولی زمین مشخص شده‌اند (شکل ۱۳). نتایج نشان داد با حفاری تونل اصلی، نشست سطحی به طور تدریجی افزایش می‌یابد و در پایان حفاری، بیشینه‌ی نشست به ۲۴ میلی‌متر می‌رسد.

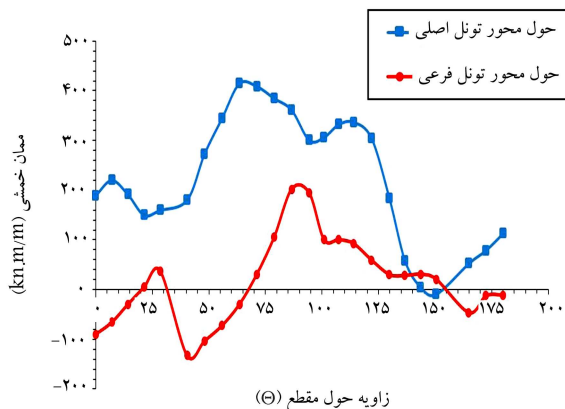
مطابق نتایج با پیشروی تونل فرعی، بیشینه‌ی نشست سطحی تا ۳۱ میلی‌متر افزایش می‌یابد که با ایجاد تقاطع بیشینه‌ی نشست زمین تا ۲۹٪ افزایش یافته است (شکل ۱۴). همچنین نتایج نشان داد که با افزایش ضریب فشار جانبی، نشست سطحی در ناحیه‌ی تقاطع کاهش می‌یابد (شکل ۱۵). بنابراین با افزایش تنش‌های افقی زمین و کاهش تمرکز تنش نشست سطح زمین محدودتر می‌شود. در تونل‌سازی علاوه بر نشست عرضی، تغییرات نشست در مسیر حفاری اهمیت بسیاری دارد. منحنی نشست طولی بیان‌گر فاصله‌ی مؤثر سینه‌ی حفاری تا دورترین مقطع حفاری شده است. بنابراین تونل زمانی به حالت پایدار می‌رسد که پیشروی اضافی تأثیری در نشست‌ها نخواهد داشت. مطابق نتایج با حفاری تونل اصلی در فاصله‌ی حدود ۴ برابر قطر (۴D)، نشست سطحی به بیشینه‌ی مقدار خود می‌رسد (شکل ۱۶). منظور از فاصله‌ی مذکور، طولی از تونل است که هر ۶ مقطع به طور کامل حفاری شده باشند.

۲.۵. اثر ساخت تقاطع در توزیع ممان خمشی

یکی از موضوعات مهم در تونل‌سازی، بررسی بارهای وارد بر پوشش است. در تقاطع‌ها به دلیل هندسه پیچیده، توزیع نیروهای داخلی، اهمیت بسیاری دارد. در مدل‌سازی عددی از المان‌های صفحه‌ی برای شبیه‌سازی پوشش بتنی استفاده شده است. المان‌های پوشش، تحت بارگذاری دو طرفه در دو جهت طولی و محیطی قرار می‌گیرند. جهت طولی در جهت پیشروی تونل و جهت محیطی عمود بر آن در نظر گرفته شده است. در بخش کنونی، بیشتر به بررسی نیروهای داخلی پوشش در محل تقاطع پرداخته شده است. برای بررسی ممان خمشی ۷ مقطع از پوشش تونل اصلی با فاصله ۵ متر انتخاب شده است (شکل ۱۷). مقاطع ۱ و ۲، به ترتیب در مرکز و مجاورت تقاطع واقع شده‌اند. همچنین با استفاده از سیستم مختصات قطبی، تغییرات لنگر خمشی در هر مقطع تعیین شده است (شکل ۱۸). با توجه به هندسه تونل فرعی، بازش جانی در حد فاصل زاویه 44° تا 140° قرار گرفته است. نتایج برای ممان در هر مقطع به دو مؤلفه حول محور تونل اصلی (SM۱) و فرعی (SM۲) تقسیم شده است. قبل از ایجاد بازشو به دلیل تقارن مقطع فقط نیروهای داخلی در حد فاصل زاویه‌های 0° تا 180° بررسی شده‌اند (شکل ۱۹). مطابق نتایج با پیشروی تونل، لنگر خمشی (SM۱) از زاویه 40° تا 60° به طور قابل توجهی افزایش یافته و بیشینه‌ی لنگر خمشی در جهت محیطی (SM۱) برابر با 414.5 Kn.m/m و در زاویه 60° به دست آمده است. همچنین ممان خمشی از زاویه 60° تا 90° به طور تدریجی کاهش و سپس تا زاویه 115° افزایش یافته است. با توجه به توزیع ممان خمشی در مقاطع نعل اسبی، دیواره‌های تونل نسبت به سایر نقاط بحرانی تر هستند. بیشینه‌ی لنگر خمشی طولی (SM۲) 210 Kn.m/m و در زاویه 83° به دست آمده است و با توجه به اینکه پوشش تونل عمده‌تاً تحت ممان خمشی محیطی (SM۱) هستند، به هر حال در طراحی پوشش نمی‌توان از ممان خمشی طولی صرف‌نظر کرد. شکل ۲۰، تغییرات ممان خمشی (SM۱) در مقاطع مختلف از تونل اصلی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ممان خمشی در دو حالت قبل و بعد از ایجاد بازشو بررسی شده است. در مدل‌سازی عددی به روش اجزاء محدود، اگر لنگر خمشی به شکلی اعمال شود که دیواره‌های پوشش به سمت بازشو (تونل) در کشش و خاک مجاور در فشار باشد، لنگر خمشی با علامت مثبت و در غیر این صورت با علامت منفی نشان داده می‌شود.^[۲۰] مطابق نتایج، ساخت تقاطع بیشترین تأثیر را در مقاطع ۱ و ۲ داشته است. در مقطع ۱، با ساخت تقاطع لنگر خمشی (SM۱) از زاویه صفر تا 44° درجه به طور قابل توجهی کاهش یافته است، این تغییر جهت در لنگر خمشی به دلیل افزایش جابه‌جایی افقی زمین و حرکت به سمت بازشو است. ممان خمشی محیطی (SM۱) در زاویه 44° (تاج تقاطع) برابر 313 Kn.m/m به دست آمده است. همچنین مطابق نتایج ممان خمشی در محل اتصال دو تونل در کف تقاطع (144°) تا حدودی کاهش یافته است. شکل ۲۱، اثر ساخت تقاطع در ممان خمشی طولی (SM۲) را نشان

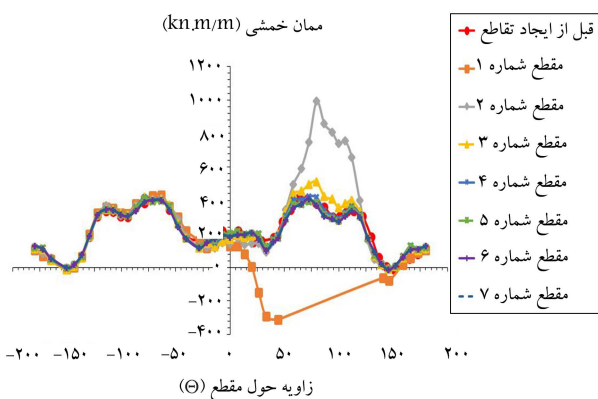


شکل ۱۸. مختصات زاویه‌ی برای بررسی نیروهای پوشش تونل.



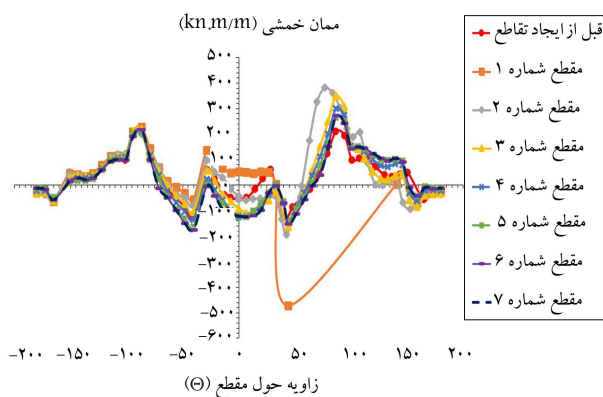
زاویه حول مقطع (θ)

شکل ۱۹. تغییرات ممان خمشی در مقاطع تونل اصلی.



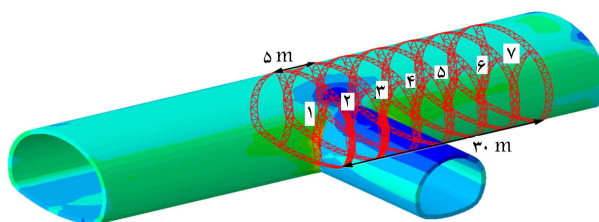
زاویه حول مقطع (θ)

شکل ۲۰. توزیع ممان خمشی محیطی در مقاطع مختلف تونل اصلی (SM۱).

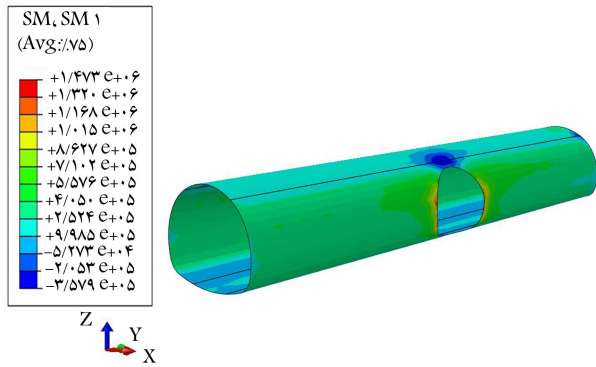


زاویه حول مقطع (θ)

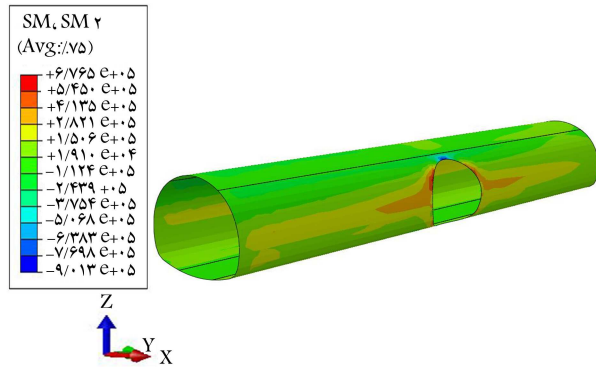
شکل ۲۱. توزیع ممان خمشی محیطی در مقاطع مختلف تونل اصلی (SM۲).



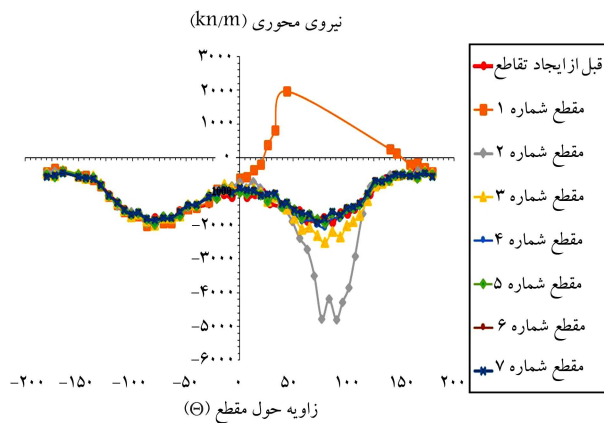
شکل ۱۷. مقاطع در نظر گرفته‌شده برای بررسی اثر ساخت تقاطع.



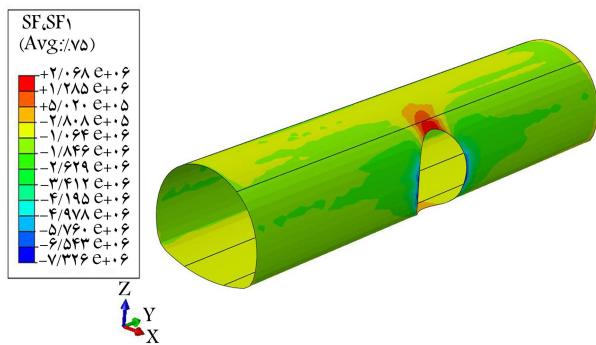
شکل ۲۳. کانتور همان خمشی محیطی در پوشش تونل اصلی (SM1).



شکل ۲۴. کانتور همان خمشی محیطی طولی در پوشش تونل اصلی (SM2).



شکل ۲۵. تغییرات نیروی محوری برای مقاطع مختلف در دو حالت قبل و بعد از ایجاد تقاطع.

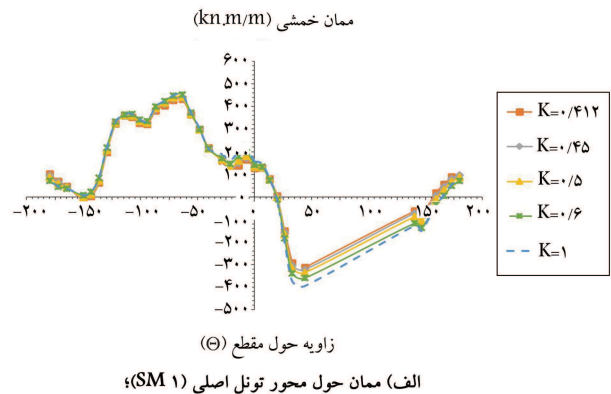


شکل ۲۶. کانتور نیروی محوری در پوشش تونل اصلی (SF1).

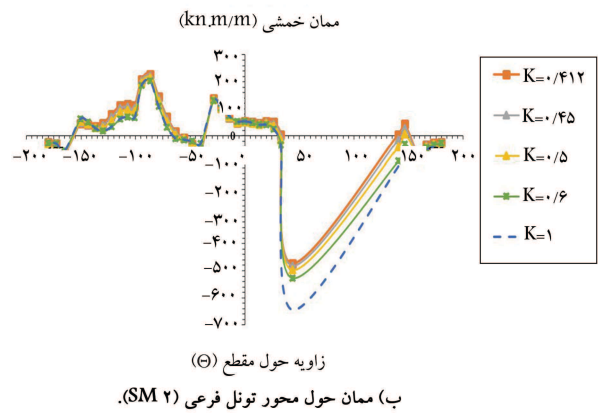
می‌دهد. مطابق نتایج، بیشترین تغییرات در نواحی مجاور تقاطع مشاهده می‌شود. همچنین با ایجاد بازشو، لنگر خمشی در مقطع ۱ و در محل اتصال دو تونل (44°) به طور قابل توجهی کاهش و در دیواره‌ی تونل (مقطع ۲) افزایش یافته است. بنابراین همان خمشی طولی (SM2) در تاج تقاطع به 473 Kn.m/m رسیده است. با توجه به جهت لنگر خمشی (SM2) می‌توان نتیجه گرفت که پوشش تونل در تاج و دیواره‌های تقاطع به ترتیب تحت کشش و فشار است. با توجه به نتایج، پوشش تونل در دیواره‌ی مقابل بازشو نیز (90° تا صفر درجه) تحت تأثیر ساخت تقاطع است، به طوری که این تغییرات با فاصله از مرکز بازشو کاهش یافته است. شکل ۲۲، اثر ضریب فشار جانبی در توزیع همان خمشی در مرکز تقاطع را نشان می‌دهد. مطابق نتایج با افزایش ضریب فشار جانبی، لنگر خمشی در تاج تقاطع (44°) کاهش می‌یابد، به طوری که این افزایش برای همان خمشی طولی (SM2) نسبت به دیگر مؤلفه‌ی همان بیشتر است. شکل‌های ۲۳ و ۲۴، کانتور همان خمشی در پوشش تونل اصلی را نشان می‌دهند.

۳.۵. اثر ساخت تقاطع بر توزیع نیروهای محوری

شکل ۲۵، توزیع نیروی محوری در ۷ مقطع از پوشش تونل اصلی را نشان می‌دهد و مقادیر مثبت و منفی کششی و فشاری بودن نیرو را نشان می‌دهد. کانتور نیروی محوری در پوشش تونل اصلی مطابق شکل ۲۶ است. مطابق نتایج با حفاری تونل فرعی، نیروی محوری تاج تقاطع (44°) از حالت فشاری به کششی تبدیل می‌شود. بیشینه‌ی نیروی محوری محیطی (SF1) پس از ساخت تقاطع 2000 Kn/m است. اثر ساخت تقاطع در نیروی محوری بیشینه در فاصله‌ی ۱۵



الف) همان حول محور تونل اصلی (SM1)؛



ب) همان حول محور تونل فرعی (SM2).

شکل ۲۲. اثر ضریب فشار جانبی در توزیع همان در مقطع شماره‌ی ۱ (پایان تحلیل).

به روش مرحله‌یی و استفاده از دیواره‌های موقت، گزینه‌ی مناسبی برای ساخت تونل‌های سطحی به‌شمار می‌رود.

۲. براساس پروفیل نشست طولی با پیشروی تونل اصلی در فاصله‌ی حدود ۴ برابر قطر (۴D)، نشست سطحی به بیشترین مقدار خود رسیده است و حفاری تونل تأثیری در نشست ندارد. نتایج به‌دست‌آمده سازگاری خوبی با مطالعات پیشین دارد. [۲۳، ۲۱]

۳. با توجه به نتایج در مقاطع غیردایره‌یی، بیشترین ممان در دیواره‌های تونل ایجاد شده است، در صورتی که لنگر خمشی محیطی در تاج تونل به کمتر از ۵٪ این مقدار رسیده است. مطابق نتایج با حفاری تونل اصلی بیشترین ممان خمشی محیطی در دیواره‌ی تونل (۶۰° تا ۱۱۵°) ایجاد شده است. همچنین نتایج نشان داد که بیشینه‌ی ممان خمشی طولی، ۵٪ ممان محیطی است. بنابراین در تونل‌های تک، ممان خمشی محیطی نسبت به مؤلفه‌های دیگر بحرانی‌تر است.

۴. نتایج نشان داد که ممان خمشی در نواحی بازشو به شدت تحت تأثیر ساخت تقاطع است، به طوری که ممان محیطی در دیواره‌ی مجاورت تقاطع تا ۲/۵ برابر افزایش یافته است. همچنین مطابق نتایج، اندازه‌ی ممان خمشی محیطی در تاج تقاطع تا ۱/۸ برابر افزایش یافته و تغییر جهت ممان خمشی در تاج تقاطع به دلیل حرکت پوشش به سمت بازشو بوده است.

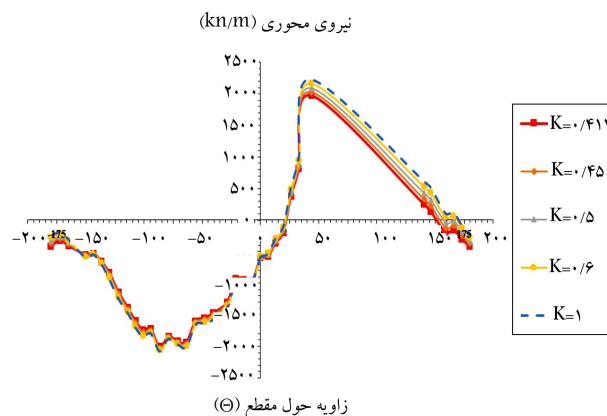
۵. نتایج نشان داد که ساخت تقاطع (جهت محیطی) فقط در نیمی از مقطع پوشش (صفر تا ۹۰°) اثر گذاشته و با توجه به توزیع ممان خمشی (SM1)، پوشش تونل در دیواره‌ی مقابل بازشو تحت تأثیر ساخت تقاطع نبوده است. همچنین نتایج سازگاری بسیار خوبی با مطالعات پیشین نشان می‌دهند. [۷] مطابق نتایج، تغییرات ممان خمشی در دیواره‌ی تونل با فاصله از مرکز تقاطع کاهش می‌یابد، به طوری که در فاصله‌ی ۱۰ متری از مرکز تقاطع، تغییرات مذکور به کمترین مقدار خود می‌رسد.

۶. با ایجاد بازشو، ممان خمشی طولی در دیواره و تاج تونل به ترتیب ۲ و ۳/۵ برابر افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهند در تقاطع‌ها برخلاف تونل تک، لنگر خمشی طولی بحرانی‌تر است.

۷. با حفاری تونل فرعی نتایج نشان داد که ممان خمشی طولی در ناحیه‌ی مجاور تقاطع به بیشترین مقدار خود می‌رسد. همچنین پوشش تونل در دیواره‌ی مقابل بازشو (۹۰° - تا صفر درجه) تحت تأثیر ساخت تقاطع است، به طوری که تغییرات مذکور با فاصله از مرکز بازشو کاهش می‌یابد.

۸. بعد از ساخت تقاطع، اندازه‌ی نیروی محوری در تاج و دیواره به شدت افزایش می‌یابد، به طوری که با فاصله از مرکز تقاطع اثر ایجاد بازشو در نیروی محوری کاهش می‌یابد. با توجه به مقدار بالای نیروی محوری در تاج و دیواره‌ها، پوشش تونل در نواحی به ترتیب دچار گسیختگی کششی و فشاری خواهد شد. همچنین بررسی‌های گذشته نیز نشان دادند که شکست کششی و فشاری در تاج و دیواره‌ها، محتمل‌ترین نوع گسیختگی در تقاطع‌ها به‌شمار می‌روند. [۱۵] با توجه به توزیع نیروهای داخلی در پوشش تونل پیشنهاد می‌شود که ضخامت پوشش تا فاصله‌ی ۱۵ متری از مرکز تقاطع افزایش یابد.

۹. همچنین نتایج نشان داد نیروهای داخلی پوشش وابسته به ضریب فشار جانبی خاک نیستند و با افزایش ضریب فشار جانبی، اندازه‌ی نیروهای داخلی فقط در محل اتصال دو تونل افزایش می‌یابند.



شکل ۲۷. اثر ضریب فشار جانبی در تغییرات نیروی محوری در مقطع شماره ۱ (پایان تحلیل).

متری (۱/۵ برابر قطر تونل فرعی) از مرکز تقاطع مشاهده می‌شود و در فواصل دورتر، ساخت تقاطع تأثیری در پوشش تونل اصلی ندارد. با ایجاد بازشو، نیروی محوری در فاصله‌ی ۵ متری از تقاطع (مقطع ۲) به شدت کاهش می‌یابد. با توجه به علامت منفی نیروی محوری، پوشش تونل تحت فشار است. مطابق شکل ۲۵، ساخت تقاطع بیشترین تأثیر را در پوشش دیواره‌ی تونل در محل بازشو دارد. پس از ساخت تقاطع، بیشینه‌ی نیروی محوری فشاری در مقطع شماره ۲ و برابر با 4900 Kn/m به‌دست آمده است. همچنین با توجه به مقدار بالای نیروی محوری در تاج و دیواره‌های تقاطع می‌توان نتیجه گرفت که پوشش تونل در حالت‌های کششی و فشاری به گسیختگی خواهد رسید. شکل ۲۷، اثر ضریب فشار جانبی در نیروی محوری (مقطع ۱) را نشان می‌دهد. مطابق نتایج با افزایش ضریب فشار جانبی، تغییرات فقط نیروی محوری در تاج تقاطع (۴۴°) مشاهده می‌شود.

۶. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، به تحلیل عددی تقاطع تونل حکیم واقع در شهر تهران پرداخته شده است. شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس صورت گرفته و نتایج تحلیل عددی با داده‌های میدانی مقایسه شده است. همچنین در مدل‌سازی مذکور، تمام مراحل حفاری و نصب پوشش مطابق با روش اجرا در نظر گرفته شده است. بیشتر تمرکز به بررسی اثر بازشو جانبی در تغییر شکل‌ها و نیروهای داخلی پوشش تونل بوده است. علاوه بر این، یک مطالعه‌ی پارامتریک به منظور اثر فشار همه‌جانبه‌ی خاک در پاسخ‌های سازه‌ی پوشش صورت گرفته است. براساس تحلیل‌های عددی، نتایج اصلی به این شرح هستند:

۱. نتایج عددی نشان داد که پس از حفاری تونل اصلی، بیشینه‌ی نشست در محور تونل برابر با ۲۴ میلی‌متر به‌دست آمد که با توجه به دهانه‌ی بزرگ و عمق کم تونل، نشست به‌دست آمده بسیار مطلوب است. همچنین مطابق نتایج با ایجاد بازشو، نشست سطحی تا ۲۹٪ افزایش می‌یابد، که بیشترین نشست در فاصله‌ی ۲ متری از محور تونل اصلی به سمت بازشو ایجاد شده است. بنابراین حفاری

پانوشتها

1. intersections
2. Hsueh Shan tunnel
3. lining
4. ANSYS
5. ABAQUS
6. main tunnel
7. child tunnel
8. steps
9. child tunnel diameter

منابع (References)

1. Hsiao, F.-Y., Yu, C.-W. and Chern, J.-C. "Modeling the behaviors of the tunnel intersection areas adjacent to the ventilation shafts in the Hsueh Shan tunnel", *Proceedings of the International Symposium on Design, Construction and Operation of Long Tunnels*, Taipei (2005).
2. Chen, C.N. and Tseng, C.T. "2D tunneling chart from redistributed 3D principal stress path", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **25**(4), pp. 305-314 (2010).
3. Gercek, H. "Stability considerations for underground excavation intersections", *Mining Science and Technology*, **4**(1), pp. 49-57 (1986).
4. Riley, W.F. "Stresses at tunnel intersections", *Journal of the Engineering Mechanics Division*, **90**(2), pp. 167-180 (1964).
5. Tsuchiyama, S. and et al. "Deformation behavior of the tunnel under the excavation of crossing tunnel", *Proceedings of the 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, INNSBRUCK, AUSTRIA. VOLUMES 1-3, Publication of Balkema (AA) (11-15 April, 1988).
6. Chen, C.N., Chen, J.S. and Lu, E. "The mechanical behavior of 45 tunnel intersection inducing by construction through various rock masses", *J. Chin. Inst. Civil Hydraul. Eng.*, **14**(1), pp. 159-165 (2002).
7. Lu, T.-Ka., Guo, B.-H. and Cheng, Li-Ch. "Numerical modeling for further understanding of roadway junction stability behaviour at deep underground", *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, **14**(1), pp. 38-43 (2008).
8. Liu, H.-Y., Small, J.-C. and Carter, J.-P. "Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney region", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **23**(4), pp. 399-420 (2008).
9. Hsiao, F.Y., Wang, C.-L. and Chern, J.-C. "Numerical simulation of rock deformation for support design in tunnel intersection area", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **24**(1), pp. 14-21 (2009).
10. Golshani, A. and Bagheri, O. "Numerical modelling of tunnel intersection in Tehran alluvium-case study of ni-ayesh tunnel", Thesis of Master of Science (M.Sc.) in Civil Engineering, Geotechnics Department of Tarbiat Modares University, Tehran (2012).
11. Nunes, M.A. and Meguid, M.A. "A study on the effects of overlying soil strata on the stresses developing in a tunnel lining", *Tunneling and Underground Space Technology*, **24**(6), pp. 716-722 (2009).
12. Liu, X. and Wang, Y. "Three dimensional numerical analysis of underground bifurcated tunnel", *Geotechnical and Geological Engineering*, **28**(4), pp. 447-455 (2010).
13. Spyridis, P. and Bergmeister, K. "Analysis of lateral openings in tunnel linings", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **50**, pp. 376-395 (2015).
14. Li, Z., Soga, K. and Wright, P. "Long-term performance of cast-iron tunnel cross passage in London clay", *Tunneling and Underground Space Technology*, **50**, pp. 152-170 (2015).
15. Bian, K., Liu, J., Xiao, M. and Liu, Zh. "Cause investigation and verification of lining cracking of bifurcation tunnel at huizhou pumped storage power station", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **54**, pp. 123-134 (2016).
16. Li, Y., Jin, X., La, Zh., Dong, J. and Guo, J. "Deformation and mechanical characteristics of tunnel lining in tunnel intersection between subway station tunnel and construction tunnel", *Tunnelling and Underground Space Technology*, **56**, pp. 22-33 (2016).
17. *ABAQUS/Standard User's Manual*, Vol. I & II (ver. 6.13), Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, Rhode Island (2014).
18. P.O.R. Consulting Engineers Company, Geotechnical Investigations & Foundation Report for Hakim Tunnel Project (2013).
19. Jones, B. "Stresses in sprayed concrete tunnel junctions", Diss. University of Southampton (2007).
20. Bagherpour, R. and Mahdevari, S. "3D numerical simulation to consider the effects of EPB tunneling on the existing support system", *Journal Homepage*, **4**(3), pp. 256-260 (2014).
21. Dasari, G.R., Rawlings, C.G. and Bolton, M.D. "Numerical Geotechnical modelling of a NATM tunnel construction in London clay", *Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, pp. 491-496 (1996).
22. Vermeer, P.A., Bonnier, P.G. and Moller, S.C. "On a smart use of 3D-fem in tunneling", *Proceeding of 8th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics* (2002).