تحلیل اندرکنش عددی سیستم نگهداری تونل‌های شهری با محیط اطراف در حالات تابع زمان و مستقل از زمان

حسن شرفی* (استادیار)

یزدان شمس‌ملکی (دانشجوی دکتری)

دانشکده فنی مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه رازی کرمانشاه

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۷)
دوری ۲ - ۳۴، شماره ۱/۲، ص. ۵۵-۶۶

پیش‌بینی رفتار تونل‌های شهری در سنگ‌های ضعیف با رفتار مشابه رفتار خاک و یا سنگ‌های با قابلیت تورم و مچاله‌شوندگی، یکی از چالش‌های مهم در مهندسی تونل و مکانیک سنگ به شمار می‌رود. در پژوهش حاضر، مدل دو بعدی کرنش مسطح از یک نمونه تونل شهری واقعی با مقطع نعل اسبی به کمک روش عددی اجزاء محدود دو بعدی مدل‌سازی شده است. هدف از مدل‌سازی، بررسی اثر لحاظ یا عدم لحاظ عامل زمان در مدل رفتاری مصالح در رفتار سیستم نگهداری تونل و نیز رفتار تنش - کرنش و تغییر شکل توده‌ی سنگی اطراف آن است. برای یک توده‌ی سنگی یکسان جهت مدل‌سازی مسئله، دو مدل رفتاری مور - کولمب (MC) و مدل خزش خاک نرم (SSC) در نظر گرفته شده‌اند. نتایج دو مدل مذکور در زمینه‌ی رفتار سازه‌ی سیستم نگهداری تونل و نیز رفتار تنش - کرنش و تغییر شکل توده‌ی سنگی اطراف آن مقایسه شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که با لحاظ عامل زمان در پاره‌ی از موارد، اختلاف نتایج تا حد ۶۳٪ خواهد بود. جهت صحت‌سنجی مسئله‌ی پژوهش، از تونلی با شرایط مشابه و مدل رفتاری سنگ درزه‌دار (JRM) در قالب تحلیل‌های اجزاء محدود دو و سه بعدی استفاده شده است. نتایج صحت‌سنجی، توافق خوبی مابین نتایج حاصل شده توسط مدل‌های عددی پژوهش حاضر و مدل عددی نوشتار مرجع نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: تونل شهری، سیستم نگهداری، عامل زمان، مدل‌های مور - کولمب و خزش خاک نرم، مدل سنگ درزه‌دار.

۱. مقدمه

و بلندمدت سازه‌های تونلی، مستقیماً با کیفیت حمل و نقل ریلی در ارتباط است.

تأمین مسیری امن برای عبور سیستم قطارهای زیرزمینی، با احداث تونل‌های پایدار، علاوه بر تأمین آسایش و امنیت جانی و مالی مسافران، باعث کاهش چشمگیر هزینه‌های نگهداری، تعمیر و ترمیم سازه‌های مذکور می‌شود. از طرف دیگر، پروژه‌های ریلی تونلی به سبب هندسه‌ی خطی، در مسیر خود از سازندها و ساخت‌گاه‌های مختلفی به لحاظ زمین‌شناسی عبور می‌کنند، برای نمونه: گاهی از مسیرهای حاوی توده‌های سنگی قوی، در برخی موارد از درون دیوهای خاکی و در پاره‌ی از دیگر موارد از میان توده‌های سنگی ضعیف. عمده‌ی مشکلات حاد شده در زمینه‌ی ناپایداری تونل‌ها، مرتبط با بروز تغییر شکل‌های ناخواسته، جریان آب به داخل تونل، نشست سطحی محیط مجاور تونل و بروز ضعف و ناپایداری در بخش سازه‌ی سیستم نگهداری تونل بوده است. نوشتارهای متعددی در زمینه‌ی تحلیل پایداری تونل‌های شهری،^[۱-۲۶] در سال‌های اخیر ارائه شده است.

با توجه به پیشرفت روزافزون جمعیت شهری و افزایش تقاضای سفرهای درون‌شهری و برون‌شهری، گسترش سیستم‌های حمل و نقل ریلی اجتناب‌ناپذیر به نظر می‌رسد. سیستم حمل و نقل ریلی به شکل‌های شناخته شده‌ی راه‌آهن یا مترو، به دلیل امنیت بیشتر نسبت به دیگر روش‌های حمل و نقل، امکان گسترش آسان شبکه، ارزانی و توانایی جابه‌جایی تعداد زیادی مسافر و بار، همواره به عنوان یک سیستم قابل قبول، مورد توجه برنامه‌ریزان و مسئولان شهری در نقاط مختلف دنیا بوده است. ساخت و ساز چنین سیستم‌های حمل و نقلی با احداث پل‌ها، تونل‌های سطحی و عمیق، گذرگاه‌ها، ایستگاه‌ها و تأسیسات جانبی فراوان دیگری همراه است. تونل‌ها به عنوان بخش جدایی‌ناپذیر بیشتر پروژه‌های حمل و نقل ریلی، از جمله پروژه‌های احداث متروهای شهری، به شمار می‌روند. تأمین پایداری کوتاه‌مدت

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۱۰/۲۷، اصلاحیه ۱۳۹۵/۳/۳، پذیرش ۱۳۹۵/۶/۶

DOI: 10.24200/J30.2018.1338

عمده‌ی مطالعات مذکور، مرتبط با تونل‌های ساخته شده در کشور ترکیه، [۶-۲۵] هستند. ترکیه در دهه‌ی فعلی سهم زیادی از مطالعات درخصوص تونل‌سازی را به خود اختصاص داده است. ناپایداری تونل‌های مترو و سیستم نگهداری آن‌ها که در توده‌های سنگی ضعیف و توده‌های خاکی با شاخص‌های سختی و مقاومتی پایین حفر شده‌اند، موضوع مورد بحث عمده‌ی مطالعات مذکور در کشور ترکیه است. اصولاً توزیع تنش‌های قائم و جانبی در توده‌های خاکی و سنگی ضعیف که ضریب فشار جانبی کمتر از ۱ دارند ($K < 1/0$)، تابع ثقل است؛ به طوری که با افزایش عمق، فشار سربار این مصالح افزایش می‌یابد و در مقابل در سنگ‌های با مقاومت متوسط تا زیاد با ضریب فشار جانبی بیشتر از ۱ ($K > 1/0$) یعنی سنگ‌های سخت، تابعی از وضعیت نکتونیک (زمین ساخت) منطقه‌ی تونل و نوع چین‌خوردگی و گسلش در توده‌های سنگی است. [۵] در حفاری تونل‌های شهری، توده‌های سنگی ضعیف عمدتاً از مصالحی از قبیل: لای سنگ، رس سنگ، ماسه سنگ، شیست، گرافیت، شن سنگ، سنگ آهک و کنگنومرا، [۱۱-۱۲] از این دست مصالح تشکیل شده‌اند. خصوصیات ضعیف و ناپایداری عمده‌ی چنین گروه‌هایی از مصالح سنگی، شامل ضعف‌هایی از قبیل: هم‌گرایی و مچاله‌شوندگی^۱ به داخل تونل، تورم^۲، [۱۳-۱۹] درزه‌داری،^۳ تورق و شیب‌سوزینی،^۴ برگ‌شدگی توده‌ی سنگی،^۵ توزیع جهات صفحات نشستی^۶ و نوع رخ‌یافتگی و بروز شکاف^۷ می‌شود. [۵] نکته‌ی مهمی که رفتار توده‌های سنگی ضعیف و سخت را از هم مجزا می‌سازد، عامل زمان است. از دیدگاه نظریه‌ی خمیری، جریان یافتگی و وقوع تسلیم در توده‌های سنگی سخت به شدت ناگهانی و فرایندی مستقل از زمان است، [۵] بدین جهت است که بررسی گوه‌های گسیختگی در توده‌های سنگی سخت حائز اهمیت است، حال آنکه در خاک و توده‌های سنگی ضعیف (با رفتار خاک‌گونه)، رویه‌ی مذکور کاملاً وابسته به زمان است.

در کنار وابسته بودن به زمان، وجود انواع مختلفی از مصالح سنگی و مصالح خاکی، از قبیل رس و خاک‌های نرم در توده‌های سنگی ضعیف، باعث بروز رفتارهایی از قبیل تورم، تحکیم و خزش در آن‌ها می‌شود. مدل‌های رفتاری مختلفی برای پیش‌بینی رفتار توده‌های سنگی و خاکی در تونل‌سازی پیشنهاد شده است. مدل‌هایی از قبیل مدل ارتجاعی خطی - خمیری کامل مور - کولمب^۸ (MC)، مدل ارتجاعی غیرخطی - خمیری کامل هوک - براون (HB)، مدل ارتجاعی خطی - خمیری انیزوتروپ (ناهمسان‌گرد) سنگ درزه‌دار (JRM)، مدل بارتون - بندیس (BB) و مدل پاتون (PM). [۵]

نقطه‌ی قوت بیشتر مدل‌های مذکور، در نظر گرفتن اثر مقاومت کششی توده‌ی سنگی (MC, HB)، در نظر گرفتن وضعیت درزه‌داری و شرایط سطح درزه‌ها به لحاظ زبری سطوح (HB, JRM, BB, PM) و در نظر گرفتن پارامترهای مقاومتی خاک و سنگ، از قبیل: چسبندگی، اصطکاک و اتساع (MC, HB) است. [۹-۱۴] اما تمام مدل‌های رفتاری مذکور در یک نکته با هم مشترک هستند و آن هم عدم لحاظ زمان واقعی در برآورد تنش - کرنش مصالح است، در حقیقت همه‌ی آن‌ها، رفتار مصالح را به شکل مستقل از زمان برآورد می‌کنند.

برای نمونه در پژوهشی در سال ۲۰۱۲، [۱۷] برای برآورد رفتار تابع زمان حفاری و نصب نگهداری در توده‌ی سنگی ضعیف با خصوصیات تورم و مچاله‌شوندگی، ناگزیر به استفاده از مدل رفتاری خزش خاک نرم (SSC)^۹ شده‌اند. در حقیقت رفتار تابع زمان توده‌های سنگی ضعیف ($K < 1$)، توسط شکلی از مدل رفتاری کم‌کلی اصلاح شده (MCC)^{۱۰} با لحاظ عامل زمان و خزش یک بعدی در نظر گرفته شده و مدل SSC برای توصیف رفتار مصالح سنگی ضعیف مناسب دانسته شده است. در توده‌های سنگی ضعیف، سیستم نگهداری شامل قاب‌های فولادی با فواصل کم (در حد ۰/۵ تا ۱/۵ متر) است که در راستای طولی به هم دوخته شده‌اند. در

چنین توده‌های سنگی بی، برای نصب سیستم نگهداری در فاصله‌ی دو قاب فولادی تونل، بازه‌ی زمانی کوتاهی در اختیار است. از طرفی رفتار کوتاه‌مدت و بلندمدت تابع زمان تونل، در حین حفاری و نصب سیستم نگهداری توسط مدل‌هایی از قبیل مور - کولمب به هیچ وجه قابل پیش‌بینی و ارزیابی نیست. در پژوهش حاضر برای نشان دادن میزان اختلاف در نتایج دو مدل تابع زمان (SSC) و مستقل از زمان (MC) در فرایند حفاری تونل و نصب سیستم نگهداری آن، مطالعه‌ی انجام شده درخصوص تونل T۱۳، [۲۰-۲۱] در مسیر راه‌آهن سریع‌السیر آنکارا - استانبول بازبینی و بازتحلیل شده است. به بیان دیگر، مقطع - عرضی تونل موجود در مرجع^[۱] به عنوان مقطع عرضی انجام مطالعات پارامتری در مطالعه‌ی حاضر در نظر گرفته شده و مشخصات مصالح در دو مدل رفتاری MC و SSC از نوشتار مرجع^[۱] به دست آمده است. همچنین صحت‌سنجی نتایج پژوهش حاضر، با استفاده از مدل رفتاری JRM مطرح شده به همراه پارامترهای آن در نوشتار مرجع^[۱] انجام شده است. از طرفی الگوی کلی انجام محاسبات براساس مطالعات مراجع^[۲۰-۲۱] است. در حقیقت آنچه که در بسیاری از مطالعات، [۲۰-۵۲] از آن غفلت شده است، مقایسه‌ی نتایج مدل مستقل از زمان MC و مدل تابع زمان SSC در فرایند حفاری و نصب سیستم نگهداری، در یک تونل مشخص و در توده‌ی سنگی ضعیف است.

با توجه به اینکه توده‌ی سنگی از نوع ضعیف است و مقدار ضریب فشار جانبی حالت سکون K کوچک‌تر از ۱ دارد، فشار سربار روی تونل، تابعی از عمق قرارگیری تونل است و در عمق‌های پایین‌تر، فشار قائم و افقی در مصالح سنگی ضعیف، بیشتر می‌شود. در حقیقت وقوع جریان خمیری در مصالح سنگی ضعیف، تابعی از زمان است؛ [۷-۱۱] چرا که چنین مصالحی از خود رفتار خزشی و عکس‌العمل‌های تابع زمان نشان می‌دهند. وقوع چنین رفتارهای خزشی در مصالح سنگی ضعیف، ناشی از نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی آن‌هاست که عموماً شامل کانی‌های فعال رسی هستند. در مقابل در سنگ‌های سخت، توزیع تنش‌های افقی و قائم نسبت به یکدیگر و عمق، تابعی از وضعیت تکتونیکی است و عموماً به عمق بستگی ندارد، مثلاً ضریب K در تکتونیک گسلش و چین‌خوردگی نرمال با ضریب K در چین‌خوردگی‌های معکوس و امتدادلغز متفاوت است و مقادیر آنها ممکن است بزرگ‌تر از عدد ۱ باشد. به هر حال هدف اصلی در مطالعه‌ی حاضر، بررسی تأثیر عامل زمان، تأثیر لحاظ تفکیک مراحل حفاری، و نصب سیستم نگهداری تونل شهری و خزش مصالح سنگی ضعیف در رفتار تونل و سیستم نگهداری آن است. در حقیقت دو مدل رفتاری مور - کولمب (MC) مدل مستقل از زمان و خزش خاک نرم (SSC) (مدل وابسته به زمان)، برای تونلی واحد در خاکی ثابت، جهت مدل‌سازی عددی نتایج عددی - تجربی مطالعات مراجع^[۱] در نظر گرفته شده‌اند.

۲. مدل‌سازی عددی حفاری و تسلیح تونل

در پژوهش حاضر، مدل‌سازی عددی دو و سه بعدی تونل با مقطع نعل اسبی در چارچوب مقایسه‌ی دو مدل رفتاری مختلف ارائه شده است. هدف از مقایسه‌ی دو مدل رفتاری مختلف، به حساب آوردن اثر عامل زمان و نیز خزش یک بعدی مصالح بوده است. مدل‌های رفتاری استفاده شده در مطالعه‌ی حاضر، جهت انجام مطالعات پارامتری مقایسه‌ی نیز صحت‌سنجی نتایج، شامل مدل‌های مور - کولمب (MC)، مدل خزش خاک نرم (SSC) و مدل توده‌ی سنگ درزه‌دار (JRM) هستند. [۲۳] مدل رفتاری مور - کولمب (MC) یک مدل رفتاری عمومی ارتجاعی - خمیری کامل است که برای پیش‌بینی رفتار توده‌های خاکی و سنگی تا به حال بارها استفاده شده است.

شکل ۱. نمایش هندسه‌ی کامل تونل مدل‌سازی شده با ابعاد.^[۱]

شکل ۲. نمایش هندسه و مش‌بندی مثلثی اجزاء محدود تونل نعل اسبی تحت مطالعه.

ابعاد مش‌بندی مدل تقریباً 10° برابر پهناي تونل در نظر گرفته شده است.^[۱] همچنین بنا بر تقارن هندسه و بارگذاری مدل‌های عددی، نیمی از هندسه‌ی تونل مدل‌سازی شده است. المان Plate برای مدل‌سازی شاتکریت و المان کششی ژئوگرید برای مدل‌سازی پیچ سنگ‌ها (راک بولت‌ها) در مدل عددی استفاده شده است. در تمامی مدل‌های عددی، پیچ سنگ‌ها از نوع میلگرد آجدار به قطر ۲۸ میلی‌متر و طول ۸ متر انتخاب شده‌اند.^[۱] ضخامت شاتکریت بتنی نیز ۰/۴ متر بوده است. مراحل تعریف مدل عددی، حفاری و نصب سیستم نگهداری تونل در ۷ فاز مجزا به این شرح انجام شده است:

۱. فاز ۱: تعریف مدل و برقراری تنش‌های اولیه بر حسب نقل و تعریف فرایند k_t ؛
۲. فاز ۲: حفاری بخش تاج مقطع عرضی مدل عددی دو بعدی؛
۳. فاز ۳: نصب سیستم نگهداری بخش تاج مدل؛
۴. فاز ۴: حفاری بخش بنج مدل عددی؛
۵. فاز ۵: نصب سیستم نگهداری بخش بنج مدل؛
۶. فاز ۶: حفاری بخش اینورت مدل؛
۷. فاز ۷: نصب سیستم نگهداری تونل در کف و اینورت.

از جمله ویژگی‌های عمده‌ی مدل مور - کولمب (MC) می‌توان به عدم در نظر گرفتن سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی در رفتار مصالح، عدم لحاظ اثرات نسبت بیش تحکیمی و عدم لحاظ تاریخی تنش‌ی خاک و سنگ در تحلیل عددی اشاره کرد.

برعکس، مدل رفتاری خزش خاک نرم (SSC)، یک مدل ویسکوزیمیری (گرانرو - خمیری) است که بر پایه‌ی مدل کم - کِلِی اصلاح شده (MCC) بنا نهاده شده است و مراحل مختلف رفتار بارگذاری - باربرداری - بارگذاری مجدد (LUR)^[۱] در مصالح خاکی و سنگ‌های ضعیف را به خوبی مدل‌سازی می‌کند. تفاوت عمده‌ی مدل SSC با مدل کم - کِلِی اصلاح شده (MCC) در آن است که عامل زمان را به شکل خزش مصالح وارد محاسبات مدل رفتاری SSC می‌کند. خزش یک بعدی، که در مدل SSC لحاظ می‌شود،^[۲-۴] باعث تغییر پارامترهای مدل کم - کِلِی اصلاح شده (MCC) می‌شود. از جمله توانایی‌های مدل SSC نسبت به مدل MC، لحاظ کردن اثرات نسبت بیش تحکیمی و نیز تاریخی تنش‌ی وارد بر خاک در حین تعریف شرایط اولیه در مدل‌های عددی است. اعمال زمان واقعی در روند انجام محاسبات عددی، عامل اصلی ایجاد تمایز بین دو مدل رفتاری MC و SSC است.

و در نهایت، مدل سنگ درزه‌دار (JRM)، یک مدل ارتجاعی - خمیری کامل انیزوتروپیک است که در پژوهشی در سال ۲۰۱۴^[۱] و پیش از آن در نرم‌افزارهای PLAXIS 2D^[۲] و PLAXIA 2D TUNNEL^[۳] مطرح شده است. توانایی عمده‌ی مدل JRM، در قابلیت آن برای شبیه‌سازی رفتار توده‌های سنگی درزه‌دار نمایان می‌شود. در مدل JRM، رفتار گسیختگی توده‌ی سنگ درزه‌دار توسط پارامترهای مقاومتی نظیر معیار ارتجاعی - خمیری کامل مور - کولمب تعریف می‌شود، که شامل پارامترهای چسبندگی (c)، زاویه‌ی اصطکاک داخلی (φ) و زاویه‌ی اتساع (ψ) مصالح می‌شوند. همچنین پارامترهای سختی خاک در مدل سنگ درزه‌دار (JRM)، شامل پارامترهای مدل ارتجاعی از قبیل مدول ارتجاعی (E) و نسبت پواسون (ν) می‌شوند (شامل: پارامترهای E_1 و ν_1). برای تعریف پارامترهای سختی در صفحه‌ی عرضی انیزوتروپی (ناهمسان‌گردی) از تعریف مدول ارتجاعی، نسبت پواسون و مدول برشی با اندیس‌گذاری شماره‌ی ۲ استفاده می‌شود (شامل: پارامترهای E_2 و ν_2 و G_2). در آخر برای تعریف صفحات ناهمسان‌گردی در توده‌ی سنگ درزه‌دار، تا بیشینه‌ی ۳ صفحه می‌توان به کمک تعریف زاویه‌ی شیب صفحه‌ی درزه یعنی زاویه‌ی α_1 و زاویه‌ی جهت شیب صفحه‌ی درزه α_2 تعریف کرد. در جدول ۱، مشخصات مقاومتی و سختی توده‌های سنگی در تحلیل‌های پارامتری و صحت‌سنجی و در جدول ۲، مشخصات المان‌های سازه‌ی سیستم نگهداری تونل‌ها ارائه شده است.

مقطع عرضی تونل مطابق شکل ۱، به ارتفاع کلی ۱۱/۴ متر و پهناي بیشینه‌ی ۱۳/۳ متر،^[۱] به کمک روش عددی اجزاء محدود دو بعدی مدل‌سازی شده است. مدل‌سازی مقطع مذکور با دو هدف انجام مطالعات پارامتری و نیز صحت‌سنجی نتایج پژوهش انجام شده است. ابعاد بخش‌های مختلف تونل از قبیل: اینورت، بنج، و تاج آن در شکل ۱ نمایش داده شده است. همچنین مطابق شکل ۲ از تعداد ۳۳۴ المان مثلثی ۱۵ گره‌ی برای مدل‌سازی اجزاء محدود دو بعدی تونل در مطالعات پارامتری در نرم‌افزار PLAXIS 2D^[۲] استفاده شده است. مطابق شکل ۲، از مش‌بندی با تراکم بیشتر در مجاورت تونل و مش‌بندی با تراکم (چگالی) کمتر در ناحیه‌ی دور از تونل استفاده شده است. مش‌بندی در مدل عددی پارامتری دو بعدی در نوشتار حاضر، توسط تحلیل‌های حساسیت مش‌بندی به کمک کنترل پارامترهای مدل‌سازی و نیز خروجی‌ها به دست آمده است. شرایط مرزی کف مدل عددی دو بعدی از نوع مقید در دو راستا و در کناره‌های مدل از نوع غلظتی انتخاب شده است.

جدول ۱. مشخصات توده‌های سنگی در حال حفاری در مطالعات پارامتری و جهت صحت‌سنجی. [۲۰۱]

مدل‌های رفتاری			یکای پارامترها	پارامترهای مدل‌های رفتاری مصالح
JRM	SSC	MC		
(صحت سنجی)	(تحلیل پارامتری)	(تحلیل پارامتری)		
$E_1 = ۸۶/۱۵$	-	۱۲۴۰	$E(MPa)$	مدول ارتجاعی
$E_T/G_T = ۷۶/۸/۲۹/۰۹$	-	-	$\gamma_{sat}(kN/m^3)$	وزن مخصوص اشباع
$\gamma = ۲۰/۵۲$	۲۲/۸۴	۲۲/۸۴	$\gamma_{dry}(kN/m^3)$	وزن مخصوص خشک (طبیعی)
$19/06$	۲۰/۶۹	۲۰/۶۹	$C(kPa)$	چسبندگی
$C_1 = ۰/۰۶۸$	۵۷۹	۵۷۹	$\varphi(deg)$	زاویه اصطکاک
$C_2 = ۰/۰۷۲$	۱۹	۱۹	$e(-)$	تخلخل
$\varphi_1 = ۳۱$	۰/۲۶	۰/۲۶	$v(-)$	نسبت پواسون
$\varphi_2 = ۲۴$	-	-	$\kappa^*(-)$	شاخص تورم اصلاح شده
-	۰/۲۸۳	-	$\lambda^*(-)$	شاخص فشردگی اصلاح شده
$v_1 = ۰/۲۹$	۰/۳۲۴	-	$\mu^*(-)$	شاخص خزش اصلاح شده
$v_2 = ۰/۳۲$	۰/۰۱۶	-	$K(-)$	ضریب فشار جانبی حالت NC
-	۰/۶۱۱	۰/۶۱۱	$M(-)$	پارامتر (M)
-	۰/۷۳۵	-		
$\alpha_{1,1} = ۶۶$	-	-	Dip/dip direction (deg)	شیب/جهت شیب درزه‌ها (α_1, α_2)
$\alpha_{2,1} = ۲۲$	-	-		
$\alpha_{1,2} = ۷۰$	-	-		
$\alpha_{2,2} = ۴۰$	-	-		
$۰/۱۱۵$	-	-	UCS(MPa)	مقاومت فشاری تک‌محوری

جدول ۲. مشخصات المان‌های سازه‌ی موجود در مدل‌های عددی دو و سه بعدی. [۲۰۱]

مصلح	نوع رفتار	سختی محوری	سختی خمشی	وزن واحد طول	نسبت پواسون
		$EA(kN/m)$	$EI(kN.m^2/m)$	$w(kN/m/m)$	$v(-)$
شاتکریت بتنی	ارتجاع خطی	۱۳۲۸۰۰۰۰	۱۷۷۰۶۶	۹/۶	۰/۱۵
راک بولت	ارتجاع خطی	۵۶۷۰۰	-	-	۰/۱۵

در مرجع،^[۱] تغییر مکان قائم تونل پس از نصب سیستم نگهداری NDSS بین ۱۳۸ تا ۱۵۰ میلی‌متر ذکر شده است که در تحلیل دو بعدی مطابق شکل ۳ ب مقدار بیشینه‌ی ۱۴۰ میلی‌متر به‌دست آمده است. همچنین مقدار بیشینه‌ی تغییر مکان قائم از اندازه‌گیری‌های میدانی ۱۵۰ میلی‌متر برآورد شده است. در مرجع،^[۱] نتایج کانتوری تغییر شکل‌های کلی تونل پس از نصب سیستم NDSS در حدود ۲۸ میلی‌متر (تورم در کف) درج شده است (مطابق شکل ۴ ب) که در تحلیل‌های سه بعدی پژوهش حاضر، این میزان در حدود ۲۶ میلی‌متر به‌دست آمده است (مطابق شکل ۴ الف) که توافق خوبی در نتایج تغییرشکل حاصل نشان می‌دهد. مطابق نتایج حاصل از انجام مطالعات عددی اجزاء محدود دو و سه بعدی در بخش صحت‌سنجی پژوهش حاضر، یکی از راهکارهای اصلی حفاری تونل و نصب سیستم نگهداری آن در توده‌های سنگی، پتانسیل تورم و مچاله‌شوندگی، حفاری در گام‌های طولی بسیار کوتاه در امتداد محور طولی تونل است. در چنین تونل‌هایی، بهترین شیوه‌ی حفاری و برداشت مصالح بیشینه، در گامی به میزان فاصله‌ی بین دو قاب فولادی تسلیح تونل است.

در میان ۷ فاز ذکر شده، سه فاز ۳، ۵ و ۷ به جهت نصب سیستم نگهداری بخش‌های مختلف مقطع عرضی تونل، اهمیت محاسباتی بیشتری دارند.

۳. صحت‌سنجی نتایج

چنانچه در بخش‌های پیشین نیز بیان شد، به جهت صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی اجزاء محدود تونل NATM از مدل رفتاری مشابه مدل‌های مور-کولمب و خزش خاک نرم استفاده شده است. در حقیقت مدل توده‌ی سنگ درزه‌دار (JRM)،^[۲۳] نیز مشابه مدل‌های رفتاری MC و SSC است، چرا که پوش گسیختگی همه‌ی مدل‌های مذکور، پوش گسیختگی مدل مور-کولمب است.^[۲۳] به منظور صحت‌سنجی نرم‌افزار و روش عددی محاسبه، تغییر شکل‌های قائم و کلی تاج و کف تونل در مدل‌سازی‌های مرجع،^[۱] مطابق مطالعات مرجع^[۱] و نیز بخش کنونی، موضوع اصلی پژوهش بررسی و نتایج آن به طور خلاصه در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج مدل صحت سنجی در مرجع^[۱] و مطالعه حاضر.

پارامتر	مقاله مرجع ^[۱]	مدل های عددی این مطالعه	نوع مدل عددی در این مطالعه
تغییر مکان قائم	۱۳۸ تا ۱۵۰ میلی متر (اندازه گیری)	۱۴۰ میلی متر	مدل دو بعدی ساخته شده در PLaXIS ۲D
تغییر مکان کلی مثبت	بازه ۱۰ تا ۱۵ میلی متر	بازه ۱۰ تا ۱۴۰ میلی متر	مدل دو بعدی ساخته شده در PLaXIS ۲D
تغییر شکل کلی	۲۸ میلی متر تورم در کف تونل	۲۶ میلی متر در کف تونل	مدل عددی سه بعدی ساخته شده در PLaXIS ۳D TUNNEL

Total displacements (Utot)
Extreme Utot $2.5/4.5 \times 10^{-3}$ m
الف) کلی؛

Total displacements (Utot)
Extreme Utot $1.25/2.6 \times 10^{-3}$ m
الف) کلی؛

ب) کلی (نتیجه ی مقاله ی مرجع [۱]).

Vertical displacements (Uy)
Extreme Uy $-1.25/0.7 \times 10^{-3}$ m
ب) قائم برای تونل T ۳۵.

شکل ۴. صحت سنجی تغییر مکان برای T۳۵ تونل به کمک روش عددی اجزاء محدود سه بعدی.

شکل ۳. نتایج صحت سنجی تغییر مکان به کمک روش اجزاء محدود دو بعدی.^[۸۵]

۴. بحث پیرامون نتایج خروجی

در بین پارامترهای سازه‌ی لنگر خمشی با قدرمطلق ۳۰/۱۲٪ بیشترین تأثیر و نیروی محوری در پیچ سنگ‌ها با قدرمطلق ۲/۱۵٪ کمترین میزان تأثیر را پذیرفته است.

همچنین در بین پارامترهای ژئوتکنیکی نیز مطابق جدول ۵، تغییر مکان قائم با علامت منفی (به معنای نشست مصالح) و تغییر مکان کلی به میزان قدرمطلق ۶۲/۶۱٪، بیشترین تأثیر و تنش برشی به مقدار قدرمطلق معادل ۲/۸۷٪، کمترین تأثیر را از لحاظ عامل زمان و خزش مصالح به خود پذیرفته است. همه‌ی این نتایج بدان معنی هستند که با تغییر مدل رفتاری مصالح، پارامترهای ثانویه (یعنی پارامترهای سازه‌ی) به میزان کمتری نسبت به پارامترهای اصلی و اولیه (پارامترهای ژئوتکنیکی) تحت تأثیر قرار خواهند گرفت. به طور کلی عموم تغییر شکل‌های مدل SSC بیشتر

در بخش کنونی، نتایج پژوهش حاضر در خصوص اندرکنش سیستم نگهداری - مصالح پیرامون تونل در دو زمینه‌ی پارامترهای سازه‌ی و ژئوتکنیکی بررسی شده است. مطابق جدول‌های ۴ و ۵، با تغییر بازه‌ی زمانی (از ۱ روز به ۱۰ روز)، به ترتیب قدرمطلق متوسط تغییرات پارامترهای سازه‌ی (پارامترهای ثانویه) (سیستم نگهداری تونل ۱۷/۲۵٪ و قدرمطلق متوسط تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی (پارامترهای اولیه) مصالح سنگی و خاکی پیرامون تونل ۳۹/۷۵٪ است. این بدان مفهوم است که با لحاظ عامل زمان واقعی در مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری تونل در سنگ ضعیف، پارامترهای ژئوتکنیکی حدود ۲ برابر (دقیقاً ۲/۳۰ برابر) بیشتر از پارامترهای سازه‌ی متأثر از زمان خواهند بود. از طرفی مطابق جدول ۴

شکل ۶. نمودار توزیع نیروی برشی در شاتکریت سیستم نگهداری.

شکل ۷. نمودار توزیع نیروی محوری در شاتکریت سیستم نگهداری.

۳.۴. نیروی محوری در سیستم نگهداری تونل

مطابق جدول ۴، نیروی محوری در شاتکریت تونل در هر دو مدل MC و SSC با علامت منفی به دست آمده است که نشان دهنده کششی بودن آن است (شکل ۷). در مدل MC نیروی محوری در شاتکریت همانند نیروی برشی و لنگر خمشی، کمتر از مدل SSC به دست آمده و باز هم مقادیر آن مستقل از زمان است (جدول ۴). مجدداً در اولین فاز حفاری در مدل MC مقادیر نیروی محوری در شاتکریت همانند مقادیر لنگر خمشی و نیروی برشی این المان بسیار کوچک تر از مدل SSC به دست آمده است. دلیل عمده این مسئله آن است که به دلیل عدم لحاظ عامل زمان و خزش مصالح در مدل MC، مقادیر نیروی محوری کمتری در المان‌های سیستم نگهداری بسیج شده است.

شکل ۵. نمودار توزیع لنگر خمشی در شاتکریت سیستم نگهداری.

از مدل MC است، از طرفی همین تغییر شکل‌های بیشتر هستند که باعث بسیج شدن تلاش‌های داخلی سازه‌ی بیشتر از قبیل نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی در سیستم نگهداری تونل می‌شوند.

۱.۴. لنگر خمشی در سیستم نگهداری تونل

لنگر خمشی در لایه‌ی شاتکریت سیستم نگهداری تونل در ضمن استفاده از مدل رفتاری مور - کولمب مستقل از زمان است، به طوری که تغییر بازه‌ی زمانی، تغییری در مقادیر لنگر خمشی ایجاد نخواهد کرد. اما در مدل خزش خاک نرم با افزایش بازه‌ی زمانی لنگر خمشی در حین حفاری مقطع تاج افزایش و در زمان حفاری مقاطع پنج و اینورت تونل کاهش می‌یابد (شکل ۵). به بیان دیگر، تلاش داخلی لنگر خمشی، ناشی از میزان دوران و تغییر شکل مصالح خاکی بسیج شده در پیرامون تونل است. لنگر خمشی در مدل MC در هر دو بازه‌ی زمانی ۱ و ۱۰ روزه، کوچک‌تر از مدل SSC به دست آمده است (جدول ۴).

۲.۴. نیروی برشی در سیستم نگهداری تونل

نیروی برشی در شاتکریت سیستم نگهداری تونل با لحاظ مدل رفتاری SSC که خزش و عامل زمان را با هم در نظر می‌گیرد، نسبت به مدل مور - کولمب (MC) افزایش یافته است (شکل ۶). مطابق جدول ۴، قدرمطلق متوسط تغییرات نیروی برشی برابر 9.9% است و مدل MC در اولین فاز حفاری و مرحله‌ی حفاری تاج تونل، یعنی فاز ۳ محاسبات عددی، مقداری بسیار کوچک و غیرمنطقی (یعنی 11.86 kN/m) در برآورد تنش برشی از خود نشان می‌دهد. این مسئله در مورد لنگر خمشی و نیروی محوری در شاتکریت نیز تکرار شده است. یکی از ضعف‌های مدل مور - کولمب همین مسئله است، به طوری که در اولین فاز هر مسئله‌ی حفاری‌ی نمی‌تواند به خوبی نیروهای حاصل از فرایند حفاری که عموماً تنش‌های القایی ناشی از باربرداری هستند، را به خوبی برآورد کند.

جدول ۴. بررسی کمی اثرات لحاظ عامل زمان و خزش در پارامترهای سازه‌ی سیستم نگهداری تونل.

پارامتر، یکای پارامتر و فاز محاسبه	مدل‌های رفتاری و بازه زمانی (روز)			درصد اختلاف در مدل SSC*
	SSC و ۱	SSC و ۱۰	MC و ۱ و ۱۰	
تلاش‌های داخلی سازه‌ی ایجاد شده در سیستم نگهداری تونل				
لنگر خمشی در شاتکریت $3, M(kN.m/m)$	-۲۰۷/۶۹	-۳۰۹/۲۲	-۲/۷۵	+۴۸/۸۸
لنگر خمشی در شاتکریت $5, M(kN.m/m)$	۱۳۳۰	۱۱۸۰	۳۳۷/۹۵	-۱۱/۲۸
لنگر خمشی در شاتکریت $7, M(kN.m/m)$	۵۱۲/۵۶	۳۵۷/۷۵	۲۵۳/۲۴	-۳۰/۲۰
قدر مطلق میانگین درصد‌های افزایش و کاهش لنگر خمشی در شاتکریت به درصد				
نیروی برشی در شاتکریت $3, V(kN.m/m)$	-۳۱۴/۱۵	-۳۴۰/۱۰	-۱۱/۸۶	+۸/۲۶
نیروی برشی در شاتکریت $5, V(kN.m/m)$	-۸۹۵/۶۵	-۸۳۸/۹۶	+۳۸۲/۶۰	-۶/۳۳
نیروی برشی در شاتکریت $7, V(kN.m/m)$	-۵۰۵/۴۰	-۴۲۹/۰۲	+۳۱۵/۵۵	-۱۵/۱۱
قدر مطلق میانگین درصد‌های افزایش و کاهش نیروی برشی در شاتکریت به درصد				
نیروی محوری در شاتکریت $3, N(kN.m/m)$	-۸۶۲/۷۶	-۱۲۶۰	-۴۳/۴۹	+۴۶/۰۴
نیروی محوری در شاتکریت $5, N(kN.m/m)$	-۱۸۹۰	-۲۱۳۰	-۱۶۷۰	+۱۲/۷۰
نیروی محوری در شاتکریت $7, N(kN.m/m)$	-۲۲۱۰	-۲۶۹۰	-۸۷۷/۹۲	+۲۱/۷۲
قدرمطلق میانگین درصد‌های افزایش و کاهش نیروی محوری کششی در شاتکریت به درصد				
نیروی محوری در بولت‌ها $3, NB(kN.m/m)$	-۱۴۱/۷۵	-۱۴۸/۱۹	-۰/۸۶	+۴/۵۴
نیروی محوری در بولت‌ها $5, NB(kN.m/m)$	-۵۶۲/۳۰	-۵۶۷/۵۱	-۴۶/۳۹	+۰/۹۳
نیروی محوری در بولت‌ها $7, NB(kN.m/m)$	-۶۵۹/۸۵	-۶۵۳/۲۷	-۷۱/۳۶	-۰/۹۹
میانگین درصد‌های افزایش و کاهش نیروی محوری کششی در راک بولت‌ها (پیچ سنگ‌ها)				
متوسط درصد‌های افزایش و یا کاهش همگی پارامترهای سازه‌ی سیستم نگهداری تونل				

* علامت مثبت پشت اعداد، نشان‌دهنده‌ی درصد افزایش پارامتر و علامت منفی، نشان‌دهنده‌ی درصد کاهش پارامترهاست.

جدول ۵. بررسی کمی اثرات لحاظ عامل زمان و خزش در پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح پیرامون سیستم نگهداری تونل.

پارامتر، یکای پارامتر و فاز محاسبه	مدل‌های رفتاری و بازه زمانی (روز)			درصد اختلاف
	SSC و ۱	SSC و ۱۰	MC و ۱ و ۱۰	
پارامترهای ژئوتکنیکی تاثیرگذار در رفتار اندرکنشی سیستم نگهداری - تونل در مصالح پیرامون تونل				
کرنش برشی $(\%) \gamma_{xy}$ فاز ۳	۷/۲۳	۱۲/۱۶	۰/۰۲۴	+۶۸/۱۹
کرنش برشی $(\%) \gamma_{xy}$ فاز ۵	۶/۸۳	۸/۱۹	۰/۰۸۹	+۱۹/۹۱
کرنش برشی $(\%) \gamma_{xy}$ فاز ۷	۰/۵۰۷	۰/۵۴۹	-۰/۰۰۲	+۸/۲۸
قدر مطلق میانگین درصد‌های افزایش و کاهش کرنش برشی در مصالح پیرامون تونل به درصد				۳۲/۱۳
تنش برشی $\tau_{xy}(kPa)$ فاز ۳	۷۲۲/۷۴	۷۱۹/۲۳	۱۱۰۰	-۰/۴۹
تنش برشی $\tau_{xy}(kPa)$ فاز ۵	۷۶۵/۰۳	۷۳۶/۲۲	-۸۷۶/۱۴	-۳/۷۶
تنش برشی $\tau_{xy}(kPa)$ فاز ۷	۷۴۵/۸۲	۷۱۳/۳۹	۱۰۳۰	-۴/۳۵
قدر مطلق میانگین درصد‌های افزایش و کاهش تنش برشی در مصالح پیرامون تونل به درصد				۲/۸۷
تغییر مکان افقی $U_X(mm)$ فاز ۳	-۱۸/۵۳	-۳۰/۳۶	-۰/۰۳۱۰	+۶۳/۸۴
تغییر مکان افقی $U_X(mm)$ فاز ۵	-۱۸/۲۸	-۲۳/۶۸	-۰/۰۷۲	+۲۹/۵۴
تغییر مکان افقی $U_X(mm)$ فاز ۷	-۹/۰۲	-۱۱/۰۲	+۰/۰۵۷	+۲۲/۱۷
قدرمطلق میانگین درصد‌های افزایش و کاهش تغییر مکان افقی در مصالح پیرامون تونل به درصد				۶۲/۶۱
تغییر مکان قائم $U_Y(mm)$ فاز ۳	-۲۸۱/۱۸	-۵۳۹/۲۷	-۰/۱۵۲	+۹۱/۷۹
تغییر مکان قائم $U_Y(mm)$ فاز ۵	-۲۰۴/۲۰	-۳۱۷/۲۲	-۰/۴۷۱	+۵۵/۳۵
تغییر مکان قائم $U_Y(mm)$ فاز ۷	-۱۵۳/۶۶	-۲۱۶/۱۷	-۰/۱۰۵	+۴۰/۶۸
قدرمطلق میانگین درصد‌های افزایش و کاهش تغییر مکان قائم در مصالح پیرامون تونل به درصد				۶۲/۶۱
تغییر مکان کلی $U_T(mm)$ فاز ۳	+۲۸۱/۱۸	+۵۳۹/۲۷	+۰/۱۵۳	+۹۱/۷۹
تغییر مکان کلی $U_T(mm)$ فاز ۵	+۲۰۴/۲۰	+۳۱۷/۲۲	+۰/۴۷۶	+۵۵/۳۵
تغییر مکان کلی $U_T(mm)$ فاز ۷	+۱۵۳/۶۶	+۲۱۶/۱۷	+۰/۱۰۵	+۴۰/۶۸
قدرمطلق میانگین درصد‌های افزایش و کاهش تغییر مکان کلی در مصالح پیرامون تونل به درصد				۶۲/۶۱
متوسط درصد‌های افزایش و یا کاهش همگی پارامترهای ژئوتکنیکی مصالح پیرامون تونل				۳۹/۷۵

* علامت مثبت پشت اعداد، نشان‌دهنده‌ی درصد افزایش پارامتر و علامت منفی، نشان‌دهنده‌ی درصد کاهش پارامترهاست.

۴.۴. نیروی محوری در پیچ سنگ‌ها (راک بولت‌ها)

مطابق جدول ۴، نیروی محوری در پیچ سنگ‌های تونل در هر دو مدل MC و SSC با علامت منفی به دست آمده است که نشان‌دهنده کششی بودن آن است. مطابق شکل ۸ و جدول ۴ در مدل MC، نیروی محوری در پیچ سنگ‌ها کمتر از مدل SSC به دست آمده و باز هم مقادیر آن مستقل از زمان است. مجدداً در اولین فاز حفاری در مدل MC، مقادیر نیروی محوری در پیچ سنگ بسیار کوچک‌تر از مدل SSC به دست آمده است. دلیل عمده این مسئله آن است که به دلیل عدم لحاظ عامل زمان و خزش مصالح در مدل MC، مقادیر نیروی محوری کمتری در المان‌های سیستم نگهداری از جمله پیچ سنگ‌ها بسیج می‌شود.

۵.۴. کرنش‌های برشی در توده‌ی مصالح پیرامون تونل

کرنش‌های برشی γ_{xy} حاصل از مدل رفتاری مور - کولمب به مراتب کوچک‌تر از مدل رفتاری خزش خاک نرم هستند. از طرف دیگر، افزایش بازه‌ی زمانی تغییری در نتایج مدل رفتاری مور - کولمب ایجاد نخواهد کرد (شکل ۹). کرنش‌های برشی در مدل خزش خاک نرم با افزایش بازه‌ی زمانی افزایش می‌یابند. مطابق جدول ۵، میانگین افزایش کرنش‌های برشی در مدل خزش خاک نرم ۳۲/۱۳٪ است که کمترین افزایش ۸/۲۸٪ و بیشترین میزان افزایش ۶۸/۱۹٪ به ترتیب مربوط به مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری بخش‌های اینورت و تاج تونل است. آنچه که در خصوص کرنش‌های برشی ایجاد شده در مقایسه‌ی دو مدل رفتاری MC و SSC حائز اهمیت است، اختلاف ۱۰۰۰ برابری مقادیر کرنش‌های برشی در دو مدل مذکور است، به طوری که ضرایب کرنش‌های برشی بر حسب درصد در مدل MC برابر ۱۰^{-۶} و در مدل SSC برابر ۱۰^{-۳} است. همین اختلاف زیاد در کرنش‌های دو مدل ذکر شده، باعث اختلافی به همین میزان، در مقادیر تغییر مکان‌های کلی، قائم و افقی (جانبی) در دو مدل رفتاری شده است.

۶.۴. تنش‌های برشی در مصالح خاکی - سنگی

تنش‌های برشی در صفحه‌ی مدل‌سازی (τ_{xy}) ، حاصل از مدل رفتاری مور - کولمب بیشتر از مدل خزش خاک نرم SSC به دست آمده است. در مدل رفتاری مور - کولمب، تنش برشی به میزان بازه‌ی زمانی حساس نیست، اما در مدل خزش خاک نرم با افزایش بازه‌ی زمانی، تنش‌های برشی در روند حفاری کلیه‌ی بخش‌های مقطع عرضی تونل (اعم از تاج، بنج و اینورت) کاهش یافته است (شکل ۱۰). کاهش تنش‌های برشی در مدل SSC با زمان، ناشی از لحاظ عامل خزش در این مدل رفتاری است، چرا که خزش باعث کاهش قیود گیرداری مصالح می‌شود و از این طریق تنش‌های برشی موجود در مصالح ژئومتریال کاهش می‌یابد. در حقیقت هر چه امکان تغییر شکل مصالح بیشتر باشد و مصالح به راحتی بتوانند تغییر شکل بدهند، تنش‌های ناشی از گیرداری و مقید بودن مصالح از جمله تنش‌های برشی کاهش خواهند یافت. متوسط کاهش تنش برشی مطابق جدول ۵ با افزایش بازه‌ی زمانی ۲/۸۷٪ و کمینه و بیشینه‌ی میزان کاهش به ترتیب ۰/۴۹٪ و ۴/۳۵٪ مربوط به بخش‌های تاج و اینورت تونل است.

۷.۴. تغییر مکان کلی در توده‌ی سنگی ضعیف

تغییر شکل‌های کلی حاصل از مدل خزش خاک نرم به طور کلی بیشتر از تغییر شکل‌های حاصل از مدل مور - کولمب در کلیه‌ی مراحل حفاری تونل است (جدول ۵).

شکل ۸. نمودار توزیع نیروی محوری در پیچ سنگ‌های سیستم نگهداری.

شکل ۹. نمودار توزیع کرنش برشی در مصالح پیرامون تونل در حالات.

در مورد تغییر مکان‌های کلی نیز مدل مور - کولمب مستقل از زمان عمل می‌کند و لحاظ بازه‌های زمانی مختلف، حین انجام تحلیل‌های تنش - کرنش خمیری بی‌تأثیر است. در مدل خزش خاک نرم SSC با لحاظ بازه‌های زمانی بزرگ‌تر، تغییر مکان‌های کلی در تمامی مراحل حفاری تونل افزایش می‌یابد. میانگین این افزایش

الف) بیشینه نیروی محوری؛

ب) بیشینه نیروی محوری در بولت های عبور کرده از شاتکریت؛

ج) بیشینه لنگر خمشی؛

د) بیشینه نیروی برشی.

شکل ۱۱. مقایسه اثر عامل زمان و خزش در واحد طول تونل در تلاش های داخلی شاتکریت.

الف) مدل MC و زمان یک روزه؛
ب) مدل SSC و بازه زمانی یک روزه؛

ج) مدل MC و بازه زمانی ده روزه؛
د) مدل SSC و بازه زمانی ده روزه.

شکل ۱۰. نمودار توزیع تنش برشی در مصالح پیرامون تونل در حالات.

۶۲/۶۱٪ و بیشینه و کمینه مقادیر افزایش برابر ۹۱/۷۹٪ و ۴۰/۶۸٪ به ترتیب مربوط به حفاری بخش های تاج و اینورت مقطع عرضی تونل NATM است.

۸.۴. تغییر مکان افقی در توده های مصالح

تغییر مکان افقی مصالح در مدل مور - کولمب در تمامی مراحل حفاری مقطع عرضی تونل «کمتر از نتایج حاصل از مدل خزش خاک نرم» است که به این دلیل است که در مدل خزش خاک نرم، عامل تغییر شکل خزشی به شکل یک بعدی و به صورت قائم در مدل عددی کرنش مسطح تونل NATM اعمال می شود. در حقیقت به دلیل وقوع بخش اعظم تغییر مکان ها در راستای قائم به شکل تغییر مکان های خمیری و تغییر مکان های خزشی در مدل رفتاری SSC، مقادیر تغییر مکان افقی مدل خزش خاک نرم بیشتر از مدل مور - کولمب به دست آمده است (جدول ۵). از طرفی باربرداری مصالح به شکل حفاری دیواره های تونل، باعث بروز اتساع (بروز برش اتساعی) در مصالح تونل می شود که در مدل مور - کولمب چنین اتساعی در حالت کلی قابل لحاظ و پیش بینی نیست، چرا که برای لحاظ اتساع مصالح در برش در مدل MC، فقط پارامتر زاویه ی اتساع مصالح به کار می رود که مقدار آن نیز با روابط تجربی - تقریبی محاسبه می شود. در حقیقت مدل مور - کولمب قادر به در نظر گرفتن رفتار نرم شوندگی مصالح ناشی از حفاری نیست، به همین دلیل مقادیر تغییر شکل افقی آن کوچک تر از مدل خزش خاک نرم به دست آمده است. در حقیقت توده ی خاک بالای سر تونل در مدل MC انعطافی از خود نشان نمی دهد و همانند یک جسم صلب عمل می کند؛ اما مدل SSC چون رفتار خاک نرم و نرم شوندگی مصالح سنگی را لحاظ می کند، تغییر شکل توده ی خاکی

ب) تنش برشی در خاک.

الف) کرنش برشی در خاک؛

شکل ۱۲. مقایسه‌ی اثر عامل زمان و خزش در تنش - کرنش.

الف) تغییر مکان؛

ب) تغییر مکان افقی؛

ج) تغییر مکان قائم.

شکل ۱۳. مقایسه‌ی اثر عامل زمان و خزش در تغییر مکان توده‌ی خاک.

بالای سر تونل را به نحو بهتری در نظر می‌گیرد و توده‌ی خاک در مدل SSC، انعطاف کافی در حین بروز تغییر شکل را دارد.

به هر حال تغییر مکان افقی در مدل مور - کولمب مستقل از بازه‌های زمانی است و همواره مقداری ثابت دارد، چرا که مدل MC مدلی مستقل از زمان است و عامل زمان و خزش مصالح خاکی - سنگی در آن لحاظ نشده است. در مقابل در مدل SSC با افزایش بازه‌ی زمانی حفاری بخش‌های مختلف تونل و نیز نصب سیستم نگهداری هر بخش، تغییر شکل افقی افزایش می‌یابد، و میانگین افزایش تغییر شکل افقی ۳۸٫۵۲٪ است که بیشترین میزان افزایش آن (۶۳٫۸۴٪) مربوط به مرحله‌ی حفاری و نصب سیستم نگهداری بخش تاج و کمترین مقدار آن (۲۲٫۱۷٪) مربوط به مرحله‌ی حفاری و نصب سیستم نگهداری اینورت تونل است.

۹.۴. تغییر مکان قائم در توده‌ی مصالح سنگی - خاکی

تغییر مکان قائم توده‌ی مصالح در مدل MC همانند تغییر مکان‌های افقی و قائم، مستقل از بازه‌های زمانی است. از طرف دیگر در مدل SSC با افزایش بازه‌ی زمانی در تمام موارد، تغییر مکان قائم (یعنی نشست) بیشتری به‌دست آمده است. درصد افزایش تغییر مکان‌های قائم با افزایش زمان حفاری و نصب بخش‌های مختلف مقطع عرضی تونل، در جدول ۵ ارائه شده است. میانگین، بیشینه و کمینه‌ی مقادیر تغییرات تغییر مکان قائم مشابه تغییر مکان کلی مقطع عرضی تونل است، جز آنکه علامت تغییر مکان قائم برخلاف تغییر مکان کلی همواره منفی (یعنی از نوع نشست) است که قبلاً به آن اشاره شده است.

۱۰.۴. مقایسه‌ی نموداری نتایج دو مدل رفتاری MC و SSC با

لحاظ دو بازه‌ی زمانی مختلف

در بخش حاضر، نتایج مقایسه‌ی دو مدل رفتاری MC و SSC برای مسئله‌ی واحد در قالب نمودارهای میله‌ای، شکل‌های ۱۱ الی ۱۳ ارائه شده است. میله‌های آبی‌رنگ مربوط به مدل SSC و میله‌های قرمز رنگ مربوط به مدل MC هستند. چنانچه در شکل‌های مذکور مشخص است، جز در مورد تنش برشی، برای سایر پارامترها (اعم از ژئوتکنیکی یا سازه‌ی) نتایج مدل SSC بیشتر و چشمگیرتر از نتایج مدل رفتاری MC است.

۵. نتیجه گیری

نتایج پژوهش حاضر نشان می‌دهند که دقت در انتخاب مدل رفتاری برای انجام تحلیل‌های عددی در پروژه‌های واقعی تا چه حد مهم و تأثیرگذار است. برآورد غلط یا غیرمحافظة کارانه‌ی تلاش‌های داخلی و یا پارامترهای مؤثر ژئوتکنیکی در طراحی پروژه‌های راهبردی، همانند تونل‌سازی و مترو می‌تواند منجر به خسارت‌های مالی و جانی جبران‌ناپذیری شود. به ویژه در تونل‌های شهری که در مناطقی با توزیع جمعیت و وجود سرمایه‌های مالی فراوان حفر می‌شوند، بروز خطا و اشتباه طراح در برآورد رفتار تونل و مصالح پیرامون آن می‌تواند فاجعه‌آمیز باشد. طراح باید با داشتن بصیرت و دانش کافی، آزمایش‌های مورد نیاز در خصوص مصالح را پیشنهاد دهد، سپس با کنترل نتایج حاصل از آزمایش‌ها، پارامترهای لازم جهت مدل‌سازی عددی طرح را با انتخاب مدل رفتاری مناسب محاسبه کند. پس از انتخاب و محاسبه‌ی پارامترها، طراح تونل می‌تواند اقدام به مدل‌سازی عددی کند. در تمامی مراحل ساخت تونل، نتایج مدل‌سازی‌های عددی با نتایج ابزار دقیق حاصل از رفتارسنجی در محل پروژه‌ی احداث تونل باید مطابقت داده شود. وجود اختلاف قابل توجه بین نتایج مذکور، زنگ خطری برای بازبینی طرح و روش اجرای آن است. در نوشتار حاضر از پارامترهای دو مدل رفتاری MC و SSC^[۱] که از نتایج مرجع^[۱] به دست آمده‌اند، جهت مدل‌سازی و مقایسه‌ی عددی دو مدل MC و SSC در قالب تحلیل‌هایی پارامتری استفاده شده است. همچنین از مقطع عرضی تونل موجود در مرجع^[۱] و مشخصات مدل رفتاری JRM^[۱] که در مرجع^[۱] مطرح شده است، برای صحت‌سنجی نتایج عددی مطالعات حاضر

استفاده شده است. آنچه که از مدل‌سازی عددی مهم‌تر به نظر می‌رسد، کنترل نتایج کارگاهی با مدل عددی است. نتایج عمده‌ی حاصل از مقایسه‌ی دو مدل رفتاری SSC و MC در فرایند حفاری و نصب سیستم نگهداری تونل به این شرح هستند:

۱. مدل رفتاری مور - کولمب (MC)، مدلی مستقل از زمان، بدون لحاظ پارامترهای تاریخی تنش، وضعیت تحکیم‌یافتگی، خزش، سخت‌شوندگی و نرم‌شوندگی مصالح است، به طوری که در تحلیل‌های عددی خمیری با تغییر بازه‌های زمانی محاسبات عددی، تغییری در نتایج حاصل از مدل مذکور ایجاد نمی‌شود.
۲. در نظر گرفتن خزش مصالح و عامل زمان به طور کلی باعث افزایش مقادیر پارامترهای اندرکنشی سازه‌ی (لنگر، برش و نیروی محوری) و ژئوتکنیکی (تنش - کرنش و تغییر مکان‌های مصالح) در مدل SSC نسبت به مدل MC، در حفاری تونل و نصب سیستم نگهداری آن می‌شود.
۳. مطابق نتایج پژوهش حاضر، تأثیرپذیری پارامترهای ثانویه (یعنی پارامترهای سازه‌ی) در سیستم نگهداری تونل نسبت به پارامترهای اولیه (پارامترهای ژئوتکنیکی) با تغییر بازه‌های زمانی انجام تحلیل‌های خمیری خزشی، تقریباً نصف است (البته در پژوهش حاضر). با توجه به نتایج به دست آمده با تغییر زمان واقعی در تحلیل‌های عددی، پارامترهای ژئوتکنیکی (پارامترهای اولیه) حدود ۲/۳ برابر بزرگ‌تر از پارامترهای سازه‌ی (پارامترهای ثانویه) به دست آمده‌اند، چرا که بروز پارامترهای ژئوتکنیکی باعث بسیج و ایجاد پارامترهای ثانویه (سازه‌ی) در اندرکنش سیستم نگهداری تونل - سنگ خواهند شد

پانویس‌ها

1. squeezing
2. swelling
3. jointed rock mass
4. slate and schistosity
5. foliation
6. bedding planes direction distribution
7. cleavage
8. Mohr-Coulomb
9. soft soil creep
10. modified cam clay
11. loading-unloading-reloading

منابع (References)

1. Aksoy C.O., Ogul K., Topal I., Pos E. luk, Gicir, A., Kucuk, K. and Uyar Aldas, G. "Reducing deformation effect of tunnel with non-deformable support system by

jointed rock mass model", *Journal Tunnelling and Underground Space Technology*, **40**, pp. 218-227 (2014).

2. Aksoy, C.O., Ogul, K., Topal, I., Ozer, S.C., Ozacar, V. and Posluk, E. "Numerical modeling of non-deformable support in swelling and squeezing rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, **52**, pp. 61-70 (2012).
3. Brinkgreve, R.B.J., Swolfs, W.M. and Engin, E. "PLAXIS 2D", Version 8.6, Reference Manual, Delft University of Technology and PLAXIS B.V., The Netherlands (1942-2007).
4. *Plaxis 3D: 3D Tunnel*, Version 1.2, User Manual (2000).
5. Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F., *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, CRC Press Book, 232 p. (1995).
6. Aksoy, C.O. and Onargan, T. "The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages", *Tunneling and Underground Space Technology*, **25**(5), pp. 553-559 (2010).

7. Aksoy, C.O., Kantarci, O. and Ozacar, V. "An example of estimating rock mass deformation around an underground opening using numerical modeling", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **47**(2), pp. 272-278 (2010).
8. Sial Engineering and Consultant Co., "The Report and application project of T-35 tunnel", TCDD Headquarters, Ankara-Turkey (2010).
9. Kovari, K., Amstad, C. and Anagnostou, G., *Design Construction Methods-Tunnelling in Swelling Rocks*, Zurich: Swiss Federal Institute of Technology (1988).
10. Aydan, O., Akagi, T. and Kavamoto, T. "The squeezing potential of rock around tunnels: Theory and prediction", *Rock Mech. Rock Eng.*, **29**(3), pp. 125-43 (1993).
11. Hoek, E. and Marinos, P. "Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rockmasses", *Tunnels Tunnelling Int.*, **32**(11), pp. 45-51 (2000).
12. Yassaghi, A. and Salari-Rad, H. "Squeezing rock conditions at an igneous contact zone in the Taloun tunnels, Tehran-Shomal freeway, Iran: a case study", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **42**(1), pp. 95-108 (2005).
13. Dalgic, S. "Tunneling in squeezing rock, the Bolu tunnel, Anatolian Motorway", *Turkey, Eng. Geol.*, **67**(1-2), pp. 73-96 (2002).
14. Panthi, K.K. and Nilsen, B. "Uncertainty analysis of tunnel squeezing for two tunnel cases from Nepal Himalaya", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **44**(1), pp. 67-76 (2007).
15. Lee, Y.Z. and Schubert, W. "Determination of the round length for tunnel excavation in weak rock", *Tunnelling Underground Space Technol*, **23**(3), pp. 221-231 (2008).
16. Chang, Y. "Tunnel support with shotcrete in weak rock-a rock mechanics study", PhD Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm (1994).
17. Hoek, E. "Big tunnels in bad rocks", *ASCE, J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **127**(9), pp.726-740 (2001).
18. Barla, G., Bonini, M. and Semeraro, M. "Analysis of the behaviour of a yield-control support system in squeezing rock", *Tunnelling Underground Space Technol*, **26**(1), pp. 146-154 (2011).
19. Barla, G. "Innovative tunneling construction method to cope with squeezing at Saint Martin La Porte access adit (Lyon-Torino Base tunnel)", *In: Proceedings Eurock, Dubrovnik, Croatia* (2009).
20. Aygar, E.B., Ertin, A. and Simsek, O. "Re-shaping project and C3 class support design report of T13 tunnel", SIAL Geoscience Co. (2010).
21. Onalp, A. and Yakut, S. "Geotechnical test results of T13 tunnel", Istanbul Kultur University, Geotechnical Laboratory (2010).
22. Aksoy, C.O. "The investigation of the applicability of block punch index in the rock mass classification systems for weak rocks and the application of shallow urban tunnels", TUB-ITAK Project, Number 108M151 (2009a).
23. Aksoy, C.O. "Performance prediction of impact Hammers by block Punch index for weak rock masses", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, **46**(8), pp. 1383-1388 (2009b).
24. Aksoy, C.O., Onargan, T., Gungor, T., Kucuk, K. and Kun, M. "The evaluation of excavation and support system between Goztepe and F. Altay stations of 2nd stage of Izmir metro project", DEUEF, DEU-MAG, Izmir (in Turkish) (2006a).
25. Aksoy, C.O., Onargan, T., Yenice, H., Kucuk, K. and Kose, H. "Determining the stress and the convergence at Beypazari Trona field by three dimensional elastic-plastic finite element analysis: a case study", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, **43**(2), pp. 166-178 (2006b).
26. Attawell, P.B., Yeates, J. and Selby, A.R. "Soil movement induced by tunneling and their effects on pipelines and structures", Chapman and Hall, New York (1986).