

## مطالعه ناحیه سست شدگی و قوس زدگی خاک در تونل شهری مجاور زون ناپایدار

یزدان شمس ملکی\*

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی کرمانشاه.

(دریافت: ۰۰/۰۰/۰۰، پذیرش: ۰۰/۰۰/۰۰، نشر آنلاین: ۰۰/۰۰/۰۰)

### چکیده

در این مطالعه وضعیت گسترش زون سست شدگی در بالای تونل های نعل اسبی حفر شده در خاک لایه ای مورد مطالعه قرار گرفته است. تحلیل های اجزای محدود دو و سه بعدی بکار برده شده است. اثرات بیش تحکیم یافتگی، تغییرات ضخامت و محل استقرار لایه خاک ناپایدار در قالب مفهوم زون ناپایدار بر محدوده ناحیه سست شدگی ارزیابی شده است. برای مدلسازی لایه های خاک از مدل های رفتاری مور-کولمب MC و خزش خاک نرم SSC استفاده شده است. همچنین مقایسه نتایج تحلیل های عددی خمیری و تحکیمی ارائه شده است. نتایج این مقاله نشان می دهد که ضخامت زون ناپایدار، میزان گسترش آن نسبت به موقعیت حفر تونل، وضعیت سربار ساختمانی در سطح زمین، نوع تحلیل خمیری یا تحکیمی و وضعیت بیش تحکیم یافتگی خاک به طور کلی هندسه زون سست شدگی در تاج تونل را تغییر می دهند. این تغییرات شامل اختلاف چشمگیر در ابعاد، الگو و میزان گسترش زون سست شدگی خاک است. همچنین نتایج تحلیل های اجزای محدود سه بعدی مابین ۵ تا ۳۵ درصد کمتر از نتایج تحلیل های محافظه کارانه اجزای محدود دو بعدی است.

**کلیدواژه‌ها:** تونل شهری، زون ناپایدار، خزش خاک، ناحیه سست شدگی، اجزای محدود، مدل های دو بعدی و سه بعدی.

### ۱- مقدمه (معرفی موضوع و مبانی پژوهش)

امروزه گسترش ساخت و ساز تونل های شهری در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه، به یک ضرورت اجتناب ناپذیر تبدیل شده است. تونل های مترو اغلب در محل های پر ازدحام شهری احداث می شوند. در این شرایط ساختمان های سطحی و تونل های در عمق، اندرکنشی همیشگی با هم خواهند داشت. سازه بتن مسلح سیستم نگه داری یا لاینینگ تونل، تحت اثر تلاش های داخلی از نوع نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر خمشی است. این نیروها عموماً به عنوان نیروهای داخلی طراحی سیستم نگه داری تونل شناخته می شوند. عمده نیروهای داخلی حاصل تغییر شکل ها و وزن سربارهای خاکی واقع در بالا و مجاور تونل هستند. وقوع ترک و گسیختگی در بتن سیستم لاینینگ می تواند موقعیتی خطرناک باشد. احداث تونل های در خاک های دانه ای همانند ماسه (و یا شن) یک شرایط پایداری سازه زیرزمینی منحصر بفرد است. خاک دانه ای شرایط مقاومتی و سختی کاملاً متفاوتی نسبت به خاک چسبنده دارد. از جمله مهم ترین تفاوت ها چگونگی وابستگی سختی خاک دانه ای به سطح تنش های

محصورکننده پیرامون آن است. شرایط خاص پایداری خاک دانه ای همانند ماسه، زمینه مطالعات ارزشمندی در این زمینه را فراهم کرده است.

به طور اساسی رفتار اندرکنشی تونل های شهری در خاک های چسبنده و دانه ای متفاوت است. مطالعات مختلفی در خصوص رفتار سازه تونل در خاک های دانه ای همانند خاک ماسه ای انجام شده است. برای مثال، گسیختگی های مدل تونل و لایه خاک ماسه ای شامل موارد مختلفی از قبیل جابه جایی های زمین (Sun و Liu؛ ۲۰۱۴؛ Shao و همکاران، ۲۰۲۱) و انواع گسیختگی های جبهه تونل (Wong و همکاران، ۲۰۱۲) مطالعه شده است. همچنین گسیختگی و نشست های سطح زمین (Sohaei و همکاران، ۲۰۲۰؛ Wang؛ ۲۰۲۱؛ Lu و همکاران، ۲۰۱۹؛ Pabodha و همکاران، ۲۰۲۱) و مسائل مرتبط با تونل های عمیق (Wan و همکاران، ۲۰۱۹؛ Li و همکاران، ۲۰۲۰) و مشکلات مرتبط با تونل های سطحی (کم عمق) شامل گسیختگی های جزئی در جبهه حفاری (Li و همکاران، ۲۰۱۹) نیز در تحقیقات قبلی پژوهش شده است. مسائلی همانند اندرکنش بین سازه های

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۸۳-۳۸۳۰۵۰۰۱

آدرس ایمیل: y.shamsmaleki@kut.ac.ir (ن. اول).

به هر حال مطابق، بررسی های انجام گرفته در ادبیات فنی مرتبط تا کنون موضوع برخورد و یا مجاورت عملیات حفاری تونل به زون های ناپایدار خاکی با قابلیت خزش و تغییر شکل های وابسته زمان، کمتر در زمینه قوس زدگی و تغییر شکل سطح زمین مطالعه شده است و هدف این تحقیق ارزیابی و مطالعه همزمان این موارد است. در این مطالعه، در چارچوب مدل های اجزای محدود دو و سه بعدی یک مطالعه موردی، متعاقب رخداد یک حادثه ریزش حین حفاری تونل، این اهداف دنبال شده است.

ایده اساسی انجام این مطالعه پژوهشی از رخداد یک حادثه ناپایداری در حین حفاری تونل قطار شهری شهر کرمانشاه آغاز شد. به طوری که ریزش بخشی از سقف تونل قطار شهری کرمانشاه در صبح روز پنجشنبه ۱۶/۰۴/۱۴۰۱ باعث شد، که روند حفاری پروژه برای چند روز، جهت ایمن سازی این قسمت متوقف گردد. علت این ریزش برخورد فرآیند حفاری تونل به یک زون خاکی ناپایدار<sup>۱</sup> با مشخصه های تراکمی، سختی و مقاومتی خاص بود. در این رخداد روند حفاری و نصب سیستم نگه داری تونل با یک زون ناپایدار در قطعه دوم تونل در ۸/۸۷۵ کیلومتر از ۲۹ متری زمین (در محدوده بافت قدیمی شهر حوالی مسجد جامع و مابین ایستگاه های زیرزمینی میدان آزادی M8 و سه راه شهید نواب صفوی M9) مواجه گردید.

به طور معمول در موضوع حفاری تونل، همواره نشست و ریزش وجود دارد و در طی حفاری این تونل نیز در دو سال گذشته این موارد وجود داشته است، اما به دلیل اینکه مقطع در حال ریزش تونل در بافت اصلی شهر واقع شده است، برای حفظ ایمنی شهروندان تصمیم به انسداد خیابان بالای تونل گرفته شد.

پروژه قطار شهری کرمانشاه در سال ۱۳۹۳ با تغییر سیستم، از مونوریل به قطار شهری تبدیل شد و مطابق شکل ۱ مقرر گردید ۶km از مجموع ۱۳km طول مسیر، به صورت زیرزمینی اجرا شود. قطعه اول این پروژه از میدان معلم واقع در سه راه مسکن آغاز و به طول ۸/۶km تا میدان آزادی ادامه می یابد (روزمینی) و قطعه دوم نیز به طول حدود ۴/۴km از میدان آزادی شروع و تا میدان فردوسی ادامه خواهد یافت (زیرزمینی).

سطحی و تونل ها (Giardina و همکاران، ۲۰۱۵؛ Soomro و همکاران، ۲۰۱۸) و نیز روش های حفاری و ساخت تونل ها و مخاطرات در مسیر احداث تونل شامل گسل ها (Cheng و همکاران، ۲۰۲۱؛ Mori و همکاران، ۲۰۱۸؛ Huang و همکاران، ۲۰۱۹؛ Cheng و همکاران، ۲۰۲۱؛ Cai و همکاران، ۲۰۱۹) مدنظر محققین این زمینه قرار گرفته است. پدیده قوس زدگی<sup>۱</sup> و جریان یافتگی مصالح ماسه ای از جمله مهم ترین چالش های مورد بررسی تونل زنی در خاک های دانه ای ماسه ای است (Long و Tan، ۲۰۲۰؛ Chen و همکاران، ۲۰۲۲؛ Wu و همکاران، ۲۰۱۹). قوس زدگی در حین حفاری تونل در خاک های ریزدانه چسبنده (رسی) به سهولت اتفاق می افتد (Lee و همکاران، ۲۰۰۶).

تا به حال ارزیابی تونل های شهری در خاک چندلایه ماسه ای توسط مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس کاهش یافته، توسط ابزار سانتیفیوژ ژئوتکنیکی به خوبی اجرا شده است. مدل های با ابعاد کوچک در میدان شتاب ng نتایج بسیار ارزشمندی در خصوص رفتار اندرکنشی خاک ماسه ای و تونل بدست داده اند (Zhang و همکاران، ۲۰۲۱؛ Lu و همکاران، ۲۰۱۹؛ قلی پور و همکاران، ۱۳۹۱). همچنین مدل سازی های عددی در چارچوب روش های اجزای محدود سه بعدی (Guo و همکاران، ۲۰۲۰) یکی از مهم ترین تکنیک های مطالعه و شبیه سازی تونل ها در خاک است. جهت بررسی گسیختگی تونل های در خاک مختلط چسبنده-اصطلاکی مدل های تحلیلی ارزشمندی در سالیان اخیر بر مبنای نظریه تحلیل حدی، به ویژه قضیه کران بالا توسعه داده شده است (Vo-Minh و همکاران، ۲۰۲۱)؛

در این مقالات گسیختگی خاک ماسه ای در هر دو مقطع عرضی و نیز مقطع طولی تونل در جهت جبهه حفاری (رضایی فرعی و بابایی، ۱۳۹۶) مطالعه شده است. به طور کلی در تونل سازی در خاک ماسه ای، دو پدیده مهم قوس زدگی خاک ریزدانه رسی (Cheng، ۲۰۱۸) و وقوع جریان یافتگی مصالح دانه ای (He و همکاران، ۲۰۲۳) مهم ترین نکات کلیدی هستند. مصالح دانه ای از جنس ماسه، بر خلاف خاک های چسبنده همانند رس، به راحتی به داخل تونل جاری می شوند و حفرات بزرگی در سطح زمین ایجاد می کنند. جریان یافتن مصالح ماسه ای به ویژه در جبهه حفاری تونل، ادامه کار را بسیار سخت می کند. از دیدگاه تحلیلی بسته به اینکه تونل در ماسه نزدیک به سطح (Li و همکاران، ۲۰۱۹) یا در عمق (Wan و همکاران، ۲۰۱۹؛ Li و همکاران، ۲۰۲۰) قرار گرفته باشد، شرایط تغییر شکل-جابه جایی متفاوتی ایجاد می کند.

<sup>1</sup> Arching

<sup>2</sup> Unstable zone

تونل می شوند. اگر ابعاد آسیب دیدگی و گسیختگی حادث شده در خاک به سمت بالا گسترش یابد، به سطح زمین و سازه های سطحی نیز خسارت وارد می کند. بالا بودن سطح آب زیرزمینی در خاک محل حفاری تونل نیز با کاهش مقاومت برشی، وقوع پدیده های خزش-تحکیم و ناپایداری-ریزش را تسریع می کند.

شکل ۳ نمایش شماتیک (فاقد مقیاس) همزمان هندسه تونل، زون خاکی سست (ناپایدار) به ضخامت  $H_{uz}$ ، منحنی نشست سطح زمین و سربار ساختمانی سطحی را ارائه می کند. این شکل، منحنی نشست سطح زمین، در اثر سربار و حفاری تونل را نشان می دهد. متداول ترین روش تجربی که توسط پک<sup>۳</sup> (۱۹۶۹) برای محاسبه نشست سطح زمین ناشی از تونل زنی پیشنهاد شده است، حتی پس از چندین دهه به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. این فرمول تنها به چند پارامتر که به آسانی قابل تعیین هستند، نیاز دارد. در این فرمول نشست  $(s)$  سطح زمین در فاصله افقی  $(x)$  از خط مرکزی تونل، به صورت رابطه زیر محاسبه می شود:

$$S_v = s_{vmax} \cdot \exp\left(\frac{-x^2}{2i^2}\right) \quad (1)$$

که در آن  $s_{vmax}$  بیشینه نشست (جابه جایی قائم) در یک عمق معین است،  $x$  فاصله افقی از خط مرکزی تونل، و  $i$  فاصله افقی از نقاط عطف (منحنی قعر<sup>۴</sup> نشست) تا خط مرکزی تونل است. یک روش پرکاربرد برای تعیین  $i$  توسط O'Reilly و New (۱۹۸۲) پیشنهاد شده است:

$$i = kh_0 \quad (2)$$

که در آن  $k$  پارامتر عرض فرورفتگی (پهنای منحنی قعر نشست) است که یک ثابت تجربی است که به ترتیب از  $0/4$  تا  $0/7$  برای خاک های چسبنده و  $0/2$  تا  $0/3$  برای خاک های دانه ای متغیر است و  $h_0$  عمق مدفون محور تونل است.



شکل ۳- نمایش همزمان هندسه تونل، زون خاکی سست (ناپایدار)، منحنی نشست سطح زمین و سربار ساختمانی.



شکل ۱- ایستگاه های ۱۳گانه و قطعات زیرزمینی و روزمینی قطارشهری کرمانشاه در مناطق ۸گانه شهر.

شکل ۲ تصاویر مرتبط با ریزش بخشی از تاج و دیواره های تونل قطارشهری کرمانشاه در حین حفاری در حد فاصل ایستگاه M8 (مسجد جامع) و M9 (محدوده بازار) را نمایش می دهد. در این حادثه، ریزش و جریان یافتن توده خاک ناپایدار فوقانی منجر به گسیختگی و آسیب دیدگی کلی سیستم نگه داری بتن مسلح تونل که متشکل از مش بندی فولادی و بتن پاشیدنی بود، گردید. این آسیب به گونه ای بود که نگه داری بخش سقف و دیواره ها به صورت معلق در جلوی بخش ریزش یافته جبهه حفاری تونل قابل مشاهده است (شکل ۲).



شکل ۲- ریزش بخشی از تاج و دیواره های تونل قطارشهری کرمانشاه در حین انجام حفاری آن.

در حین حفاری تونل، برخورد به زون ها و رگه هایی از خاک با اختلاط ناهمگون خاک های ریزدانه چسبنده رسی با قابلیت بروز تحکیم و خزش (رفتارهای تغییرشکلی وابسته به زمان) به همراه لای و نیز خاک های دانه ای همانند ماسه و شن با استعداد بروز ریزش ناگهانی (رفتار مستقل از زمان)، موجب شکل گیری زون های ناپایداری می شود. این زون ها در بخش های سقف تونل، سبب ریزش و آسیب به سیستم نگه داری و لاینینگ بتن مسلح

<sup>3</sup> Peck

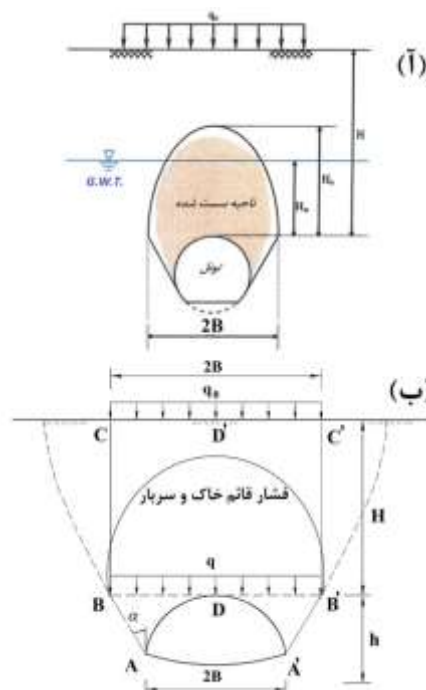
<sup>4</sup> Trough curve

برای تعریف خاک در زون ناپایدار از مدل خزش خاک نرم SSC استفاده شده است. رفتار خاک در زون ناپایدار (سست) و گسیختگی آن، عموماً به صورت وابسته به زمان است. بر خلاف این موضوع، وقوع گسیختگی و شکست توده های خاکی بسیار متراکم و سخت و یا سنگ های سخت، به یکباره و ناگهانی (مثلاً به شکل انفجار سنگ یا تقریباً مستقل از زمان) اتفاق می افتد. از این رو جهت مدلسازی کرنش ها و جابه جایی های تابع (وابسته به) زمان خاک با قابلیت وقوع خزش، از مدل رفتاری استفاده شده است که هم در محاسبات و هم در فرمول بندی ریاضی آن، اثر عامل زمان واقعی  $t$  گنجانده شده باشد. از این رو مدل رفتاری SSC شامل خزش، که آهنگ (نرخ) تغییر کرنش ها با زمان را به صورت حقیقی لحاظ می کند، مورد استفاده قرار گرفته است.

اما در توده های خاکی مقاوم و پایدار مجاور لایه (زون) ناپایدار، از مدل رفتاری مستقل از زمان استفاده شده است، چرا که تغییر شکل یا گسیختگی تاثیرگذاری که مدل مساله را تحت اثر خود قرار دهد در مصالح آن رخ نمی دهد. بر این اساس مدل رفتار ارتجاعی-خمیری کامل مور-کولمب MC انتخاب شده است. در فرمول بندی ریاضی این مدل، عامل زمان به شکل صریح یا ضمنی و نیز به شکل آهنگ (نرخ) کرنش تعریف نشده است. برای مدل سازی مراحل مختلف حفاری و تعریف تونل، سازوکار لاینینگ آن و فعال سازی لایه های خاک و سربار در برنامه های اجزای محدود دو و سه بعدی این تحقیق، تعداد ۱۰ فاز مختلف و پیاپی تعریف شده است. همچنین برای تعریف لاینینگ بتن مسلح تونل از مدل ارتجاعی-خطی با مشخصات بتن سازه ای (مدول ارتجاعی  $E_c=25\text{GPa}$ ) استفاده شده است.

ضخامت لاینینگ تونل (پارامتر  $d$  در برنامه های اجزای محدود) مطابق محاسبات شرکت مهندسی مشاور پروژه، تنها در بخش کف افقی تونل معادل  $0/60$  متر و در دیواره از شروع در کف تا محل تاج تونل، برابر  $0/43$  متر منظور شده است. بر این مبنا، مقادیر سختی (صلبیت) خمشی  $EI$  و سختی محوری  $EA$  لاینینگ، بر اساس این دو مقدار محاسبه شده است. مطابق جدول ۱ به کمک انجام آزمایش های برش مستقیم بزرگ (قالب  $30 \times 30 \times 15\text{cm}$ ) برای لایه خاک پایدار شامل شن رس دار GC و برش مستقیم کوچک (ابعاد قالب مستطیلی  $6 \times 6 \times 2$  سانتی متری) مشخصه های مقاومتی خاک بدست آمده است (به ترتیب مطابق استانداردهای ASTM D3080-03 و BS 1377 part 7). همچنین از آنجا که در تمامی مدل های عددی سطح آب زیرزمینی درست در سطح زمین تعریف شده است، از آزمایش های سه محوری CU برای اندازه گیری پارامترهای مقاومتی و سختی زهکشی نشده خاک در زون ناپایدار استفاده شده است. بارگذاری نمونه سه

همچنین مطابق شکل ۴ در یک تونل، تحت اثرات سربار و عمق آب زیرزمینی، ناحیه ای با جابه جایی های قائم به عنوان ناحیه سست شده<sup>۵</sup> در بالای تونل تشکیل می شود. محاسبات این ناحیه که مرتبط با موضوع قوس زدگی خاک (Lee و همکاران، ۲۰۰۶) است، نخستین بار توسط ترزاقی به شکل روابطی برای محاسبه فشار قائم خاک، با لحاظ فرضیاتی مدون شد (Terzaghi, ۱۹۴۳). دو فرض از نظریه ترزاقی برای تونل های قوسی پذیرفته شده است (شکل ۴). (۱) توده خاک زیر سقف تونل در امتداد سطوح AB و A'B' در حالت حدی می لغزد. و زاویه میل  $\alpha$  با جهت عمودی برابر مقدار  $(\alpha = 45^\circ - \phi/2)$  است. (۲) سطوح لغزشی بالای سقف تونل به صورت عمودی در نظر گرفته می شوند (BC و B'C'). اگرچه سطوح لغزشی واقعی خاک گاهی اوقات منحنی هستند. مطابق این تعریف، ناحیه سست شدگی شامل بخشی از لایه های خاک بالای تاج تونل است، که دچار جابه جایی در راستای قائم می شود. در بخش های بعدی مقاله با توجه به نتایج حاصل شده مشاهده می شود که این فرضیات در شرایط واقعی مختلف و با وجود زون ناپایداری از خاک در بالای تاج تونل، چندان صادق نخواهند بود.



شکل ۴- نمایش (آ) هندسه کلی ناحیه سست شده خاک بالای تاج تونل در (ب) نظریه فشار قائم خاک ترزاقی.

## ۲- مدلسازی های عددی

در این مطالعه برای شبیه سازی عددی خاک پیرامون تونل در ناحیه پایدار از مدل ارتجاعی-خمیری کامل مور-کولمب MC و

<sup>5</sup> Loosening zone

همچنین این مقادیر مقاومتی، در حالت زهکشی نشده ارائه شده اند.

#### جدول ۱- پارامترهای مدل رفتاری برای خاک و زون ناپایدار.

| مقادیر پارامترها            |                          | پارامترها<br>نماد (یکا) و استاندارد آزمایشگاهی مورد استفاده                    |
|-----------------------------|--------------------------|--|
| زون ناپایدار<br>(Undrained) | لایه<br>خاک<br>(Drained) |  |
| ۰/۱۰۵                       | -                        | شاخص فشردگی اصلاح شده $\lambda^*$ (-) ASTM D2435-04                            |
| ۰/۰۱۶                       | -                        | شاخص تورم اصلاح شده $\kappa^*$ (-) ASTM D2435-04                               |
| ۰/۰۰۸                       | -                        | شاخص خزش $\mu^*$ ASTM D2435-04   |
| ۱۶                          | ۱۷                       | چگالی مرطوب $\gamma_{wet}$ (kN/m <sup>3</sup> ) ASTM D7263-09                  |
| ۱۸                          | ۲۰                       | چگالی اشباع $\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> ) ASTM D7263-09                  |
| ۵۰                          | ۱۰۰                      | چسبندگی خاک C (kPa) یا Su (kPa) ASTM D4767-04 و ASTM D3080-04                  |
| ۳۰                          | ۴۰                       | زاویه اصطکاک داخلی $\phi$ (deg) یا $\phi_u$ (deg) ASTM D3080-04, ASTM D4767-04 |
| ۰                           | ۱۰                       | زاویه اتساع $\psi$ (deg)   |
| -                           | ۸۰                       | مدول ارتجاعی $E_{ref}$ (MPa) ASTM D4767-04                                     |
| -                           | ۰/۳۰                     | نسبت پواسون $\nu$ (-) ASTM D4767-04  |
| ۰/۰۰۰۱                      | ۰/۰۰۱                    | نفوذپذیری افقی $K_x$ (m/day) ASTM D2434-68 (2000) ASTM D                       |
| ۰/۰۰۰۰۱                     | ۰/۰۰۰۱                   | نفوذپذیری قائم $K_y$ (m/day) ASTM D2434-68 (2000)                              |
| ۰/۱۵                        | -                        | نسبت پواسون زهکشی نشده $\nu_u$ (-) ASTM D4767-04                               |
| ۰/۵۰                        | -                        | نسبت تخلخل اولیه $e_0$ (-) ASTM D2435-04                                       |
| ۱/۳۰۴                       | -                        | پارامتر $M$ (-) (تابع مستقیم $k_0$ و $\nu_u$ )                                 |

#### ۲-۱- صحت سنجی مدل رفتاری و برنامه نرم افزاری انتخاب شده

در مطالعه انجام شده توسط Aksoy و همکاران (۲۰۱۲) مدل رفتاری مورد استفاده در مطالعه حاضر (مدل خزش خاک نرم SSC) و پارامترهای آن در برنامه اجزای محدود PLAXIS 3D TUNNEL بکار گرفته شده است. آنها مشابه این مطالعه، برای شبیه سازی اندرکنش سیستم نگه داری تونل تغییرشکل ناپذیر<sup>۷</sup> NDSS در توده سنگی ضعیف (خردشده) با قابلیت تورم و جمع (مچاله) شونده<sup>۸</sup>، در تونل T13 در مسیر قطارهای پرسرعت آنکارا-استانبول، مدل اجزای محدود سه بعدی تونل و سیستم نگه داری آن تعریف شده است. مطابق یافته های شبیه سازی های عددی Aksoy و همکاران (۲۰۱۲) انطباق و هماهنگی مناسبی بین نتایج عددی و اندازه گیری های میدانی وجود دارد (شکل ۵).

محوری در قالب منطق کنترل کرنش و از نوع اعمال بار فشاری به کمک تنش انحرافی جک بارگذاری بوده است. در طی بارگذاری سه محوری، میزان تنش های برجای افقی و قائم وارد بر نمونه سه محوری بر اساس تنش های ژئواستاتیکی عمق ۲۹ متری (عمق رخداد گسیختگی در زون ناپایدار) تنظیم شده است. به طوری که در حین بارگذاری نمونه خاک، تنش اصلی بزرگ تر  $\sigma_1$  معادل تنش قائم در این عمق و تنش اصلی کوچک تر  $\sigma_3$  برابر تنش افقی (جانبی) در این عمق منظور شده است.

نمونه های انتخاب شده برای انجام آزمایش سه محوری، نمونه استوانه ای دست نخورده از عمق استقرار زون ناپایدار مجاور تونل (۲۹ متری) حاصل از بیرون کشیدن نمونه گیر شکاف دار (اسپلیت) و رادهای (میله های) حفاری گمانه بوده است. برای انجام هر آزمایش سه محوری، سه نمونه استوانه ای دست نخورده از خاک حاصل از حفاری به طول ۸cm و قطر ۳/۶cm (با متوسط نسبت طول به قطر ۲/۲۲ مطابق استاندارد انجام آزمایش) انتخاب شده است (ASTM D4767-04). میزان تراکم نسبی نمونه های دست نخورده اخذ شده مابین ۵۵ تا ۶۵ درصد اندازه گیری شده است. همچنین از آنجا که رفتار تغییرشکلی و گسیختگی خاک در زون ناپایدار زهکشی نشده فرض شده است، از آزمایش سه محوری CU روی این نمونه ها (مطابق استاندارد بین المللی ASTM D4767-04) استفاده شده است. مطابق نص صریح استاندارد به کاربرده شده، حداقل قطر نمونه استوانه ای بایستی ۳/۳ سانتی متر و میانگین نسبت ارتفاع (طول) به قطر نمونه مابین ۲ تا ۲/۵ باشد. همچنین بزرگ ترین اندازه سنگدانه های موجود در نمونه، باید از یک ششم قطر نمونه کوچک تر باشد. علاوه بر آن، آزمایش تحکیم روی نمونه های خاک در یک چرخه کامل بارگذاری-باربرداری-بارگذاری مجدد<sup>۶</sup> LUR برای تعیین مقادیر پارامترهای شاخص فشردگی اصلاح شده  $\lambda^*$  (از ضریب فشردگی  $C_c$ )، شاخص تورم اصلاح شده  $\kappa^*$  (از ضریب تورم  $C_s$ ) و شاخص خزش  $\mu^*$  (از ضریب تحکیم ثانویه  $C_{\alpha}$ ) انجام شده است (مطابق استاندارد ASTM D2435-04). افزون بر آن، آزمایش های نفوذپذیری با هد افتان (برای خاک ریزدانه چسبنده) و هد ثابت (برای خاک های درشت دانه، مطابق استاندارد (ASTM D2434-68(2000))، جهت تعیین ضرایب نفوذپذیری خاک ها، بکار گرفته شده است. علت عمده بالا بودن مقدار پارامترهای مقاومتی زون ناپایدار شامل چسبندگی (برابر ۵۰kPa) و زاویه اصطکاک داخلی آن (۳۰درجه) در جدول ۱ تنش های سربار زیاد روی نمونه اخذ شده از خاک در عمق ۲۹متری زمین و محل رخداد ناپایداری در تاج تونل است.

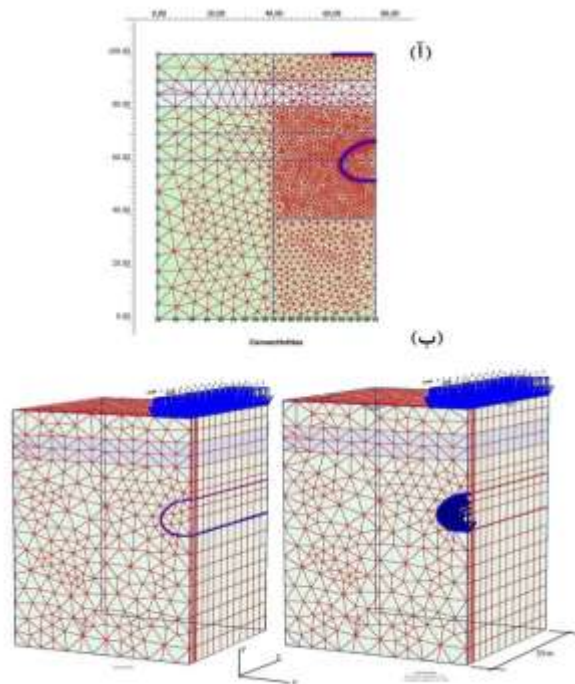
<sup>8</sup> Swelling and squeezing rock

<sup>6</sup> Loading-Unloading-Reloading

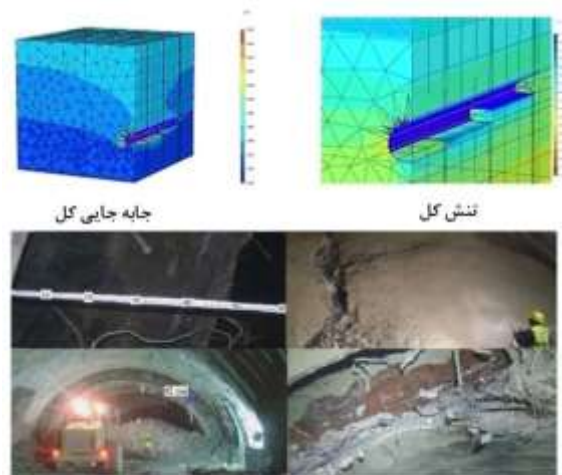
<sup>7</sup> Non-deformable support system: NDSS

مقاومت مصالح در محل فصل مشترک R یا Rinterface اعمال شده است. اگر  $R=1$  باشد، فصل مشترک خاک-سازه صلب<sup>۱۰</sup> و اندرکنشی لحاظ نمی شود و اگر  $R<1$  باشد، فصل مشترک خاک-سازه انعطاف پذیر<sup>۱۱</sup> و اندرکنش لحاظ شده است. مقدار کمیت R رابطه بین پارامترهای مقاومتی چسبندگی C و زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$  در محل فصل مشترک خاک-سازه به نسبت مقادیر موجود خاک برای این دو پارامتر مقاومتی را بر اساس معیار شکست مور-کولمب مشخص می کند. بازه تغییرات نسبت R به طور معمول بین مقادیر صفر و یک است.

در این مطالعه برای لحاظ اثرات نسبی اندرکنش-خاک سازه و انعطاف پذیری فصل مشترک تونل-خاک، مقدار  $R=0.95$  تنظیم و لحاظ شده است. یادآوری می گردد که نسبت R برای پارامترهای مقاومتی فصل مشترک خاک-تونل (همانند چسبندگی C و زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$ ) دارای توان یک (یعنی کاربرد R) و برای پارامتر سختی همانند مدول برشی فصل مشترک Ginterface دارای توان ۲ (یعنی به شکل  $R^2$ ) است. یعنی مقدار  $R=0.95$  به اندازه واقعی ۵٪ از مشخصات مقاومتی مصالح و به اندازه واقعی ۱۰٪ (یعنی  $R^2=0.95^2=0.9025$ ) از مشخصات سختی مصالح، در فصل مشترک خاک-تونل برای لحاظ انعطاف پذیری و اندرکنش خاک-تونل می گاهد.



شکل ۶- نمایش مدل های (آ) دو بعدی و (ب) سه بعدی اجزای محدود تونل-زون ناپایدار و سربار سطحی.



شکل ۵- نتایج عددی و اندازه گیری های میدانی Aksoy و همکاران (۲۰۱۲).

## ۲-۲- ایجاد مدل های عددی دو و سه بعدی

به علت وجود تقارن در هندسه و بارگذاری مدل های عددی موردنظر، تنها نیمی از هندسه مساله مدل شده است. مطابق شکل ۶ ابعاد مدل های دو بعد شامل ۱۰۰ متر عمق (محور Y) و ۷۵ متر عرض (نصف ۱۵۰ متر و محور X) است. ابعاد مدل سه بعدی نیز مشابه مدل های دو بعدی است و فقط شامل ۵۵ متر عمق در جهت عمود بر صفحه مدلسازی (محور سوم Z) می شود. ابعاد هندسی مدل های دو بعدی و سه بعدی نسبت به مختصات و حدود هندسی مقطع عرضی تونل، طوری در نظر گرفته شده که اثرات مرزی به حداقل برسند. به طوری که ابعاد بلوک مدل های اجزای محدود دو بعدی و سه بعدی در راستای محور عرضی X-۶ برابر پهناهای تونل و در راستای محور Y از کف مدل ها ۳/۵ برابر ارتفاع تونل منظور شده است.

تعداد المان ها در مدل های دو بعدی با لحاظ افزایش تراکم مش بندی در پیرامون تونل برای افزایش دقت خروجی ها برابر ۳۳۹۵ المان مثلثی ۱۵ گره ای و در مدل سه بعدی ۶۷۸۸ المان گوه ای است. سطح آب زیرزمینی برای لحاظ اثرات بحرانی فشار آب حفره ای و اشباع کامل لایه های خاک درست در سطح زمین و با محاسبات جریان حالت ماندگار تعریف شده است. علاوه بر آن شرایط مرزی قیدهای تکیه گاهی و درجات آزادی در دیواره های قائم جانبی مدل ها، از نوع غلتکی و در کف مدل ها، از نوع کاملاً گیردار شده است (شکل ۶). در این مطالعه، اندرکنش خاک-سازه شامل خاک پیرامون تونل و بدنه سیستم لاینینگ تونل، با تعریف و فعال سازی مشخصات فصل مشترک<sup>۹</sup> بین خاک و سازه (لاینینگ بتن مسلح) از طریق نسبت مقاومتی R (ضریب کاهش

<sup>11</sup>Flexible interface

<sup>9</sup> Interface

<sup>10</sup> Rigid interface

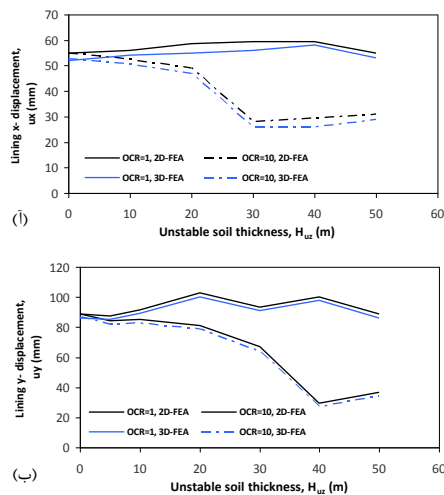
## ۳- بررسی نتایج

## ۳-۱- بررسی نموداری پاسخ های خاک و تونل

در این قسمت نتایج نموداری مطالعه حاضر ارائه می گردد. بر این اساس در شکل ۷ تغییرات ضخامت زون ناپایدار  $H_{uz}$  در سربار  $q=100kPa$  در مقابل روند پارامترهای جابه جایی افقی، نشست و کرنش برشی خاک، برای دو نسبت بیش تحکیم یافتگی  $OCR=1$  (عادی تحکیم یافته) و  $OCR=10$  (بیش تحکیم یافته) ترسیم شده است. مطابق شکل ۷(آ) نتایج تحلیل های اجزای محدود سه بعدی (3D-FEA) برای اغلب موارد کمتر از مقادیر حاصل از تحلیل های دو بعدی (2D-FEA) است. همچنین در حالت بیش تحکیم یافته، مقادیر جابه جایی های افقی (شکل ۷(آ)) و قائم (شکل ۷(ب)) کمتر از حالت عادی تحکیم یافته است.

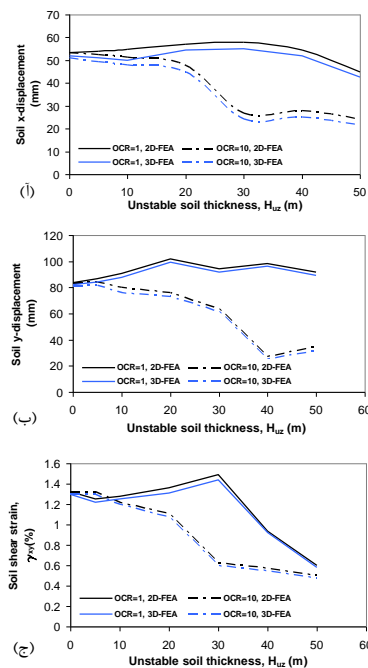
علت این موضوع آن است که در حالت بیش تحکیم یافته به دلیل افزایش ضریب فشار جانبی خاک، مقادیر تنش محصورکننده افقی-جانبی خاک افزایش یافته، که باعث کاهش تغییرشکل های افقی خاک پیرامون تونل می شود. این روند کاهش برای کرنش های برشی در شکل ۷(ج) هم قابل مشاهده است. علاوه بر آن شکستگی های نمودارهای شکل ۷ به علت نزدیک شدن زون ناپایدار به تاج (۳۰ متر)، دیواره (۴۰ متر) و کف (۵۰ متر) تونل است. همچنین روندهای کلی پاسخ های موجود در شکل ۷ نشان می دهد که خاک بیش تحکیم یافته با  $OCR=10$  نسبت به تغییرات افزایشی ضخامت لایه ناپایدار (یعنی  $H_{uz}$ ) حساس تر است.

در شکل ۸ تغییرات ضخامت زون ناپایدار  $H_{uz}$  در سربار  $q=100kPa$  در مقابل پارامترهای جابه جایی افقی و نشست لاینینگ بتنی تونل، به ازای دو مقدار OCR معادل ۱ و ۱۰ ارائه شده است. مطابق شکل ۸ بازهم نتایج تحلیل سه بعدی کوچک تر از نتایج تحلیل دو بعدی است و علت عمده آن نیز اثر تنش محصورکننده میانه افقی  $\sigma_2$  است، که در مدل های سه بعدی به صورت واقعی لحاظ می شود. در واقع، در مدل های عددی دو بعدی فقط تنش های اصلی بزرگ  $\sigma_1$  و کوچک  $\sigma_3$  قابل اعمال و تعریف هستند. مطابق نتایج شکل ۸ به طور متوسط مابین ۲ تا ۱۰ درصد اختلاف بین پاسخ های تغییرشکل خاک حاصل از مدل سازی اجزای محدود دو بعدی (2D-FEA) و سه بعدی (3D-FEA) وجود دارد.



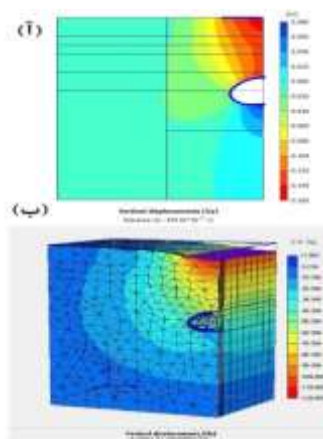
شکل ۸- تغییرات ضخامت زون ناپایدار در سربار  $q=100kPa$  در مقابل پارامترهای: (آ) جابه جایی افقی، (ب) نشست لاینینگ.

در شکل ۹ تغییرات تلاش های داخلی سیستم لاینینگ بتن مسلح تونل در مقابل تغییر ضخامت زون ناپایدار  $H_{uz}$ ، نوع تحلیل (دو یا سه بعدی) و مقادیر OCR زون ناپایدار ارائه شده است. در شکل ۹(آ) تغییرات لنگر خمشی نشان دهنده آن است که خاک بیش تحکیم یافته (با  $OCR=10$ ) حساسیت بیشتری نسبت به خاک عادی تحکیم یافته، در حین تغییرات ضخامت زون ناپایدار دارد. این حساسیت در نقاط کلیدی تاج، دیواره و مجاور کف تونل، به شکل شکستگی هایی در نمودار تغییرات لنگر خمشی لاینینگ ظاهر می شود. علت اصلی وقوع این پدیده، اختلاف در تنش های محصورکننده افقی (جانبی) خاک OC نسبت به خاک NC به دلیل بزرگ تر بودن ضریب فشار جانبی حالت سکون  $K_0$  خاک OC در فصل مشترک خاک-تونل است. همچنین افزایش بیش تحکیم یافتگی و ازدیاد ضخامت زون ناپایدار، باعث کاهش مقادیر



شکل ۷- تغییرات ضخامت زون ناپایدار در  $q=100kPa$  در برابر: (آ) جابه جایی افقی، (ب) نشست و (ج) کرنش برشی خاک.

کاهش می یابد. در واقع سختی فنرهای خطی که برای مدل کردن فصل مشترک لاینینگ-خاک به کار می روند افزایش می یابد. با افزایش ضخامت و یا سختی لاینینگ، صلبیت خمشی (و نیز سختی محوری) آن افزایش می یابد و جداره لاینینگ همانند تیری صلب عمل می کند و لنگرهای بزرگ تری را به خود جذب می کند. از سوی دیگر، هر چه قدر مقدار سختی لاینینگ، که معادل تقریبی مدول ارتجاعی آن است، افزایش یابد، میزان دامنه (محدوده) تغییرشکل های ارتجاعی (در محدوده الاستیک) قابل تحمل توسط سیستم لاینینگ بتن مسلح، افزایش می یابد. مقایسه نتایج تحلیل های اجزای محدود دو بعدی و سه بعدی نشان می دهد که نتایج دو بعدی در زمینه تغییرشکل ها محافظه کارانه هستند. این بدین معنی است که در اغلب موارد، جابه جایی های حاصل از تحلیل های سه بعدی کوچک تر از موارد مشابه دو بعدی هستند. برای مثال در شکل ۱۰ نتایج کانتورهای جابه جایی قائم یا همان نشست مدل های دو بعدی و سه بعدی با فرض ضخامت زون ناپایدار  $H_{uz}$  معادل ۱۰ متر و حالت خاک عادی تحکیم یافته (مورد  $OCR=1$ ) ارائه شده است. مطابق این شکل، بیشترین جابه جایی قائم در تاج تونل در مدل دو بعدی در حدود ۱۱۵ میلی متر است، در حالی که در مدل دو بعدی حدود ۱۱۵ میلی متر بدست آمده است. بر این اساس در این مورد، نتیجه تحلیل اجزای محدود دو بعدی ۳۴٪ بزرگ تر از یافته حاصل از مدل سه بعدی است.

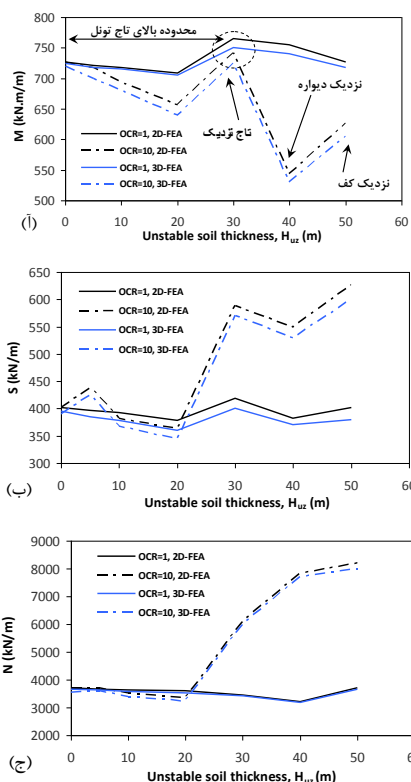


شکل ۱۰- مقایسه نتایج تحلیل های اجزای محدود (آ) دو بعدی و (ب) سه بعدی برای میزان نشست خاک.

در شکل ۱۱ مقایسه شباهت منحنی های میزان ناحیه سست شدگی در بالای تونل، در تحلیل های دو بعدی و سه بعدی برای ضخامت زون ناپایدار معادل ۱۰ متر (۲ لایه مشخص آبی رنگ هر یک به ضخامت ۵ متر) ارائه شده است. مطابق این شکل، منحنی های میزان (کانتورهای) جابه جایی قائم در بالای تونل و به ویژه بخش تاج آن، در نتایج دو بعدی و سه بعدی الگوی گسترده‌تری

لنگر خمشی لاینینگ می شود. در شکل ۹ (ب) رفتار و الگوی نیروی برشی لاینینگ (برش S) مشابه نمودار لنگر خمشی است، اما به علت ماهیت متفاوت نیروی برشی نسبت به لنگر خمشی، روال تغییر مقادیر آن متفاوت بدست آمده است.

مشابه شکل ۹ (ب) در شکل ۹ (ج) هم برای روال و الگو و هم برای مقادیر نیروی محوری در لاینینگ تونل، روند قبلی تکرار شده است، چرا که نیروهای برشی و محوری لاینینگ با ماهیت متفاوت و هر دو از جنس کمیت نیرو هستند. به هر حال مطابق شکل ۹ (ج) کمترین حساسیت به تغییرات ضخامت زون ناپایدار  $H_{uz}$  را نیروی محوری لاینینگ N در حالت زون ناپایدار متشکل از خاک عادی تحکیم یافته، از خود نشان می دهد. تنها نقطه شکست واضح در آن در ضخامت  $H_{uz}=40m$  است، که محل تقارب زون ناپایدار به محدوده دیواره تونل نعل اسبی است. مطابق شکل ۹ نتایج نیروهای داخلی در مقایسه مدل های دو بعدی و سه بعدی به طور میانگین بین ۵ تا ۱۵ درصد اختلاف دارند. در اغلب موارد هم، نتیجه تحلیل های دو بعدی بالاتری را بدست می دهد.

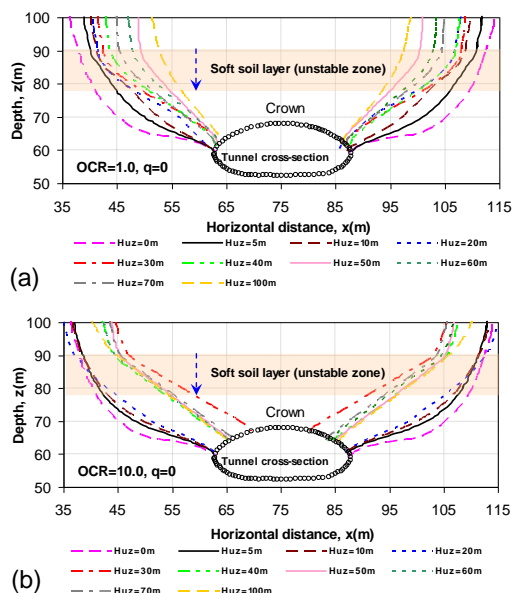


شکل ۹- تلاش داخلی لاینینگ در برابر ضخامت زون ناپایدار در  $q=100kPa$ : (آ) لنگر خمشی، (ب) نیروی برشی و (ج) محوری.

خصوصیات مکانیکی عمده و اساسی تونل، شامل مقادیر سختی (مدول ارتجاعی)، ابعاد و ضخامت بخش لاینینگ تونل است. هر چه قدر ضخامت و سختی لاینینگ بتن مسلح افزایش یابد، به همان میزان مقدار تغییرشکل های آن به ویژه در حوزه ارتجاعی



نشست و جابه جایی لایه های خاک بالای تاج تونل، تنها در اثر سربار وزنی خود لایه های فوقانی خاک بوده است. مابقی نمودارهای گسترش ناحیه سست شدگی بین این مقادیر قرار می گیرند و ابعاد آنها وابسته به موقعیت نسبی گسترش زون ناپایدار، در مقایسه با محل های تاج، دیواره ها و کف تونل است.

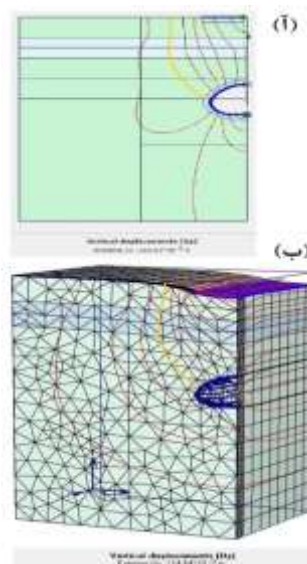


شکل ۱۲- ناحیه سست شدگی در سربار صفر و تحلیل خمیری در حالات تحکیم یافتگی شامل: (آ)  $OCR=1$  و (ب)  $OCR=10$ .

در شکل ۱۳ تغییرات محدوده سست شدگی بالای تونل به ازای اعمال سربار  $q=200kPa$  و اجرای تحلیل های خمیری در حالات تحکیم یافتگی خاک ناپایدار شامل  $OCR=1$  و  $OCR=10$  ترسیم شده است. بر حسب شکل ۱۳(آ) در حالت وجود سربار  $q=200kPa$  و خاک  $NC$  بزرگ ترین ابعاد ناحیه سست شده مربوط به حالت  $H_{uz}=0m$  مانند حالات مندرج در نمودار شکل قبلی (مورد  $q=0$ ) است. همچنین مشابه حالت شکل قبلی، با وجود سربار هم، دوباره کوچک ترین ابعاد ناحیه سست شده مرتبط با حالت  $H_{uz}=100m$  است (شکل ۱۳(ب)). با این تفاوت که در حالت وجود سربار  $q=200kPa$  نسبت به حالت  $q=0$  ابعاد محدوده سست شدگی دقیقاً به ناحیه زیر سربار محدود می شود.

از طرفی در شکل ۱۳(ب) و برای خاک  $OC$  در مقادیر  $H_{uz}>30m$  الگوی شکلی زون سست شده تغییر می کند و نسبت به موقعیت زون ناپایدار، دچار شکستگی می شود. در این حالت، برای مقادیر  $H_{uz}$  بزرگ تر از ۳۰ متر (یعنی گسترش ابعاد زون ناپایدار بعد از محل تاج تونل) در همه موارد بخش بالایی ناحیه سست شده، به زیر محل نقاط شروع و خاتمه سربار نزدیک می گردد. به گونه ای که در حالت  $H_{uz}=100m$  دقیقاً ناحیه سست شده از محل نقاط شروع و پایان محل سربار سطحی معادل ساختمان می گذرد

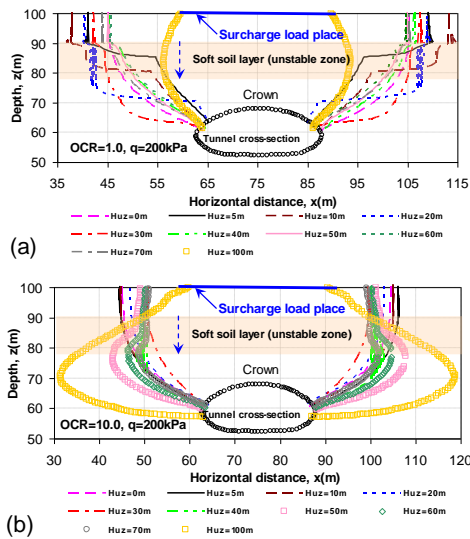
تقریباً مشابه ای دارند. شکل ظاهری آخرین کانتور جابه جایی قائم بخش بالای تونل، که به بخش دیواره تونل منتهی شده در نتایج تحلیل های دو بعدی و سه بعدی شکل ۱۱، به رنگ های زرد و قرمز مشخص شده است.



شکل ۱۱- مقایسه شباهت منحنی های میزان ناحیه سست شدگی در بالای تونل در تحلیل (آ) دو بعدی و (ب) سه بعدی.

### ۳-۲- بررسی وضعیت ناحیه سست شدگی بالای تونل

در این بخش، اثر متغیرهای مختلف بر هندسه و میزان گسترش ناحیه سست شدگی خاک در بالای تونل مطالعه شده است. بیش از ۳۰۰ تحلیل اجزای محدود دو بعدی و سه بعدی در برنامه های PLAXIS برای تهیه این نتایج و کنترل میزان دقت، روایی، پایایی، تکرارپذیری و اعتمادپذیری آنها انجام شده است. برای این منظور، شکل ۱۲ ناحیه سست شدگی لایه های خاک در بالای تونل به ازای سربار صفر و تحلیل خمیری، در حالات تحکیم یافتگی شامل  $OCR=1$  و  $OCR=10$  را نشان می دهد. در این شکل ضخامت زون ناپایدار بالای تاج تونل از صفر تا ۱۰۰ متر در نمونه های ۵ و ۱۰ متری گسترش می یابد. مطابق شکل ۱۲(آ) در حالت زون ناپایدار متشکل از خاک عادی تحکیم یافته، بزرگ ترین ناحیه سست شدگی مربوط به ضخامت زون ناپایدار برابر  $H_{uz}=0m$  است و کوچک ترین ناحیه سست شده مرتبط با ضخامت  $H_{uz}=100m$  است. اما در شکل ۱۲(ب) در حالت زون ناپایدار بیش تحکیم یافته، کوچک ترین ابعاد محدوده سست شدگی، مرتبط با حالت  $H_{uz}=30m$  است، که در حالتی رخ می دهد که زون ناپایدار به مجاورت تاج تونل رسیده باشد. در حالت خاک با  $OCR=10$  نیز بزرگ ترین ناحیه سست شده در بخش بالای تونل، مرتبط با  $H_{uz}=0m$  یا بدون حضور زون ناپایدار است. در این شکل ها، رخداد



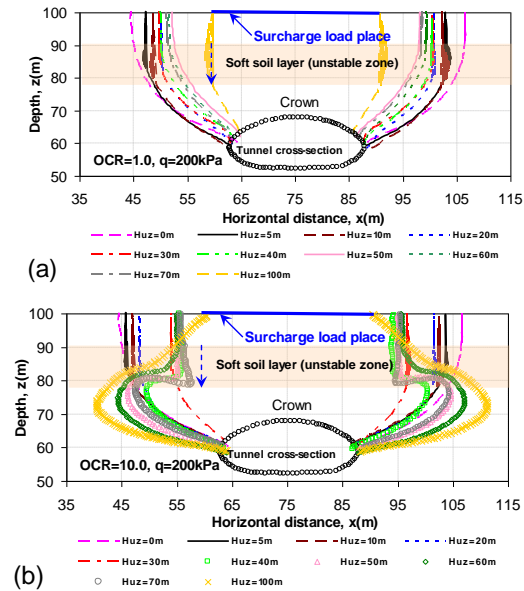
شکل ۱۴- ناحیه سست شدگی در سربار  $q=200\text{kPa}$  و تحلیل  
تحکیمی در حالات تحکیم یافتگی شامل: (آ)  $\text{OCR}=1$  و (ب)  
 $\text{OCR}=10$ .

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، اثر تغییرات ضخامت و موقعیت زون ناپایدار بر تغییرشکل ها و ابعاد ناحیه سست شدگی در بالای تاج تونل های حفر شده در خاک ناپایدار، مورد مطالعه قرار گرفته است. تحلیل های اجزای محدود دو و سه بعدی برای این منظور بکار گرفته شدند. از نرم افزارهای PLAXIS 2D و PLAXIS 3D TUNNEL برای انجام شبیه سازی های عددی دو و سه بعدی استفاده شده است. به دلیل تغییرات شدید مکانی زون ناپایدار در چارچوب مطالعه موردی بررسی شده شامل مقاطع عرضی تونل قطار شهری کرمانشاه، اثرات چندین عامل به صورت همزمان بر هندسه ناحیه سست شدگی و تغییرشکل ها و تلاش های داخلی لاینینگ تونل، ارزیابی شده است. این عوامل شامل ضخامت زون ناپایدار  $H_{uz}$ ، نسبت بیش تحکیم یافتگی خاک  $\text{OCR}$ ، نوع تحلیل عددی (یعنی 2D-FEA یا 3D-FEA)، سربار سطحی  $q$  و نوع تحلیل (خمیری یا تحکیمی) بر نتایج موردنظر سنجیده شده است. مقطع عرضی تونل قطار شهری کرمانشاه و مشخصه های سختی و مقاومتی خاک پیرامون آن، برای تعریف مدل های عددی، مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج عمده حاصل شده از این مطالعه، به شرح موارد خلاصه شده زیر قابل بیان هستند:

- ۱- تغییرات سربار ساختمانی سطحی  $q$  باعث تغییر در ابعاد، شکل ظاهری و نقاط شروع و پایان ناحیه سست شدگی به ازای تغییرات ضخامت زون ناپایدار می شود.
- ۲- نتایج تحلیل های اجزای محدود دو بعدی به طور معمول مابین ۵ تا ۳۵ درصد بزرگ تر از نتایج تحلیل

(شکل ۱۳(ب)). با مقایسه شکل های ۱۳(آ) و ۱۳(ب) مشخص می شود که پارامتر بیش تحکیم یافتگی خاک در تحلیل های خمیری، باعث ایجاد تغییرات در شکل، الگو، محل و محدوده گسترش ناحیه سست شده خاک در بالای تاج تونل می شود.



شکل ۱۳- ناحیه سست شدگی در سربار  $q=200\text{kPa}$  و تحلیل  
خمیری در حالات تحکیم یافتگی شامل: (آ)  $\text{OCR}=1$  و (ب)  
 $\text{OCR}=10$ .

در شکل ۱۴ برای مقدار سربار  $q=200\text{kPa}$  و تحلیل تحکیمی در حالات بیش تحکیم یافتگی شامل  $\text{OCR}=1$  و  $\text{OCR}=10$  محدوده زون سست شده به صورت همزمان در مقابل تغییرات ابعاد زون ناپایدار  $H_{uz}$  ترسیم شده است. بر حسب شکل ۱۴(آ) تحلیل تحکیمی به خودی خود، باعث بروز شکست در شکل ناحیه سست شده حتی در حالت خاک  $\text{NC}$  می شود. به طوری که ناحیه سست شده، بسته به موقعیت شروع و پایان زون ناپایدار، دچار شکستگی می شود. معمولاً حدود بخش شکسته شده افقی زون سست شدگی بالای تونل، در درون ضخامت زون ناپایدار قرار می گیرد. بنابر شکل ۱۴(ب) کوچک ترین ابعاد محدوده سست شدگی مرتبط به حالت مدل با خاک یکپارچه ناپایدار (یعنی  $H_{uz}=100\text{m}$ ) است. در شکل ۱۴(ب) در موارد خاک بیش تحکیم یافته، بزرگ ترین زون سست شده در ضخامت  $H_{uz}=30\text{m}$  بدست آمده و این در شرایطی است که زون ناپایدار به مجاورت تاج تونل رسیده است. از سویی بزرگ ترین ناحیه سست شدگی مرتبط با مورد  $H_{uz}=100\text{m}$  است. به طوری که در این مدل، که تماماً از خاک خزشی زون ناپایدار تشکیل شده است، ابعاد ناحیه سست شدگی در بالای تونل، به جوانب و کناره های بخش بالایی تونل نیز گسترش یافته است.

Cheng X, "An Arching Theory for Arch Tunnels Based on the Interaction Between the Lateral and Vertical Pressure in Good Ground", © Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2018. D. Zhang and X. Huang (Eds.): GSIC 2018, Proceedings of GeoShanghai 2018. International Conference: Tunnelling and Underground Construction, pp. 164-180, 2018.

[https://doi.org/10.1007/978-981-13-0017-2\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0017-2_16)

Chen RP, Song X, Meng FY, Wu HN, Lin XT, "Analytical approach to predict tunneling-induced subsurface settlement in sand considering soil arching effect", Computers and Geotechnics, 2022, Volume 141, 104492.

<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104492>

Cheng C, Pengpeng Ni P, Zhao W, Jia P, Gao S, Wang Z, Changchuan Deng, "Face stability analysis of EPB shield tunnel in dense sand stratum considering the evolution of failure pattern", Computers and Geotechnics, Volume 130, 103890, February 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103890>

Cheng C, Jia P, Zhao W, Ni P, Bai Q, Wang Z, Lu B, "Experimental and analytical study of shield tunnel face in dense sand strata considering different longitudinal inclination", Tunnelling and Underground Space Technology 113 (2021) 103950.

<https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103950>

Giardina G, De Jong MJ, Mair RJ, "Interaction between surface structures and tunnelling in sand: Centrifuge and computational modeling", Tunnelling and Underground Space Technology 50 (2015) 465-478.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2015.07.016>

Guo X, Wang Z, Geng P, Chen C, Zhang J, "Ground surface settlement response to subway station construction activities using pile-beam-arch method", Tunnelling and Underground Space Technology xxx (2020) xxx.

<https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103729>

He J, Liao S, Liu M, Sun J, Xi X, "The soil arching effect induced by shield tunnelling under asymmetric surface loading", Computers and Geotechnics Volume 154, February 2023, 105145.

<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2022.105145>

Huang Z, Wang C, Dong J, Zhou J, Yang J, Li Y, "Conditioning experiment on sand and cobble soil for shield tunneling", Tunnelling and Underground Space Technology 87 (2019) 187-194.

<https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.02.011>

Lee CJ, Wu BR, Chen HT, Chiang KH, "Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil", Tunnelling and Underground Space Technology 21 (2006) 119-132. doi:10.1016/j.tust.2005.06.003

Li P, Chen K, Wang F, Li Z, "An upper-bound analytical model of blow-out for a shallow tunnel in sand considering the partial failure within the face", Tunnelling and Underground Space Technology 91 (2019) 102989.

<https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.05.019>

Li P, Zou H, Wang F, Xiong H, "An analytical mechanism of limit support pressure on cutting face for deep tunnels in the sand", Computers and Geotechnics 119 (2020) 103372.

<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103372>

Long YY, Tan Y, "Soil arching due to leaking of tunnel buried in water-rich sand", Tunnelling and Underground Space Technology 95 (2020) 103158.

های سه بعدی هستند. همین موضوع باعث می شود که تحلیل های دو بعدی محافظه کارانه تر باشند.

۳- تحلیل خمیری نشست زمین کمتری نسبت به تحلیل های تحکیمی بدست می دهد. زیرا در تحلیل تحکیمی بخشی از جابه جایی قائم خاک، ناشی از وقوع تحکیم و کاهش حجم تحکیمی خاک است.

۴- نقاط شروع و پایان و ابعاد ناحیه سست شدگی ناشی از جابه جایی قائم در بالای تاج تونل و پیرامون آن، به شدت وابسته به سربار  $q$ ، نوع تحلیل و نسبت OCR خاک سست است.

۵- در تحلیل های خمیری پیچیدگی های شکل ظاهری ناحیه سست شده خاک در بالای تاج تونل، در حالت زون خاکی ناپایدار بیش تحکیم یافته (یعنی  $OCR=10$ ) بیشتر از حالت زون خاک ناپایدار عادی تحکیم یافته است. این موضوع و نتیجه گیری گفته شده در تحلیل های از نوع تحکیمی، کاملا وارونه است. در حالت بدون سربار (یعنی  $q=0$ ) و تحکیم یافتگی فقط در اثر وزن خاک، ساده ترین شکل ناحیه سست شدگی بدست می آید.

۶- در تمامی تحلیل ها، در حالتی که تمام هندسه مدل عددی از جنس خاک زون ناپایدار است (یعنی  $H_{uz}=100m$ )، نقاط شروع و پایان ناحیه سست شدگی در سطح زمین، درست در محل شروع و پایان اعمال سربار ساختمان سطحی (صفحه پی معادل سربار ساختمان) است. هر چند که شکل و ابعاد آنها در نقاط پایین تر از سطح زمین کاملا متفاوت است.

## ۵- مراجع

رضایی فرعی، اح و بابائی س، "بررسی اثرات پارامترهای مختلف در تعیین میزان بهینه فشار جبهه کار تونل های مکانیزه در خاکهای رسی-سیلتی"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۷، شماره ۳ (پاییز ۱۳۹۶) ۳۳-۴۵.

قلی پور، س، شاه نظری، ح، رازقی، ح، "بررسی تغییر شکل تونل ها در خاک ماسه ای با میان لایه های رسی توسط سانتریفیوژ ژئوتکنیکی"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست، جلد ۴۲، شماره ۳ (پاییز ۱۳۹۱) ۶۳-۶۹.

Aksoy CO, Ogul K, Topal I, Ozer SC, Ozacar V, Posluk E, Numerical modeling of non-deformable support in swelling and squeezing rock, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 52(2012)61-70.

Cai QP, Peng JM, Ng CWW, Shi JW, X.X. Chen, "Centrifuge and numerical modelling of tunnel intersected by normal fault rupture in sand", Computers and Geotechnics 111 (2019) 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.03.010>

- Terzaghi K (1943) "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley and Sons, New York, pp. 66-76.
- Vo-Minh T VM, Nguyen-Son L, Nguyen-Van G, Thai-Phuong T, "Upper bound limit analysis of circular tunnel in cohesive-frictional soils using isogeometric analysis based on B'ezier extraction", Tunnelling and Underground Space Technology 114 (2021) 103995. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.103995>
- Wan T, Li P, Zheng H, Zhang M, "An analytical model of loosening earth pressure in front of tunnel face for deep-buried shield tunnels in sand", Computers and Geotechnics 115 (2019) 103170. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103170>
- Wang F, "Empirical evidence for estimation of subsurface settlement caused by tunneling in sand", Underground Space xxx (xxxx) xxx. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.01.002>
- Wong KS, Ng CWW, Chen YM, Bian XC, "Centrifuge and numerical investigation of passive failure of tunnel face in sand", Tunnelling and Underground Space Technology 28 (2012) 297-303. doi:10.1016/j.tust.2011.12.004
- Wu J, Liao SM, Liu MB, "An analytical solution for the arching effect induced by ground loss of tunneling in sand", Tunnelling and Underground Space Technology 83 (2019) 175-186. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.09.025>
- Zhang DM, Chen S, Wang RC, Zhang DM, Li BJ, "Behaviour of a large-diameter shield tunnel through multi-layered strata", Tunnelling and Underground Space Technology 116 (2021) 104062. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104062>
- <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.103158>
- Lu H, Shi J, Wang Y, Wang R, "Centrifuge modeling of tunneling-induced ground surface settlement in sand", Underground Space xxx (xxxx) xxx. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2019.03.007>
- Mori L, Mooney M, Cha M, "Characterizing the influence of stress on foam conditioned sand for EPB tunneling", Tunnelling and Underground Space Technology 71 (2018) 454-465. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2017.09.018>
- O'Reilly MP and New BM, "Settlements above tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction", In Proceedings of Tunnelling, 82 (pp. 173-181). London: IMM, 1982.
- Pabodha KK, Kannangara M, Ding Z, Zhou WH, Surface settlements induced by twin tunneling in silty sand, Underground Space xxx (2021) xxx. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.05.002>
- Peck B, "Deep excavations and tunneling in soft ground", In Proceedings of 7th international conference on soil mechanics and foundation engineering (pp. 225-290). Mexico city, 1969.
- Shao S, Shao S, Li J, Zhu D, "Collapsible deformation evaluation of loess under tunnels tested by in situ sand well immersion experiments", Engineering Geology 292 (2021) 106257. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106257>
- Sohaei H, Hajihassani M, Namazi E, Marto A, "Experimental study of surface failure induced by tunnel construction in sand", Engineering Failure Analysis 118 (2020) 104897. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104897>
- Soomro MA, Ng CWW, Memon NA, Bhanbhro R, "Lateral behaviour of a pile group due to side-by-side twin tunneling in dry sand: 3D centrifuge tests and numerical modeling", Computers and Geotechnics 101 (2018) 48-64. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2018.04.010>
- Sun J, Liu J, "Visualization of tunnelling-induced ground movement in transparent sand", Tunnelling and Underground Space Technology 40 (2014) 236-240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2013.10.009>