

# **EXTENDED ABSTRACT**

# Studying the Area of Soil Loosening and Arching in The Urban Tunnel Adjacent to The Unstable Zone

Yazdan Shams Maleki<sup>\*</sup>

Department of Civil Engineering, Kermanshah University of Technology (KUT), Kermanshah, Iran

Received: 05 February 2023; Reviewed: 19 June 2023; Accepted: 10 April 2023

#### **Keywords**:

Urban tunnel, Unstable zone, Soil creep, Loosening zone, Finite elements, Two-dimensional and three-dimensional models.

#### 1. Introduction

Basically, the interaction behavior of urban tunnels in cohesive and granular soils is different. Various studies have been conducted on the behavior of tunnel structures in granular soils such as sandy soil. For example, tunnel model and sandy soil layer failures including various cases such as ground displacements and types of tunnel front ruptures have been studied. Also, ground surface failures and settlements and issues related to deep tunnels and the problems associated with shallow tunnels including partial failures in the excavation front have also been researched in previous researches. Anyway, according to the investigations carried out in the relevant technical literature, so far, the issue of facing or proximity of tunnel excavation operations to unstable soil zones with the ability to creep and time-dependent deformations has been less studied in the field of arching and deformation of the earth's surface. And the purpose of this research is to evaluate and study these cases at the same time. In this study, in the framework of two- and three-dimensional finite element models and numerical simulation of a case study following the occurrence of a tunnel excavation accident, these goals have been pursued.

### 2. Methodology

#### 2.1. Numerical study

In this research, the effects of changing the thickness and position of the *unstable soil zone* on the interaction behavior of the tunnel and soil layers have been evaluated. In this regard, for the numerical simulation of the soil around the tunnel in the stable zone, the Mohr-Coulomb (MC) elastic-perfect plastic model has been used, and the SSC soft soil creep model has been used to define the soil in the unstable zone. In order to model the different stages of tunnel boring and defining the tunnel, its lining mechanism and the activation of the soil layers and building surcharges in the two- and three- dimensional finite element programs of this research, the number of 10 different and consecutive phases or stages has been defined. Also, to define the reinforced concrete lining of the tunnel, an elastic model with structural concrete specifications (elastic modulus  $E_c=25$ GPa) has been used.

E-mail addresses: y.shamsmaleki@kut.ac.ir (Yazdan Shams Maleki).



#### 2.2. FE modeling

The FEM-based software packages, PLAXIS 2D and PLAXIS 3D TUNNEL, were used for the numerical modeling and analysis. In this study, parametric studies have been defined with changes in the thickness of the unstable zone, the over-consolidation ratio of the soil, numerical analysis type (plastic or consolidation) and the surface building surcharge (Fig. 1).



Fig. 1. Geometry of 2D and 3D finite element models, building surcharge and unstable zone

#### 3. Results and discussion

#### 3.1. Effect of surcharge load and unstable zone thickness (H<sub>uz</sub>)

In Fig. 2, the changes in the loosening zone at the top of the tunnel for the application of q=200kPa overhead and the execution of plastic analyzes in over-consolidation states including OCR=1 and OCR=10 are drawn. According to Fig. (2-a), in the presence of surcharge q=200kPa and NC soil, the largest dimensions of the loosening zone are related to  $H_{uz}$ =0m, as in the cases in the previous state (i.e., case q=0). It is also similar to the case of the previous state, despite the surcharge, again the smallest dimension of the loosening zone is related to the case of  $H_{uz}$ =100m (Fig. 2-a). with the difference that in the case of q=200kPa compared to q=0, the dimensions of the loosening zone are limited exactly to the area under the surface surcharge. On the other hand, in Fig. (2-b) and for OC soil at  $H_{uz}$  values >30m, the shape and pattern of the loosening zone changes and breaks compared to the position of the unstable zone. In this case, for  $H_{uz}$  values greater than 30m (that is, the expansion of the dimensions of the location of the starting and ending points of the surface surcharge location. In such a way that in the case of  $H_{uz}$ =100m, the loosening zone passes exactly from the starting and ending points of the equivalent surface overhead of the building (Fig. 2-b). By comparing Fig. (2-a) and (2-b), it is clear that over-consolidation of soil in plastic analysis causes changes in the shape, pattern, location and range of the loosened soil area above the tunnel crown.



Fig. 2. Surcharge q=200kPa and plastic analysis in over-consolidation states including: a) OCR=1 and, b) OCR=10

#### 4. Conclusions

In this study, the effect of the geometric and strength characteristics of the unstable zone on the interaction of the urban tunnel in the soil was evaluated in the form of two- and three-dimensional finite element simulations. According to the findings of this article, changes in surface building surcharge q cause changes in the dimensions, appearance, and starting and ending points of the loosening zone versus changes in the thickness of the unstable zone. The results of two-dimensional finite element analyzes are usually between 5 and 35% larger than the results of three-dimensional analyzes. This makes two-dimensional analyzes more conservative. Plastic analysis gives less ground settlement than consolidation analysis. Because, in the consolidation analysis, a part of the vertical displacement of the soil is caused by the occurrence of consolidation and the reduction of the volume of consolidated soft soil.

يزدان شمس ملکی <sup>\*</sup>

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی کرمانشاه

دريافت: 1401/11/24، بازنگرى: 1402/3/29، پذيرش: 1402/5/28، نشر آنلاين: 1402/5/28

#### چکیدہ

در این مطالعه وضعیت گسترش زون سستشدگی در بالای تونلهای نعل اسبی حفرشده در خاک لایهای مورد مطالعه قرار گرفته است. تحلیلهای اجزای محدود دو و سهبعدی به کار برده شده است. اثرات بیش تحکیم یافتگی، تغییرات ضخامت و محل استقرار لایه خاک ناپایدار در قالب مفهوم زون ناپایدار بر محدوده ناحیه سستشدگی ارزیابی شده است. برای مدلسازی لایههای خاک از مدلهای رفتاری مور -کولمب MC و خزش خاک نرم SSC استفاده شده است. همچنین مقایسه نتایج تحلیلهای عددی خمیری و تحکیمی ارائه شده است. نتایج این مقاله نشان میدهد 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 بهطورکلی هندسه زون سستشدگی در تاج تونل را تغییر میدهند. این تغییرات شامل اختلاف چشمگیر در ابعاد، الگو و میزان گسترش زون سستشدگی خاک است. همچنین نتایج تحلیلهای اجزای محدود سهبعدی مابین 5 تا 35 درصد کمتر از نتایج تحلیلهای محافظه کارانه اجزای محدود دوبعدی است.

**کلیدواژهها:** تونل شهری، زون ناپایدار، خزش خاک، ناحیه سستشدگی، اجزای محدود، مدلهای دوبعدی و سهبعدی.

#### 1– مقدمه

امروزه گسترش ساختوساز تونلهای شهری در کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه، به یک ضرورت اجتنابناپذیر تبدیل شده است. تونلهای مترو اغلب در محلهای پرازدحام 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 نگهداری یا لاینینگ تونل، تحت اثر تلاشهای داخلی از نوع نیروی محوری، نیروی برشی و لنگرخمشی است. این نیروها عموماً بهعنوان نیروهای داخلی طراحی سیستم نگهداری 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 میتواند موقعیتی خطرناک باشد. احداث تونلهای در خاکهای دانهای همانند ماسه (و یا شن) یک شرایط پایداری سازه زیرزمینی منحصربهفرد است. خاک دانهای شرایط مقاومتی و سختی کاملاً متفاوتی نسبت به خاک چسبنده دارد. از جمله مهمترین تفاوتها چگونگی وابستگی سختی خاک دانهای به سطح تنشهای

محصور کننده 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 اندر کنشی تونل های شهری در خاکهای چسبنده و دانه ای متفاوت است. مطالعات مختلفی در خصوص رفتار سازه تونل در خاکهای 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 یا 2014 و همکاران، 2012) و انواع گسیختگی های جبهه تونل (Wong و همکاران، 2012) مطالعه شده است.

همچنین گسیختگی و نشستهای سطح زمین (Sohaei و همکاران، 2019 و Lu ، 2021، Wang و همکاران، 2019 و همکاران، 2020 و مسائل مرتبط با تونلهای عمیق Pabodha و همکاران، 2019 و ممکاران، 2020) و مشکلات Mang رمتبط با تونلهای سطحی (کم عمق) شامل گسیختگیهای جزئی در جبهه حفاری (Li و همکاران، 2019) نیز در تحقیقات قبلی پژوهش شده است.

ناشر: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز شاپا الکترونیکی: 4077-2717 \*

. نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 09182322576

\* Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0001-8796-6016

https://doi.org/10.22034/CEEJ.2023.55368.2226

مسائلی همانند اندرکنش بین سازههای سطحی و تونلها (Giardina) و همکاران، 2015؛ Soomro و همکاران، 2018) و نیز روشهای حفاری و ساخت تونلها و مخاطرات در مسیر احداث تونل شامل گسلها (Cheng و همکاران، 2021 و همکاران، 2021 (Sigmon و همکاران، 2019؛ Cheng و همکاران، 2021 (گرفته قرار گرفته قرار گرفته Cai و همکاران، 2019) مدنظر محققین این زمینه قرار گرفته است. پدیده قوسزدگی<sup>1</sup> و جریان یافتگی مصالح ماسه ای ازجمله مهمترین چالشهای مورد بررسی تونلزنی در خاکهای دانه ای ماسه ای است (Long و Chen 2020؛ Chen و همکاران، 2022 (Sub و همکاران، 2019). قوسزدگی در حین حفاری تونل در خاکهای ریزدانه چسبنده (رسی) به سهولت اتفاق می افتد (Lee و همکاران، 2006).

تاکنون ارزیابی تونلهای شهری در خاک چندلایه ماسهای توسط مطالعات آزمایشگاهی در مقیاس کاهش یافته، توسط ابزار سانتریفیوژ ژئوتکنیکی بهخوبی اجرا شده است. مدلهای با ابعاد کوچک در میدان شتاب ng نتایج بسیار ارزشمندی در خصوص رفتار اندرکنشی خاک ماسهای و تونل بهدست دادهاند (Zhang و همکاران، 2014؛ Lu و همکاران، 2019؛ Gholipour و همکاران، 2012).

همچنین مدلسازیهای عددی در چارچوب روشهای اجزای محدود سهبعدی (Guo و همکاران، 2020) یکی از مهم ترین تکنیکهای مطالعه و شبیهسازی تونلها در خاک است.

جهت بررسی گسیختگی تونلهای در خاک مختلط چسبنده-اصطکاکی مدلهای تحلیلی ارزشمندی در سالیان اخیر بر مبنای نظریه تحلیل حدی، بهویژه قضیه کران بالا توسعه داده شده است (Wo-Minh و همکاران، 2021).

در این پژوهش، گسیختگی خاک ماسهای در هر دو مقطع عرضی و نیز مقطع طولی تونل در جهت جبهه حفاری مطالعه شده است (Rezaei و Babaa، 2017). بهطورکلی در تونلسازی در خاک ماسهای، دو پدیده مهم قوسزدگی خاک ریزدانه رسی (He و 2018، 2018) و وقوع جریان یافتگی مصالح دانهای (He و همکاران، 2023) مهمترین نکات کلیدی هستند. مصالح دانهای از جنس ماسه، بر خلاف خاکهای چسبنده همانند رس، بهراحتی به داخل تونل جاری میشوند و حفرات بزرگی در سطح زمین ایجاد میکنند. جریان یافتن مصالح ماسهای بهویژه در جبهه ایجاد میکنند. جریان یافتن مصالح ماسهای بهویژه در جبهه بسته به اینکه تونل در ماسه نزدیک به سطح (i و همکاران، بسته به اینکه تونل در ماسه نزدیک به سطح (i و همکاران، 2019) یا در عمق (Wan و همکاران، 2029، جابهجایی متفاوتی ایجاد میکند.

مطابق بررسیهای انجام گرفته در ادبیات فنی مرتبط تاکنون موضوع برخورد و یا مجاورت عملیات حفاری تونل به زونهای ناپایدار خاکی با قابلیت خزش و تغییر شکلهای وابسته زمان، کمتر در زمینه قوسزدگی و تغییر شکل سطح زمین مطالعه شده است و هدف این تحقیق ارزیابی و مطالعه همزمان این موارد است. در این مطالعه، در چارچوب مدلهای اجزای محدود دو و سهبعدی 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 قطارشهری شهر کرمانشاه آغاز شد. بهطوری که ریزش بخشی از سقف تونل قطارشهری کرمانشاه در صبح روز پنجشنبه 1401/04/16 باعث شد، که روند حفاری پروژه برای چند روز، جهت ایمنسازی این قسمت متوقف گردد. علت این ریزش برخورد فرآیند حفاری تونل به یک زون خاکی ناپایدار<sup>2</sup> با مشخصههای تراکمی، سختی و مقاومتی خاص بود. در این رخداد روند حفاری و نصب سیستم نگهداری تونل با یک زون ناپایدار در قطعه دوم تونل در کیلومتراژ 8/875 در عمق 29 متری زمین (در محدوده بافت قدیمی شهر حوالی مسجد جامع و مابین ایستگاههای زیرزمینی میدان آزادی M8 و سه راه شهید نواب صفوی M9) مواجه گردید.

بهطور 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 بهدلیل این که 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 1393 با تغییر سیستم، از مونوریل به قطار شهری تبدیل شد و مطابق شکل (1) مقرر گردید 6km از مجموع 13km طول مسیر، بهصورت زیرزمینی اجرا شود.



شکل 1- ایستگاه های 13گانه و قطعات زیرزمینی و روزمینی قطارشهری کرمانشاه در مناطق 8گانه شهر

1. Arching

قطعه اوّل این پروژه از میدان معلم واقع در سه راه مسکن آغاز و به طول 8/6km تا میدان آزادی ادامه می یابد (روزمینی) و قطعه دوم نیز به طول حدود 4/4km از میدان آزادی شروع و تا میدان فردوسی ادامه خواهد یافت (زیرزمینی). شکل (2) تصاویر مرتبط با ریزش بخشی از تاج و دیواره های تونل قطار شهری 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 منجربه 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 (2)).



شکل 2- ریزش بخشی از تاج و دیوارههای تونل قطارشهری کرمانشاه در حین انجام حفاری آن

در حین حفاری تونل، برخورد به زونها و رگههایی از خاک با اختلاط ناهمگون خاکهای ریزدانه چسبنده رسی با قابلیت بروز تحکیم و خزش (رفتارهای تغییرشکلی وابسته به زمان) بههمراه لای و نیز خاکهای دانهای همانند ماسه و شن با استعداد بروز ناپایداری میشود. این زونها در بخشهای سقف تونل، سبب ریزش و آسیب به سیستم نگهداری و لاینینگ بتن مسلح تونل میشوند. اگر ابعاد آسیبدیدگی و گسیختگی حادث شده در خاک بهسمت بالا گسترش یابد، به سطح زمین و سازههای سطحی نیز خسارت وارد میکند. بالابودن سطح آب زیرزمینی در خاک محل حفاری تونل نیز با کاهش مقاومت برشی، وقوع پدیدههای خزش-تحکیم و ناپایداری- ریزش را تسریع میکند.

شکل (3) نمایش شماتیک (فاقد مقیاس) همزمان هندسه تونل، زون خاکی سست (ناپایدار) به ضخامت Huz، 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 Peck (1969) 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 (۵) سطح زمین در فاصله افقی (۲) از خط مرکزی تونل، به صورت رابطه زیر محاسبه می شود:

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

که در آن Symax بیشینه نشست (جابهجایی قائم) در یک عمق معین است، X فاصله افقی از خط مرکزی تونل، و i فاصله افقی از نقاط عطف (منحنی قعر<sup>3</sup> نشست) تا خط مرکزی تونل است. یک روش پرکاربرد برای تعیین i توسط O'Reilly و New (1982) پیشنهاد شده است:

$$i = kh_0 \tag{2}$$

که در آن k پارامتر عرض فرورفتگی (پهنای منحنی قعر نشست) است که یک ثابت تجربی است که بهترتیب از 0/4 تا 0/7 برای خاکهای چسبنده و 0/2 تا 0/3برای خاکهای دانهای متغیر است و h عمق مدفون محور تونل است.



شکل 3- نمایش همزمان هندسه تونل، زون خاکی سست (ناپایدار)، منحنی نشست سطح زمین و سربار ساختمانی

همچنین مطابق شکل (4) در یک تونل، تحت اثرات سربار و عمق آب زیرزمینی، ناحیهای با جابهجاییهای قائم بهعنوان ناحیه سست شده<sup>4</sup> در بالای تونل تشکیل میشود. محاسبات این ناحیه که مرتبط با موضوع قوسزدگی خاک (Lee و همکاران، 2006) است، نخستین بار توسط ترزاقی بهشکل روابطی برای محاسبه فشار قائم خاک، با لحاظ فرضیاتی مدون شد (Terzaghi). دو فرض از نظریه ترزاقی برای تونلهای قوسی پذیرفته شده است

<sup>4.</sup> Loosening zone

(شكل (4)). (1) توده خاک زير سقف تونل در امتداد سطوح AB و 'B'A در حالت حدى مىلغزد. و زاويه ميل  $\alpha$  با جهت عمودى برابر مقدار ( $(\alpha/2) = (\alpha/2)$ ) است. (2) سطوح لغزشى بالاى سقف تونل بهصورت عمودى در نظر گرفته مىشوند (BC و 'C'B)، اگرچه سطوح لغزشى واقعى خاک گاهىاوقات منحنى هستند. مطابق اين تعريف، ناحيه سستشدگى شامل بخشى از لايههاى خاک بالاى تاج تونل است، كه دچار جابهجايى در راستاى قائم مىشود. در بخشهاى بعدى مقاله با توجه به نتايج حاصل شده مشاهده مى شود كه اين فرضيات در شرايط واقعى مختلف و با وجود زون ناپايدارى از خاک در بالاى تاج تونل، چندان صادق نخواهند بود.



شکل 4- نمایش: الف) هندسه کلی ناحیه سست شده خاک بالای تاج تونل در: ب) نظریه فشار قائم خاک ترزاقی

# 2- مدلسازیهای عددی

در این مطالعه برای شبیه سازی عددی خاک پیرامون تونل در ناحیه پایدار از مدل ارتجاعی- خمیری کامل مور- کولمب MC و 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 سنگهای سخت، به یکباره و ناگهانی (مثلاً به شکل انفجار سنگ یا تقریباً مستقل از زمان) اتفاق می افتد. از این رو جهت مدل سازی کرنشها 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 کرنشها با زمان را بهصورت حقیقی لحاظ می کند، مورد استفاده قرار گرفته است.

اما در تودههای خاکی مقاوم و پایدار مجاور لایه (زون) ناپایدار، از مدل رفتاری مستقل از زمان استفاده شده است، چرا که تغییرشکل یا گسیختگی تأثیرگذاری که مدل مسئله را تحت اثر خود قرار دهد در مصالح آن رخ نمیدهد. بر این اساس مدل رفتار ارتجاعی- خمیری کامل مور- کولمب MC انتخاب شده است. در فرمول بندي رياضي اين مدل، عامل زمان بهشكل صريح يا ضمني و نیز به شکل آهنگ (نرخ) کرنش تعریف نشده است. برای مدل سازی مراحل مختلف حفاری و تعریف تونل، سازوکار لاینینگ آن و فعالسازی لایههای خاک و سربار در برنامههای اجزای محدود دو و سهبعدی این تحقیق، تعداد 10 فاز مختلف و پیاپی تعریف شده است. همچنین برای تعریف لاینینگ بتن مسلح تونل از مدل ارتجاعی- خطی با مشخصات بتن سازهای (مدول ارتجاعی Ec=25GPa) استفاده شده است. ضخامت لاینینگ تونل (پارامتر در برنامه های اجزای محدود) مطابق محاسبات شرکت مهندسین d 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 El و سختی محوری EA لاینینگ، بر اساس این دو مقدار محاسبه شده است. مطابق جدول (1) به کمک انجام آزمایش های برش مستقیم بزرگ (قالب 15cm×30×30) برای لایه خاک پایدار شامل شن رسدار GC و برش مستقیم کوچک (ابعاد قالب مستطیلی 2×6×6 سانتی متری) مشخصه های مقاومتی خاک به دست آمده است (به -ترتيب مطابق استانداردهای ASTM D3080-03 و BS 1377 part 7). همچنین از آنجا که در تمامی مدلهای عددی سطح آب زیرزمینی درست در سطح زمین تعریف شده است، از آزمایشهای سهمحوری CU برای اندازه گیری پارامترهای مقاومتی و سختی زهکشی نشده خاک در زون ناپایدار استفاده شده است. بارگذاری نمونه سهمحوری در قالب منطق کنترل کرنش و از نوع اعمال بار فشاری به کمک تنش انحرافی جک بارگذاری بوده است. در طی بارگذاری سهمحوری، میزان تنشهای برجای افقی و قائم وارد بر نمونه سهمحوری بر اساس تنشهای ژئواستاتیکی عمق 29 متری (عمق رخداد گسیختگی در زون ناپایدار) تنظیم شده است. به-طوری که در حین بارگذاری نمونه خاک، تنش اصلی بزرگتر ٥٦ معادل تنش قائم در این عمق و تنش اصلی کوچکتر مرابر تنش افقی (جانبی) در این عمق منظورشده است.

نمونههای انتخاب شده برای انجام آزمایش سهمحوری، نمونه استوانهای دست نخورده از عمق استقرار زون ناپایدار مجاور تونل

مقادير پارامترها		یارامترها نماد (یکا) و استاندارد آزمایشگاهی		
زون ناپایدار (Undrained)	لایه خاک (Drained)	مورد استفاده		
0/105	-	شاخص فشردگی اصلاح شدہ (-) <sup>*</sup> ASTM D2435-04		
0/016	-	شاخص تورم اصلاح شده (-) <sup>(</sup> ۲ ASTM D2435-04		
0/008	-	شاخص خزش <sup>*</sup> μ ASTM D2435-04		
16	17	چگالی مرطوب(kN/m <sup>3</sup> ) چگالی ASTM D7263-09		
18	20	چگالی اشباع γsat (kN/m <sup>3</sup> ) ASTM D7263-09		
50	100	چسبندگی خاک C (kPa) یا Su (kPa) ASTM D4767-04 , ASTM D3080-04		
30	40	زاویه اصطکاک داخلی φ (deg) یا φu (deg) ASTM D3080-04, ASTM D4767-04		
0	10	زاویه اتساع (deg) y		
-	80	مدول ارتجاعی (MPa) ASTM D4767-04		
-	0/30	نسبت پواسون (-) V ASTM D4767-04		
0/0001	0/001	نفوذپذیری افقی K <sub>x</sub> (m/day) ASTM D2434-68 (2000) ASTM D		
0/00001	0/0001	نفوذپذیری قائم (K <sub>y</sub> (m/day) ASTM D2434-68 (2000)		
0/15	-	نسبت پواسون زهکشی نشده (-) ۷ <sub>۷</sub> ASTM D4767-04		
0/50	-	نسبت تخلخل اوليه (-) e <sub>0</sub> ASTM D2435-04		
1/204	-	پارامتر (-) M (تابع مستقیم k٥ و ٧٧)		

، زون ناپایدار	ی خاک و	رفتاری برا:	های مدل	1- يارامتر	جدول
	-		0 0		· · ·



تنش کل





شکل 5- نتایج عددی و اندازه گیریهای میدانی Aksoy و همكاران (2012)

(29 متری) حاصل از بیرون کشیدن نمونه گیر شکافدار (اسپلیت) و رادهای (میلههای) حفاری گمانه بوده است. برای انجام هر آزمایش سهمحوری، سه نمونه استوانهای دستنخورده از خاک حاصل از حفاری به طول 8cm و قطر 3/6cm (با متوسط نسبت طول به قطر 2/22 مطابق استاندارد انجام آزمایش) انتخاب شده است (ASTM D4767-04). میزان تراکم نسبی نمونههای دست نخورده اخذشده مابین 55 تا 65 درصد اندازه گیری شده است. همچنین از آنجا که رفتار تغییرشکلی و گسیختگی خاک در زون ناپایدار زهکشی نشده فرض شده است، از آزمایش سهمحوری CU روى اين نم ونهها (مطابق استاندراد بينالمللي ASTM D4767-04) استفاده شده است. مطابق نص صريح استاندارد به کاربرده شده، حداقل قطر نمونه استوانهای بایستی 3/3 سانتیمتر و میانگین نسبت ارتفاع (طول) به قطر نمونه مابین 2 تا 2/5 باشد. همچنین بزرگترین اندازه سنگدانههای موجود در نمونه، باید از یک ششم قطر نمونه کوچکتر باشد. علاوه بر آن، آزمایش تحکیم روی نمونههای خاک در یک چرخه کامل بارگذاری- باربرداری- بارگذاری مجدد LUR <sup>5</sup> برای تعیین مقادیر پارامترهای شاخص فشردگی اصلاح شده  $\lambda^*$  (از ضریب فشردگی )، شاخص تورم اصلاح شده  $\kappa^*$  (از ضریب تورم  $C_s$ ) و شاخص  $C_c$ خزش  $\mu^*$  (از ضریب تحکیم ثانویه  $C_{\alpha}$ ) انجام شده است (مطابق استاندارد ASTM D2435-04). افزون برآن، آزمایشهای نفوذپذیری با هد افتان (برای خاک ریزدانه چسبنده) و هد ثابت (بــرای خاکهای درشـتدانه، مطابــق استانــدارد (ASTM D2434-68(2000)، جهت تعيين ضرايب نفوذيذيري خاکها، به کار گرفته شده است. علت عمده بالا بودن مقدار پارامترهای مقاومتی زون ناپایدار شامل چسبندگی (برابر 50kPa) و زاویه اصطکاک داخلی آن (30 درجه) در جدول (1) تنشهای سربار زیاد روی نمونه اخذشده از خاک در عمق 29 متری زمین و محل رخداد ناپایداری در تاج تونل است. همچنین این مقادیر مقاومتی، در حالت زهکشی نشده ارائه شدهاند.

# 1-2- صحتسنجي مدل رفتاري و برنامه نرمافزاري انتخاب شدہ

در مطالعه انجام شده توسط Aksoy و همکاران (2012) مدل رفتاری مورداستفاده در مطالعه حاضر (مدل خزش خاک نرم SSC) و پارامترهای آن در برنامه اجزای محدود PLAXIS 3D TUNNEL به کار گرفته شده است.

69

آنها مشابه این مطالعه، برای شبیه سازی اندر کنش سیستم نگهداری تونل تغییر شکل ناپذیر NDSS <sup>6</sup> در توده سنگی ضعیف (خردشده) با قابلیت تورم و جمع (مچاله) شوندگی<sup>7</sup>، در تونل T13 در مسیر قطارهای پر سرعت آنکارا- استانبول، مدل اجزای محدود سهبعدی تونل و سیستم نگهداری آن تعریف شده است. مطابق یافته های شبیه سازی های عددی Aksoy و همکاران (2012) انطباق و هماهنگی مناسبی بین نتایج عددی و اندازه گیری های میدانی وجود دارد (شکل (5)).

#### 2-2- ایجاد مدلهای عددی دو و سهبعدی

به علت وجود تقارن در هندسه و بارگذاری مدلهای عددی موردنظر، تنها نیمی از هندسه مسئله مدل شده است. مطابق شکل 6 ابعاد مدلهای دو بعد شامل 100 متر عمق (محور -y) و 75 متر عرض (نصف 150 متر و محور - x) است. ابعاد مدل سه بعدی نیز مشابه مدلهای دوبعدی است و فقط شامل 55 متر عمق در جهت عمود بر صفحه مدلسازی (محور سوم - z) میشود. ابعاد هندسی مدلهای دوبعدی و سه بعدی نسبت به مختصه ها و حدود هندسی مقطع عرضی تونل، طوری درنظر گرفته شده که اثرات مرزی به حداقل برسند. به طوری که ابعاد بلوک مدلهای اجزای محدود دوبعدی و سه بعدی در راستای محور عرضی -x 6 برابر پهنای تونل و در راستای محور y از کف مدل ها 3/5 برابر ارتفاع تونل منظور شده است.

تعداد المانها در مدلهای دوبعدی با لحاظ افزایش تراکم مشبندی در پیرامون تونل برای افزایش دقت خروجیها برابر 3395 المان مثلثی 15 گرهای و در مدل سهبعدی 6788 المان گوهای است. سطح آب زیرزمینی برای لحاظ اثرات بحرانی فشار آب حفرهای و اشباع کامل لایههای خاک درست در سطح زمین و با محاسبات جریان حالت ماندگار تعریف شده است. علاوه بر آن شرایط مرزی قیدهای تکیهگاهی و درجات آزادی در دیوارههای قائم جانبی مدلها، از نوع غلتکی و در کف مدلها، از نوع کاملاً گیردارشده است (شکل (6)). در این مطالعه، اندرکنش خاک-سازه شامل خاک پیرامون تونل و بدنه سیستم لاینینگ تونل، با تعریف و فعالسازی مشخصات فصل مشترک<sup>8</sup> بین خاک و سازه (لاینینگ بتن مسلح) از طریق نسبت مقاومتی R (ضریب کاهش مقاومت مصالح در محل فصل مشترک R یا Rinterface) اعمال شده است. اگر R=1 باشد، فصل مشترک خاک- سازه صلب<sup>9</sup> و اندر کنشی لحاظ نمی شود و اگر R<1 باشد، فصل مشتر ک خاک-سازه انعطاف پذیر <sup>10</sup> و اندر کنش لحاظ شده است. مقدار کمیت R رابطه بین پارامترهای مقاومتی چسبندگی C و زاویه اصطکاک

6. Non-Deformable Support System: NDSS

7. Swelling and squeezing rock

8. Interface

داخلی  $\varphi$  در محل فصل مشترک خاک- سازه بهنسبت مقادیر موجود خاک برای این دو پارامتر مقاومتی را بر اساس معیار شکست مور- کولمب مشخص میکند. 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 80.95 تنظیم و لحاظ شده است. یادآوری میگردد که نسبت R برای پارامترهای مقاومتی فصل مشترک خاک-تونل (همانند چسبندگی C و زاویه اصطکاک داخلی  $\varphi$ ) میگردد که نسبت R برای پارامترهای مقاومتی فصل مشترک دارای توان یک (یعنی کاربرد R) و برای پارامتر سختی همانند مدول برشی فصل مشترک Ginterface دارای توان 2 (یعنی به شکل مقاومتی مصالح و بهاندازه واقعی 10% (یعنی 2092=0.922) مقاومتی مصالح و بهاندازه واقعی 10% (یعنی 500–223) از مشخصات سختی مصالح خاکی، در فصل مشترک خاک- تونل برای لحاظ انعطاف پذیری و اندرکنش خاک- تونل میکاهد.



شکل **6-** نمایش مدلهای: الف) دوبعدی، ب) سهبعدی اجزای محدود تونل- زون ناپایدار و سربار سطحی

# 3- بررسی نتایج

# 3-1- بررسی نموداری پاسخهای خاک و تونل

در این قسمت نتایج نموداری مطالعه حاضر ارائه می *گ*ردد. بر این اساس در شکل (7) تغییرات ضخامت زون ناپایدار *H*uz در

9. Rigid interface

10. Flexible interface

سربار q=100kPa در مقابل روند پارامترهای جابهجایی 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 (7-الف) نتایج تحلیلهای اجزای محدود سهبعدی (3D-FEA) برای اغلب موارد کمتر از مقادیر حاصل از تحلیلهای دوبعدی (2D-FEA) است. همچنین در حالت بیش تحکیم یافته، مقادیر جابهجاییهای افقی (شکل (7-الف)) و قائم (شکل (7-ب)) کمتر از حالت عادی تحکیم یافته است.

علت این موضوع آن است که در حالت بیش تحکیم یافته بهدلیل افزایش ضریب فشار جانبی خاک، مقادیر تنش محصورکننده افقی- جانبی خاک افزایش یافته، که باعث کاهش تغییر شکلهای افقی خاک پیرامون تونل میشود. این روند کاهشی برای کرنشهای برشی در شکل (7-ج) هم قابل مشاهده است. علاوه بر آن شکستگیهای نمودارهای شکل (7) بهعلت نزدیک شدن زون ناپایدار به تاج (30 متر)، دیواره (40 متر) و کف (50 متر) تونل است.



شکل 7- تغییرات ضخامت زون ناپایدار در q=100kPa در برابر: الف) جابهجایی افقی، ب) نشست، ج) کرنش برشی خاک

همچنین روندهای کلی پاسخهای موجود در شکل (7) نشان میدهد که خاک بیش تحکیم یافته با OCR=10 نسبت به تغییرات افزایشی ضخامت لایه ناپایدار (یعنی Huz) حساس تر است.

در شکل (8) تغییرات ضخامت زون ناپایدار  $H_{uz}$  در سربار q=100kPa در مقابل پارامترهای جابهجایی افقی و نشست لاینینگ بتنی تونل، بهازای دو مقدار OCR معادل 1 و 10 ارائه شده است. مطابق شکل (8) بازهم نتایج تحلیل سهبعدی کوچکتر از نتش شده است. مطابق شکل (8) بازهم نتایج تحلیل سهبعدی کوچکتر محصورکننده میانه افقی  $\sigma_2$  است، که در مدلهای سهبعدی به مورت واقعی لحاظ میشود. در واقع، در مدلهای عددی دوبعدی محصور و تشرهای اصلی بزرگ ا $\sigma_2$  و کوچک تر مدلهای عددی دوبعدی به محصورکننده میانه افقی  $\sigma_2$  است، که در مدلهای عددی دوبعدی به محصورکننده میانه افقی  $\sigma_2$  است، که در مدلهای عددی دوبعدی معدی محصورکننده میانه افقی  $\sigma_2$  است، که در مدلهای عددی دوبعدی محصورکننده میانه افقی  $\sigma_3$  است، که در مدلهای عددی دوبعدی محصورکننده میانه افقی ترگ ای و علت عمده آن نیز اثر تش محصورکننده میانه افقی و معرف میزود. در واقع، در مدلهای عددی دوبعدی دوبعدی دوبعدی محصورکننده میانه افقی و مور محصورکننده میانه افقی و میزه میند و معلت عمده آن نیز اثر تش محصورکننده میانه افقی و معرفی و معلی محصور کنده میانه افقی و معرفی محصورکنده میانه افقی و میزه میند و مینه و معلی محصورکنده میانه افقی و میند معانه افتی و می در مدلهای محدی دوبعدی درصد اختلاف مین پاسخهای تغییرشکل خاک حاصل از مدل سازی اجزای محدود دوبعدی (2D-FEA) و سهبعدی (3D-FEA) وجود دارد.



شکل **8- تغییرات ضخامت زون ناپایدار در سربار q=100kPa در** مقابل پارامترهای: الف) جابهجایی افقی، ب) نشست لاینینگ

در شکل (9) تغییرات تلاشهای داخلی سیستم لاینینگ بتن مسلح تونل در مقابل تغییر ضخامت زون ناپایدار Huz، نوع تحلیل (دو یا سهبعدی) و مقادیر OCR زون ناپایدار ارائه شده است. در شکل (9-الف) تغییرات لنگرخمشی نشاندهنده آن است که خاک بیش تحکیمیافته (با 10=OCR) 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-فاهر میشود. علت اصلی وقوع این پدیده، اختلاف در تنشهای ظاهر میشود. افقی (جانبی) خاک OC نسبت به خاک OC به محصورکننده افقی (جانبی) خاک OC نسبت به خاک OC در بزرگتر بودن ضریب فشار جانبی حالت سکون K خاک OC در

فصل مشترک خاک- تونل است. همچنین افزایش بیش تحکیم یافتگی و ازدیاد ضخامت زون ناپایدار، باعث کاهش مقادیر لنگرخمشی لاینینگ میشود. در شکل (9-ب) رفتار و الگوی نیروی برشی لاینینگ (برش S) مشابه نمودار لنگرخمشی است، اما بهعلت ماهیت متفاوت نیروی برشی نسبت به لنگرخمشی، روال تغییر مقادیر آن متفاوت بهدست آمده است.

مشابه شکل (9-ب) در شکل (9-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. بههرحال مطابق شکل (9-ج) کمترین حساسیت به تغییرات ضخامت زون ناپایدار Huz 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 Huz=40m است، که محل تقارب زون ناپایدار به محدوده دیواره تونل نعل اسبی است. مطابق شکل (9) ناپایدار به محدوده دیواره تونل نعل اسبی است. مطابق شکل (9) بهطور میانگین بین 5 تا 15 درصد اختلاف دارند. در اغلب موارد هم، نتیجه تحلیلهای دوبعدی مقادیر بالاتری را بهدست می دهد.



شکل 9- تلاش داخلی لاینینگ در برابر ضخامت زون ناپایدار در q=100kPa: الف) لنگرخمشی، ب) نیروی برشی، ج) محوری

خصوصیات مکانیکی عمده و اساسی تونل، شامل مقادیر سختی (مدول ارتجاعی)، ابعاد و ضخامت بخش لاینینگ تونل است. هرچه ضخامت و سختی لاینینگ بتن مسلح افزایش یابد، به همان میزان مقدار تغییرشکلهای آن بهویژه در حوزه ارتجاعی کاهش مییابد. در واقع سختی فنرهای خطی که برای مدل کردن فصل مشترک لاینینگ- خاک به کار میروند افزایش مییابد. با افزایش ضخامت و یا سختی لاینینگ، صلبیت خمشی (و نیز سختی محوری) آن افزایش مییابد و جداره لاینینگ همانند تیری صلب عمل میکند و لنگرهای بزرگتری را بهخود جذب میکند. از سوی دیگر، هرچه مقدار سختی لاینینگ، که معادل تقریبی مدول ارتجاعی آن است، افزایش یابد، میزان دامنه (محدوده) تغییرشکلهای ارتجاعی (در محدوده الاستیک) قابل تحمل توسط سیستم لاینینگ بتن مسلح، افزایش مییابد.

مقایسه نتایج تحلیلهای اجزای محدود دوبعدی و سهبعدی نشان میدهد که نتایج دوبعدی در زمینه تغییرشکلها محافظه-کارانه هستند. این بدین معنی است که در اغلب موارد، جابهجایی-های حاصل از تحلیلهای سهبعدی کوچکتر از موارد مشابه دوبعدی هستند. برای مثال در شکل (10) نتایج کانتورهای جابه-جایی قائم یا همان نشست مدلهای دوبعدی و سهبعدی با فرض ضخامت زون ناپایدار Huz معادل 10 متر و حالت خاک عادی تحکیم یافته (مورد 1=OCR) ارائه شده است. مطابق این شکل، بیشترین جابهجایی قائم در تاج تونل در مدل دوبعدی در حدود 154 میلیمتر است، در حالی که در مدل دوبعدی حدود داتج میلی متر بهدست آمده است. بر این اساس در این مورد، نتیجه تحلیل اجزای محدود دوبعدی 45% بزرگتر از یافته حاصل از مدل سهبعدی است.



شکل 10- مقایسه نتایج تحلیلهای اجزای محدود: الف) دوبعدی، ب) سهبعدی برای میزان نشست خاک

در شکل (11) مقایسه شباهت منحنیهای میزان ناحیه سستشدگی در بالای تونل، در تحلیلهای دوبعدی و سهبعدی برای ضخامت زون ناپایدار معادل 10 متر (2 لایه مشخص آبی رنگ هر یک به ضخامت 5 متر) ارائه شده است. مطابق این شکل، منحنیهای میزان (کانتورهای) جابهجایی قائم در بالای تونل و بهویژه بخش تاج آن، در نتایج دوبعدی و سهبعدی الگوی گستردگی تقریباً مشابهای دارند. شکل ظاهری آخرین کانتور جابهجایی قائم بخش بالای تونل، که به بخش دیواره تونل منتهی شده در نتایج تحلیلهای دوبعدی و سهبعدی شکل (11)، به رنگ-های زرد و قرمز مشخص شده است.



شکل 11- مقایسه شباهت منحنی های میزان ناحیه سست-شدگی در بالای تونل در تحلیل:الف) دوبعدی، ب) سهبعدی

#### 3-2- بررسي وضعيت ناحيه سستشدگي بالاي تونل

در این بخش، اثر متغیرهای مختلف بر هندسه و میزان گسترش ناحیه سستشدگی خاک در بالای تونل مطالعه شده است. بیش از 300 تحلیل اجزای محدود دوبعدی و سهبعدی در برنامههای PLAXIS برای تهیه این نتایج و کنترل میزان دقت، روایی، پایایی، تکرارپذیری و اعتمادپذیری آنها انجام شده است. برای این منظور، شکل (12) ناحیه سستشدگی لایههای خاک در بالای تونل بهازای سربار صفر و تحلیل خمیری، در حالات تحکیم -بالای تونل بهازای سربار صفر و تحلیل خمیری، در حالات تحکیم -مخامت زون ناپایدار بالای تاج تونل از صفر تا 100 متر در نموهای قرون ناپایدار مشرش مییابد. مطابق شکل (12-الف) در حالت زون ناپایدار متشکل از خاک عادی تحکیم یافته، بزرگترین ناحیه سستشدگی مربوط به ضخامت زون ناپایدار برابر mom Huz است

است. اما در شکل (12-ب) در حالت زون ناپایدار بیش تحکیم یافته، کوچکترین ابعاد محدوده سستشدگی، مرتبط با حالت *Huz*=30m است، که در حالتی رخ می دهد که زون ناپایدار به مجاورت تاج تونل رسیده باشد. در حالت خاک با 10=0CR نیز بزرگترین ناحیه سستشده در بخش بالای تونل، مرتبط با *Huz*=0m یا بدون حضور زون ناپایدار است. در این شکلها، رخداد نشست و جابهجایی لایههای خاک بالای تاج تونل، تنها در اثر سربار وزنی خود لایههای فوقانی خاک بوده است. مابقی نمودارهای گسترش ناحیه سستشدگی بین این مقادیر قرار می-گیرند و ابعاد آنها وابسته به موقعیت نسبی گسترش زون ناپایدار، در مقایسه با محلهای تاج، دیوارهها و کف تونل است.



شکل 12- ناحیه سستشدگی در سربار صفر و تحلیل خمیری در حالات تحکیم یافتگی شامل: الف) OCR=10، ب) OCR=10

در شکل (13) تغییرات محدوده سستشدگی بالای تونل به -ازای اعمال سربار q=200kPa و اجرای تحلیلهای خمیری در حالات تحکیم یافتگی خاک ناپایدار شامل 1=OCR و OCR -10 و OCR ترسیم شده است. برحسب شکل (13-الف) در حالت وجود سربار q=200kPa و خاک NC بزرگترین ابعاد ناحیه سست شده مربوط به حالت Om مانند حالات مندرج در نمودار شکل قبلی (مورد q=0) است. همچنین مشابه حالت شکل قبلی، با وجود سربار هم، (q=0) است. همچنین مشابه حالت شکل قبلی، با وجود سربار هم، به حالت Om است (13 ابعاد ناحیه سستشده مرتبط با حالت دوباره کوچکترین ابعاد ناحیه سستشده مرتبط با حالت وجود سربار BC (13-الف)). با این تفاوت که در حالت وجود سربار BC (13 سربار محدود می شود.

از طرفی در شکل (13-ب) و برای خاک 00 در مقادیر Huz>30m الگوی شکلی زون سست شده تغییر می کند و نسبت به موقعیت زون ناپایدار، دچار شکستگی می شود. در این حالت، برای مقادیر Huz بزرگتر از 30 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 گونهای که در حالت 100m=Huz دقیقاً ناحیه سست شده از محل نقاط شروع و پایان محل سربار سطحی معادل ساختمان می گذرد (شکل (13-ب)). با مقایسه شکلهای (13-الف) و (13-ب) مشخص می شود که پارامتر بیش تحکیم یافتگی خاک در ب) مشخص می شود که پارامتر بیش تحکیم یافتگی خاک در محدوده گسترش ناحیه سست شده خاک در بالای تاج تونل می-شود.



ب) CR=10.

در شکل (14) برای مقدار سربار g=200kPa و تحلیل تحکیمی در حالات بیش تحکیم یافتگی شامل GCR=1 و OCR=10 محدوده زون سست شده به صورت همزمان در مقابل تغییرات ابعاد زون ناپایدار Huz ترسیم شده است. بر حسب شکل (14-الف) تحلیل تحکیمی به خودی خود، باعث بروز شکست در شکل ناحیه سست شده حتی در حالت خاک 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 (14-الف) کوچک ترین ابعاد محدوده

سستشدگی مرتبط به حالت مدل با خاک یکپارچه ناپایدار (یعنی H<sub>uz</sub>=100m) است.

در شکل (14-ب) در موارد خاک بیش تحکیم یافته، بزرگ-ترین زون سست شده در ضخامت Huz=30m بهدست آمده و این در شرایطی است که زون ناپایدار به مجاورت تاج تونل رسیده است. از سویی بزرگترین ناحیه سستشدگی مرتبط با مورد Huz=100m است. بهطوری که در این مدل، که تماماً از خاک خرشی زون ناپایدار تشکیل شده است، ابعاد ناحیه سستشدگی در بالای تونل، به جوانب و کنارههای بخش بالایی تونل نیز گسترش یافته است.



شکل 14- ناحیه سستشدگی در سربار q=200kPa و تحلیل تحکیمی در حالات تحکیم یافتگی شامل: الف) OCR=1، ب) CR=10

#### 4- نتيجەگىرى

در این مقاله، اثر تغییرات ضخامت و موقعیت زون ناپایدار بر تغییرشکلها و ابعاد ناحیه سستشدگی در بالای تاج تونلهای حفرشده در خاک ناپایدار، مورد مطالعه قرار گرفته است. تحلیل-های اجزای محدود دو و سهبعدی برای این منظور بهکار گرفته شدند. از نرمافزارهای PLAXIS 2D و PLAXIS 3D TUNNEL برای انجام شبیهسازیهای عددی دو و سهبعدی استفاده شده است. بهدلیل 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 تغییرشکلها و تلاشهای داخلی لاینینگ تونل، ارزیابی شده است. این عوامل شامل ضخامت زون ناپایدار *دار*  https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.03.010

- 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, 2018, 164-180. 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, 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, 2021, 130, 103890.

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, 2021, 113, 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, 2015, 50, 465-478.
- Gholipour S, Shahnazari H, Razaghi HR, "Investigation of Tunnel Deformation in Sandy Ground with Clay Inclined Layers using Geotechnical Centrifuge", Journal of Civil and Environmental Engineering, October 2012, 42(68), 63-69 (in Persian). 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, 2020. 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, 2023, 154, 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, 2019, 87, 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, 2006, 21, 119-132. https://doi.org/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, 2019, 91, 102989.

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

نسبت بیش تحکیم یافتگی خاک OCR، نوع تحلیل عددی (یعنی 2D-FEA یا 2D-FEA)، سربار سطحی q و نوع تحلیل (خمیری یا تحکیمی) بر نتایج موردنظر سنجیده شده است. مقطع عرضی تونل قطار شهری کرمانشاه و مشخصههای سختی و مقاومتی خاک پیرامون آن، برای تعریف مدلهای 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 بهازای تغییرات ضخامت زون ناپایدار می شود.

۲- نتایج تحلیلهای اجزای محدود دوبعدی بهطور معمول مابین 5 تا 35 درصد بزرگتر از نتایج تحلیلهای سهبعدی هستند. همین موضوع باعث میشود که تحلیلهای دوبعدی محافظه-کارانهتر باشند.

۳- تحلیل خمیری نشست زمین کمتری نسبت به تحلیل-های تحکیمی بهدست میدهد. زیرا در تحلیل تحکیمی بخشی از جابهجایی قائم خاک، ناشی از وقوع تحکیم و کاهش حجم تحکیمی خاک است.

<sup>+</sup> نقاط شروع و پایان و ابعاد ناحیه سستشدگی ناشی از جابهجایی قائم در بالای تاج تونل و پیرامون آن، بهشدت وابسته به سربار *p*، نوع تحلیل و نسبت OCR خاک سست است.

<sup>4</sup> در تحلیلهای خمیری پیچیدگیهای شکل ظاهری ناحیه سستشده 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 نتیجهگیری گفته شده در تحلیلهای از نوع تحکیمی، کاملاً وارونه است. در حالت بدون سربار (یعنی O=q) و تحکیمیافتگی فقط در اثر وزن خاک، سادهترین شکل ناحیه سستشدگی بهدست میآید.

<sup>9</sup>- در تمامی تحلیلها، در حالتی که تمام هندسه مدل عددی از جنس خاک زون ناپایدار است (یعنی 100m)، نقاط شروع و پایان ناحیه سستشدگی در سطح زمین، درست در محل شروع و پایان اعمال سربار ساختمان سطحی (صفحه پی معادل سربار ساختمان) است. هرچند که شکل و ابعاد آنها در نقاط پایینتر از سطح زمین کاملاً متفاوت است.

#### 5- مراجع

- 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, 2012, 52, 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, 2019, 111, 137-146.

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, 2019, 115, 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.

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, 2012, 28, 297-303. https://doi.org/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, 2019, 83, 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, 2021, 116, 104062.

https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104062

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, 2020, 119, 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, 2020, 95, 103158. 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.
- 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, 2018, 71, 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, 1982, 82 173-181.
- Pabodha KK, Kannangara M, Ding Z, Zhou WH, "Surface settlements induced by twin tunneling in silty sand", Underground Space, 2021.

https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.05.002

- Peck B, "Deep excavations and tunneling in soft ground", In Proceedings of 7<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, 1969, 225-290.
- Rezaei AH, Babaei S, "The Soil Parameters Effects on the Optimum Face Pressure of Mechanized Tunnels in Cohesive Soils", Journal of Civil and Environmental Engineering, December 2017, 47(88), 33-45 (in Persian).
- 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, 2021, 292, 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, 2020, 118, 104897. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.10489 7
- Soomro MA, Ng CWW, Memon NA, Bhanbhro R, "Lateral behaviour of a pile group due to side-by-side twin tunnelling in dry sand: 3D centrifuge tests and numerical modeling", Computers and Geotechnics, 2018, 101, 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, 2014, 40, 236-240. http://dx.doi.org/10.1016/j.tust.2013.10.009
- Terzaghi K, "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley and Sons, New York, 1943, 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, 2021, 114, 103995.