

## Face Stability Analysis for an EPB Shield Tunnel by using two-dimension finite element limit analysis (Case study: Ahwaz Metro line 1 Tunnel)

Mohammadreza Entezar<sup>1</sup>, Abbas Eslami Haghghat<sup>2</sup> and Mohsen Hajihassani<sup>3\*</sup>

1- MSc. student, Department of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

2 Assistant Professor, Department of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

3- Associate Professor, Department of Engineering, Urmia University, Urmia, Iran

### ABSTRACT

In recent years, earth pressure balance (EPB) tunnel boring machines (TBMs) have become widely used for tunnel excavation. Proper design of TBMs requires detailed study and examination of the soil conditions around the excavation site. A key parameter in these studies is the stability pressure of the working face, which is applied to the soil mass by the TBM to prevent collapse and uplift of the soil. This study analyses and investigates the stability pressure of the working face of Ahwaz metro tunnel line 1 using finite element limit analysis and two-dimensional modelling. This method, which combines limit analysis and finite element meshing, yields highly accurate results. The average of the upper and lower limits obtained can serve as a reliable approximation of the actual load. In the collapse state, the percentage difference between the upper and lower limits is typically less than 0.3%, and in the uplift state, it is generally below 2%. These results suggest that the two-dimensional finite element limit analysis method is a highly suitable initial approach for estimating the stability pressure of the working face.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 02 August 2024

**Revise Date:** 18 September 2024

**Accept Date:** 28 September 2024

### Keywords:

Finite Element Limit Analysis  
Stability Pressure  
Upper Bound  
Lower Bound  
2D Analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.437451.3335](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.437451.3335)

\*Corresponding author: Mohsen Hajihassani

Email address: [m.hajihassani@urmia.ac.ir](mailto:m.hajihassani@urmia.ac.ir)

## محاسبه فشار پایداری جبهه کار دستگاه حفاری متعادل کننده فشار زمین به روش تحلیل حدی المان محدود دوبعدی (مطالعه موردی تونل خط یک مترو اهواز)

محمدرضا انتظارمرنه<sup>۱</sup>، عباس اسلامی حقیقت<sup>۲</sup>، محسن حاجی حسنی<sup>۳\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

### چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از دستگاه‌های حفاری مکانیزه مانند دستگاه متعادل کننده فشار زمین، برای حفاری تونل بطور گسترده‌ای رواج یافته است. طراحی مناسب این دستگاه‌ها نیازمند مطالعه و بررسی دقیق توده خاک اطراف محل حفاری می‌باشد. یکی از پارامترهای مهم در این مطالعات، فشار پایداری جبهه کار لازم برای جلوگیری از گسیختگی توده خاک اطراف محل حفاری ناشی از فروریزش و بالازدگی خاک می‌باشد که توسط دستگاه حفاری به توده خاک اعمال می‌شود. در این پژوهش با استفاده از روش تحلیل حدی المان محدود و مدلسازی دوبعدی، فشار پایداری جبهه کار تونل خط یک مترو اهواز مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. این روش، ترکیبی از روش آنالیز حدی و مش‌بندی المان محدود می‌باشد. نتایج بدست آمده از این روش از دقت بسیار بالایی برخوردارند به نحوی که میانگین کران بالا و پایین بدست آمده را می‌توان تقریبی مناسب از فشار واقعی در نظر گرفت. درصد اختلاف بین کران بالا و پایین بدست آمده از این روش به طور متوسط در حالت فروریزش کمتر از 0/3 درصد و در حالت بالازدگی کمتر از ۲ درصد می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از روش آنالیز حدی المان محدود دوبعدی جهت بررسی فشار پایداری جبهه کار به عنوان یک تخمین اولیه، روش بسیار مناسبی می‌باشد.

کلمات کلیدی: تحلیل حدی المان محدود دوبعدی، فشار پایداری جبهه کار، آنالیز حدی، کران بالا، کران پایین

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.437451.3335">10.22065/jsce.2024.437451.3335</a>					
	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2024.437451.3335">https://doi.org/10.22065/jsce.2024.437451.3335</a>	۱۴۰۴/۰۳/۳۱	۱۴۰۳/۰۷/۰۷	۱۴۰۳/۰۷/۰۷	۱۴۰۳/۰۶/۲۷	۱۴۰۳/۰۵/۱۳

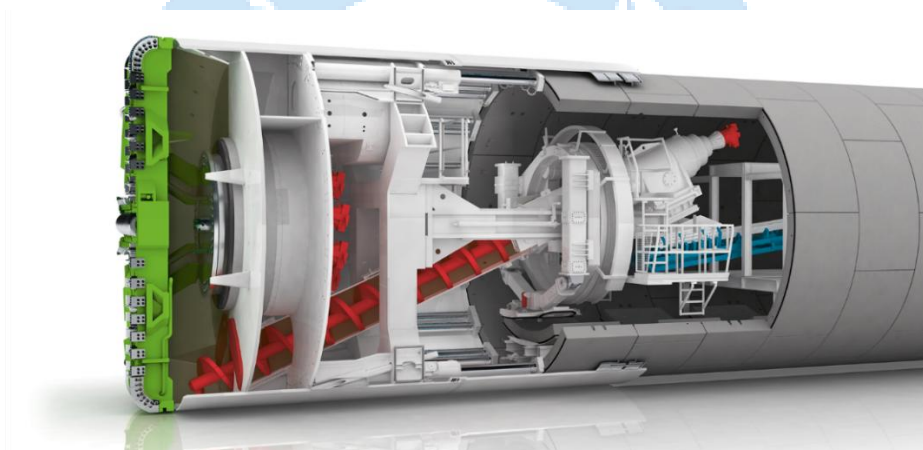
\*نویسنده مسئول:

محسن حاجی حسنی  
m.hajihassani@urmia.ac.ir

پست الکترونیکی:

## ۱- مقدمه

در قرن بیستم استفاده از دستگاه‌های حفاری مکانیزه بمنظور احداث فضاهای زیرزمینی مانند تونل‌های مترو، رواج یافته است. کاربرد این دستگاه‌ها نسبت به روش‌های سنتی، از مزایای زیادی برخوردار است. از جمله این مزایا می‌توان به حفاری با نرخ و بازدهی بالا، ایجاد محیط ایمن برای کارگران در حین حفاری و احداث سریع پوشش تونل بعد از حفاری اشاره کرد. قابل ذکر است که در صورت انتخاب این دستگاه‌ها جهت تونل‌سازی هزینه ساخت بالایی به همراه دارد و مراحل طراحی و ساخت آن‌ها زمان بر است. دستگاه‌های حفاری مکانیزه، دارای تنوع زیادی شامل: دستگاه حفاری متعادل کننده فشار زمین<sup>۱</sup>، دستگاه حفاری تونل تک سپر و دو سپر، دستگاه حفاری دوغابی و دستگاه حفاری با سپر ترکیبی، هستند. دستگاه حفاری تونل EPB که نمونه‌ای از این دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است، برای حفر تونل در زمین‌های ناپایدار مانند خاک رس، سیلت، ماسه یا شن مناسب است. در این نوع دستگاه صفحه‌ای از خاک خمیری که متشکل از خاک حفاری شده و مواد افزودنی است، از جبهه کار محافظت می‌کند [۱]. تزریقات حاوی مواد افزودنی باعث بهبود قوام خاک، کاهش چسبندگی خاک و در نتیجه کارایی آن می‌شود. برای اطمینان از انتقال فشار ننگه دارنده به خاک، صفحه خاک خمیری تشکیل شده از طریق انتقال نیروی رانش به دیواره جبهه کار تحت فشار قرار می‌گیرد. سرعت پیشروی دستگاه حفاری (مقدار خاک حفاری ورودی به دستگاه) و مقدار خاک خروجی از طریق نوار نقاله، فشار ننگه دارنده سطح تونل در جبهه کار را تنظیم می‌کند. این عمل توسط قرائت سنسورهای موجود در دیواره جبهه کار کنترل می‌شود.



شکل ۱- طرح یک دستگاه حفاری EPB (Herrenknecht AG)

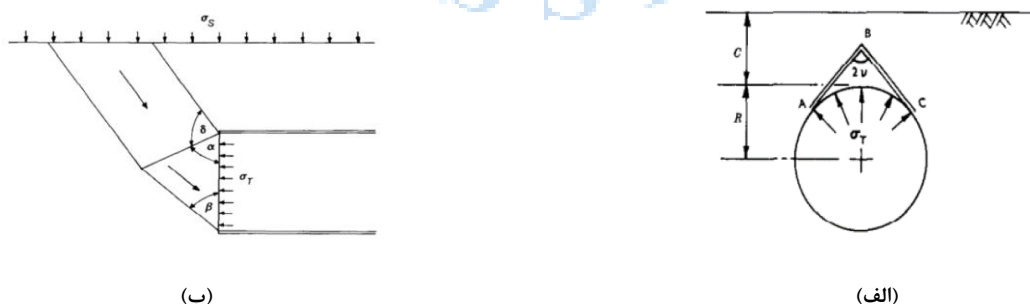
از این رو، محاسبه دقیق فشار پایداری جبهه کار برای جلوگیری از گسیختگی توده خاک که می‌تواند هزینه‌های زیادی را در پی داشته باشد، از اهمیت بالایی برخوردار است. برای محاسبه فشار پایداری جبهه کار، روش‌های بسیاری توسط محققین مختلف بکار گرفته شده است. این روش‌ها در سه قسمت کلی روش‌های عددی، تحلیلی و تجربی گنجانده می‌شوند. روش آنالیز حدی که از روش‌های تحلیلی به حساب می‌آید پایه اصلی این پژوهش می‌باشد. در این تحقیق از روش تحلیل حدی آلمان محدود دوبعدی (که در ادامه توضیح داده می‌شود)، برای محاسبه فشار پایداری جبهه کار تونل خط یک مترو اهواز با مدلسازی دوبعدی استفاده شده است. زمین اطراف مسیر حفاری تونل مترو اهواز دارای چندین لایه خاک می‌باشد که در طول مسیر پارامترهای آن تغییر می‌کند همچنین با توجه به قرارگیری سطح تراز آب زیرزمینی در نزدیکی سطح زمین باعث ایجاد فشار آب در ناحیه حفاری تونل شده است. وجود چنین شرایط خاصی در زمین اطراف تونل، در محاسبه فشار پایداری جبهه کار چالش‌هایی ایجاد می‌کند که یکی از دلایل انتخاب این مسیر برای آنالیز می‌باشد.

<sup>1</sup> Earth Pressure Balance, EPB

## ۲- تحلیل حدی المان محدود دوبعدی

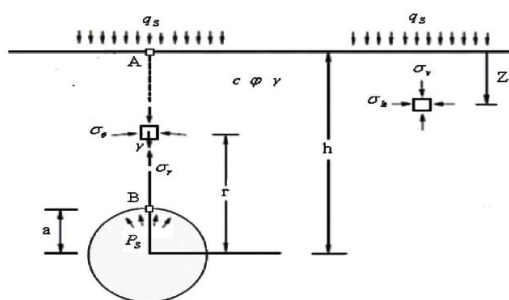
روش تحلیل حدی المان محدود<sup>۲</sup> ترکیبی از روش آنالیز حدی و مش بندی المان محدود می باشد. در اواسط قرن نوزدهم میلادی، هیل روش قضایای حدی را مطرح نمود [۲]، که پس از وی محققینی از جمله، دراگر، پراگر و گرین برگ با تعمیم این روش، مفاهیم قضایای حدی شامل اصل دراگر و قانون جریان وابسته را ارائه کردند [۳]. روش آنالیز حدی یک روش قدرتمند در تعیین حدود بار گسیختگی می باشد که مرز بالا و مرز پایین بارهای حدی را محاسبه می کند. در روش آنالیز حدی، با پاسخگویی به سه دسته معادلات تعادل، سازگاری و رفتاری می توان بیشتر مسائل پایداری در خاک را تحلیل نمود. این روش شامل دو قضیه کران بالا و کران پایین می شود [۴]. در این روش با صرف نظر از معادلات تعادل و ارضا معادلات سازگاری و رفتاری، کران بالا بار گسیختگی واقعی قابل محاسبه است و در صورت ارضا معادلات تعادل و معادلات رفتاری و صرف نظر از معادلات سازگاری، کران پایین بار گسیختگی واقعی قابل محاسبه می باشد. در این روش فرض بر این است که رفتار خاک پلاستیک کامل است و از قانون جریان پیوسته پیروی می کند. بر اساس این فرض ها حد بالا و حد پایین برای ظرفیت باربری نهایی خاک محاسبه می شوند. محققین زیادی فشار پایداری جبهه کار حفاری را با استفاده از روش آنالیز حدی محاسبه نمودند.

محققین زیادی از روش آنالیز حدی برای بررسی مسائل پایداری در خاک بهره برده اند. *Potts* و *Atkinson* در سال ۱۹۷۷ میلادی فشار پایداری مورد نیاز که توسط هوای فشرده، دوغاب و یا سپر محافظ تأمین می شود را مورد بررسی قرار دادند. شکل ۲-الف مکانیزم گسیختگی کران بالا استفاده شده توسط این محققین را نشان می دهد [۵]. در سال ۱۹۸۰ میلادی *Davis* و همکارانش پایداری فضای خالی و تونل های سطحی را برای مصالح ترسکا بررسی کردند که در این بررسی خاک چسبنده و در شرایط زهکشی نشده بوده و زاویه اصطکاک در پایداری جبهه کار در نظر گرفته نشده است. شکل ۲-ب مکانیزم کرانه بالا انتخاب شده توسط این محقق را نشان می دهد [۶]. *Dormieux* و *Leca* پایداری جبهه کار را با استفاده از معیار گسیختگی موهر-کولمب و با استفاده از آنالیز حدی بررسی کردند. آنها کرانه بالا را برای سه مکانیزم گسیختگی ارائه دادند و نتایج را با کرانه پایین که توسط *Pannet* و *Leca* انجام شده بود و نتایج آزمایشگاهی موجود مقایسه کردند. شکل ۳-الف یکی از مکانیزم های گسیختگی که توسط این محقق در نظر گرفته شده است را نشان می دهد [۷][۸]. در سال ۲۰۰۴ *Torres* و *Carranza* راه حل مرز پایین را با بهره گیری از مطالعات *Conqout* و *Kerisel* توسعه دادند. مدل *Conqout* شرایط تعادل را در حالتی که مصالح در بالای تاج تونل (دایروی، استوانه ای یا کروی) در حال گسیختگی است بررسی کردند که در شکل ۳-ب نشان داده شده است [۹][۱۰]. *Soubra* در سال ۲۰۱۰ میلادی دو مکانیزم متفاوت برای بالازدگی و ریزش با بهره گیری از *log-spiral* ارائه داده است که در شکل ۳-ج نشان داده شده اند [۱۱]. *Albers* نیز با در نظرگیری معیار گسیختگی موهر-کولمب، تحلیل پایداری جبهه کار را در خاک های لایه ای همانند شکل ۳-د در سال ۲۰۱۳ میلادی ارائه داد [۱۲].

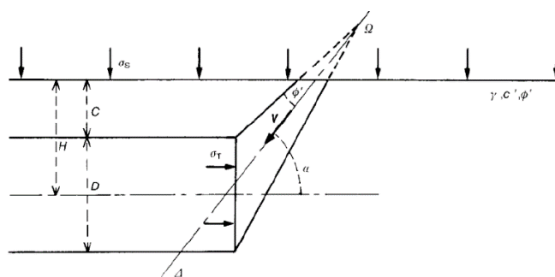


شکل ۲- الف: مکانیزم گسیختگی کران بالا (Atkinson, 1977) ب: مکانیزم کرانه بالا (Davis, 1980)

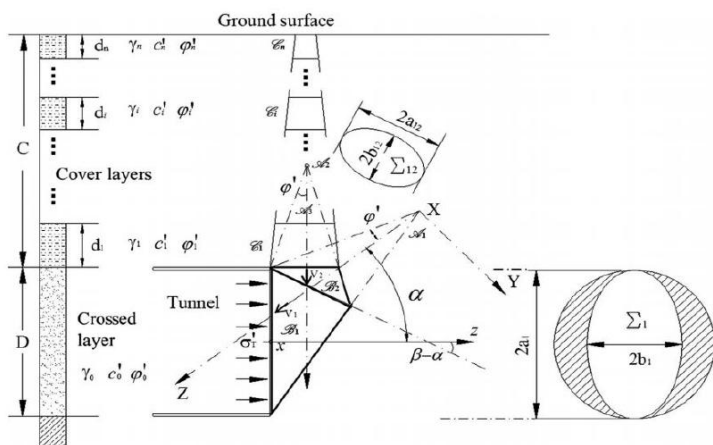
<sup>2</sup> Finite Element Limit Analysis, FELA



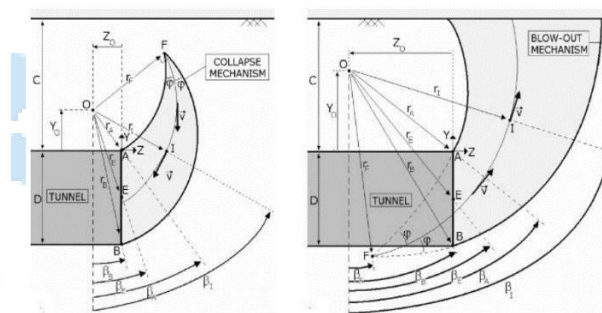
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۳- الف: مکانیزم گسیختگی (Leca and Dormieux, 1990) ب: پارامترهای جبهه کار (Carranza, 2004) ج: هندسه گسیختگی (Soubra, 2010) د: مدل گسیختگی (Bettina Albers, 2013)

در اواخر قرن نوزدهم میلادی اسلوان با خطی سازی معیار تسلیم موهر-کلمب توسط اعمال محدودیت‌های مختلف توانست کران بالا و کران پایین ظرفیت باربری پی را محاسبه نماید که روش استفاده شده توسط این محقق که به آن، روش تحلیل حدی المان محدود نیز گفته می‌شود، ترکیبی از روش‌های آنالیز حدی و المان محدود با برنامه نویسی خطی می‌باشد.

کران پایین در این روش بیان می‌کند که هر میدان تنش فرض شده‌ای که از لحاظ استاتیکی، مجاز باشد و معادلات تعادل را ارضا نماید و همچنین پاسخگوی شرایط مرزی تنش و معیار تسلیم باشد، بار خارجی این میدان تنش از بار گسیختگی واقعی بیشتر نخواهد بود. مسأله پیدا کردن یک میدان تنش که از لحاظ استاتیکی مجاز باشد که بار گسیختگی را به حداکثر برساند، به صورت یک مسأله بهینه یابی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} && -\{c\}^T \{\sigma\} \\
 & \text{Subject to} && [A]_1 \{\sigma\} \leq \{b_1\} \\
 & && [A]_2 \{\sigma\} = \{b_2\}
 \end{aligned} \tag{1}$$

در برنامه ریزی خطی، تابع هدف ترکیبی خطی از مجهولات بوده که ضرایب این ترکیب به وسیله ماتریس  $\{c\}^T$  نشان داده می‌شود.  $[A]_1$  ماتریس محدودیت‌های ناشی از معیار تسلیم،  $[A]_2$  ماتریس سایر محدودیت‌های اعمالی،  $\{b_1\}$  و  $\{b_2\}$  مقادیر از پیش مشخص تنش در شبکه مش و  $\{\sigma\}$  نشان دهنده بردار تنش‌های گره‌ای کل می‌باشد [۱۳].

در بررسی کران بالا شرایط سینماتیک بر مسئله اعمال می‌شود. بصورتی که هر میدان سرعتی که از لحاظ سینماتیکی، مجاز باشد و شرایط مرزی سرعت، معیار تسلیم و معادلات سازگاری را ارضا نماید، بار گسیختگی بدست آمده از بار واقعی گسیختگی بیشتر خواهد بود. میدان سرعت سینماتیکی مجاز که بار گسیختگی را به حداکثر برساند به صورت زیر بیان می‌شود:

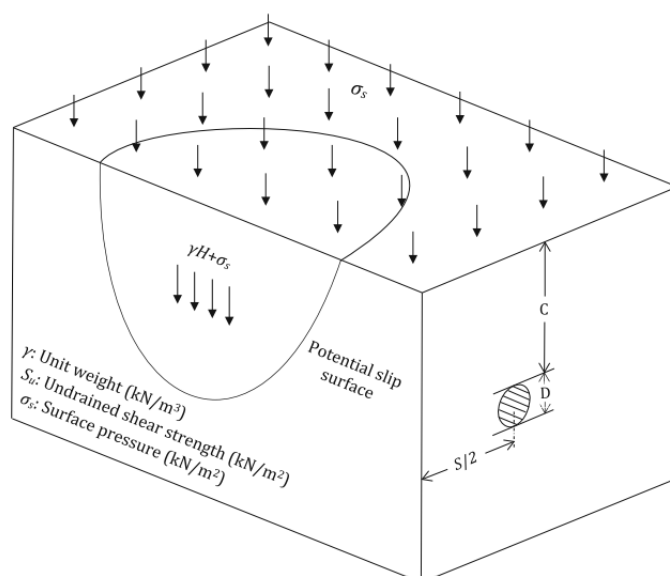
$$\begin{aligned}
 & \text{Minimize} && C^T X \\
 & \text{Subject to} && AX = B \\
 & && X \geq 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

$C^T$  نشان دهنده انرژی تلف شده در المان‌های مثلثی و ناپیوستگی‌ها می‌باشد،  $X$  بردار سرعت‌های گره‌ای و ضرایب نرخ پلاستیک شدگی المان‌ها و پارامترهای ناپیوستگی است و  $A$  ماتریس کل محدودیت‌های اعمالی و  $B$  جایجایی‌های از پیش مشخص در شبکه مش می‌باشد [۱۴].

اسلوان در ادامه تحقیقات خود، با تعمیم این قضیه و با کمک اسدی، پایداری جبهه‌کار در شرایط کرنش صفحه‌ای را در مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. در سال‌های اخیر نیز محققین از این روش برای محاسبات خود استفاده کرده‌اند. از جمله این محققین می‌توان به شیواو و الاسدی<sup>۳</sup> اشاره کرد که با بهره‌گیری از روش تحلیل حدی المان محدود تأثیر فاصله محوری دو تونل دایروی کنار هم را بر عدد پایداری بررسی نمودند [۱۶]. خاک مورد بررسی در این تحقیق خاک رس صرفاً چسبنده زهکشی نشده در نظر گرفته شده است و مقادیر بدست آمده را به صورت عدد پایداری ( $N$ ) ارائه دادند. در شکل ۴ حالت کلی مسأله نشان داده شده است:

$$N = \frac{\sigma_s + \gamma H - \sigma_t}{S_u} \tag{3}$$

<sup>3</sup> Shiau and Al-Assadi

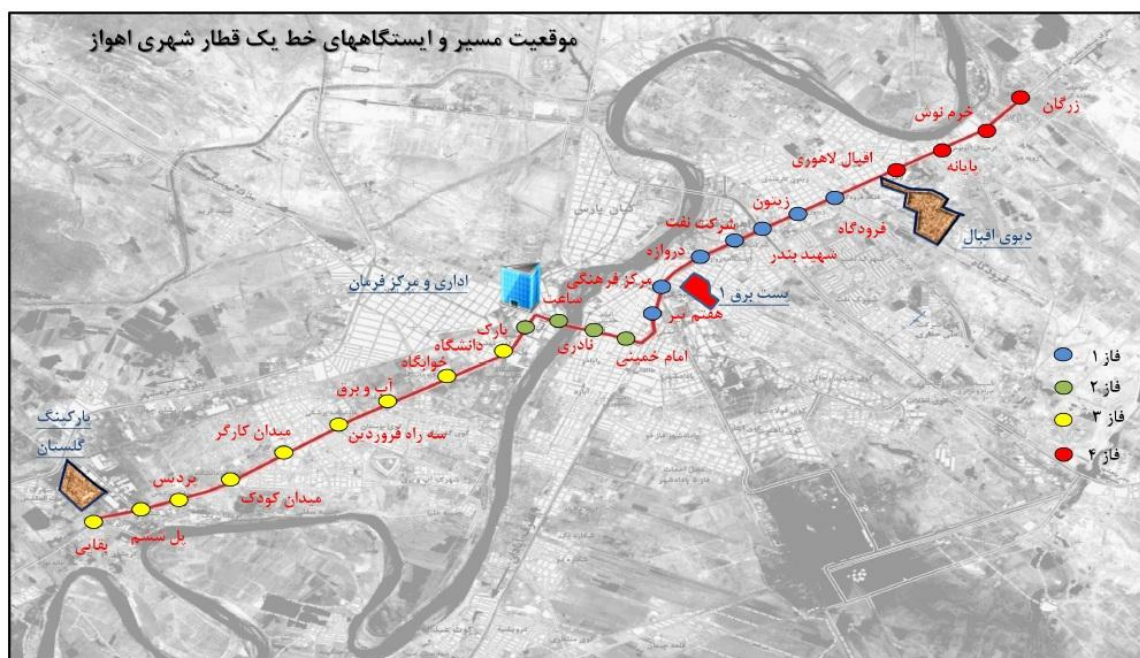


شکل ۴- تعریف مسأله (Shiau and Al-Assadi, 2020)

از دیگر پژوهشگرانی که در سال‌های اخیر از روش *FELA* در تحقیقات خود استفاده نموده‌اند، می‌توان به *D. Tran* و همکاران اشاره کرد که با استفاده از آنالیز حدی المان محدود دوبعدی تأثیر نیروهای زلزله را بر پایداری تونل‌های دایروی و مستطیلی در سال ۲۰۲۴ میلادی مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۷] همچنین *M. Khan* و همکاران در سال ۲۰۲۲ میلادی با استفاده از همین روش تأثیر نیروهای مختلف از جمله نیروهای ناشی از زلزله را بر پوشش بتنی تونلی به ضخامت ۳۵۰ میلی‌متر محاسبه کردند [۱۸]. *Y. Liu* و همکاران نیز با روشی مشابه با این روش در سال ۲۰۲۴ میلادی گسیختگی سنگ‌های اطراف تونل *Yaoxi* را تحلیل نمودند [۱۹].

### ۳- خط یک مترو اهواز

جمعیت موجود و پتانسیل افزایش آن ایده‌ی ایجاد قطار شهری را در شهر اهواز بوجود آورده‌است. خط یک قطار شهری اهواز به صورت یک سازه زیرزمینی با طول ۲۳ کیلومتر و از جنوب غربی به شمال شرقی شهر اهواز طراحی شده است. ۲۴ ایستگاه زیرزمینی در طول این خط قرار دارند که ایستگاه‌ها از بیمارستان شهید بقایی آغاز می‌شوند، از دانشگاه و مرکز شهر عبور می‌کنند، و به فرودگاه و در انتها به ایستگاه زرگان در شمال شرقی ختم می‌گردند. در چنین صف بندی، مسیر از زیر رودخانه کارون عبور می‌کند. نقشه مسیر خط یک مترو اهواز در شکل ۵ نشان داده شده است. محاسبات خط اول قطار شهری اهواز در ۴ فاز انجام می‌شود. پروژه قطار شهری اهواز شامل دو تونل موازی می‌باشد که توسط دو دستگاه *EPB* حفاری شده است. این دستگاه‌ها در بخشی از مسیر فاز ۲، از کرانه شرقی رودخانه کارون وارد عمق ۱۵ متری از بستر رودخانه شده و عرض ۳۰۰ متری رودخانه کارون را خواهند پیمود. در این پژوهش، این قسمت از مسیر خط یک مترو اهواز که حد فاصل بین ایستگاه ساعت و ایستگاه نادری می‌باشد، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته شده است (گزارش ژئوتکنیک خط ۱ قطار شهری اهواز، ۱۳۸۶).



شکل ۵- موقعیت مسیر و ایستگاههای خط یک قطار شهری اهواز (Arabzade B., 1386)

برای حفر تونل‌های دوقلوی قطار شهری اهواز دو دستگاه EPB با قطر کاترهد  $6/78$  متر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این دستگاه‌ها نیروی تراست  $37800$  کیلو نیوتنی توسط  $22$  جک تولید می‌شود. طول تقریبی سپر هر کدام از این دستگاه‌ها در حدود  $9/5$  متر می‌باشد. شکل ۶ دستگاه‌های EPB برای حفر تونل‌های قطار شهری اهواز را در کارخانه سازنده در حال تست نهایی نشان می‌دهد.

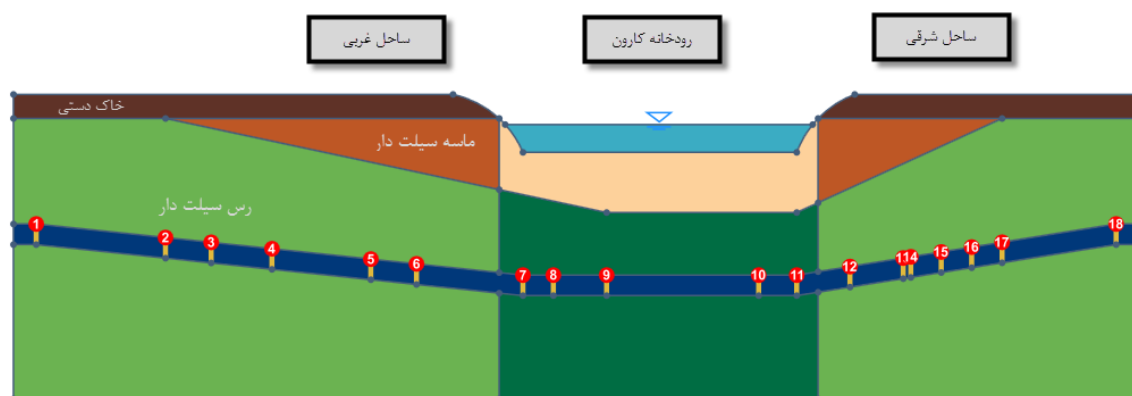


شکل ۶- دستگاه‌های EPB برای حفر تونل‌های قطار شهری اهواز در کارخانه سازنده (Arabzade B., 1386)

شرایط زمین‌شناسی در طول خط ۱ مترو اهواز به سه بخش مجزا تقسیم می‌شوند:

بخش ۱: بین ایستگاه زرگان و ایستگاه هفتم تیر، لایه‌های رس در زیر لایه انباشته‌های کواترنری (*Quaternary*) با ضخامت بالای ۱۰ متر قرار گرفته‌اند. در این ناحیه، سازند آغاچاری، یک سنگ بستر مناسب را برای احداث سازه‌های زیرزمینی ایجاد می‌کند. سطح آب زیرزمینی به لایه آبرفتی سطح بالا محدود می‌شود، که دلیلی برای نشت‌پذیری پایین و نرخ پایین جاری شدن آب در ایستگاه‌ها (جایی که عمل حفاری در حال پیشروی است) می‌باشد.

بخش ۲: بین ایستگاه هفتم تیر و میدان ساعت و در طول بخشی از خیابان نادری، زمین‌شناسی بسیار پیچیده‌ای در نزدیکی و مجاورت گسل وجود دارد، که شامل اجزاء خردشده و شکسته‌شده از سازند آغاچاری و رسوبات آبرفتی می‌باشند. مسیر تونل‌ها در این بخش، از مسیر زیر رودخانه عبور می‌کند و حداکثر شیب قابل قبول برای تونل‌ها در این ناحیه منظور شده است. پروفیل‌های زمین‌شناسی اولیه یک لایه به هم پیوسته رس را بین لایه‌های ماسه نشان می‌دهد. به دلیل فشار بالای آب که در زیر رودخانه قرار دارد، تونل در طول لایه رس طراحی شده است. سطح بالای آب زیرزمینی در نزدیکی رودخانه، در نظر گرفتن سیستم دیواره دیافراگمی را لازم می‌سازد. پروفیل زمین‌شناسی در زیر رودخانه کارون بر اساس درون‌یابی بین گمانه‌های حفر شده در بستر رودخانه، بدست می‌آید. با توجه به گزارشات موجود، پارامترهای فیزیکی و مکانیکی رس سیلت‌دار و ماسه سیلت‌دار در زیر رودخانه و اطراف آن متفاوت می‌باشد. شکل ۷ برشی از مسیر خط یک مترو اهواز که از زیر رودخانه کارون عبور می‌کند را نشان می‌دهد.



شکل ۷- بخشی از مسیر خط یک که از زیر رودخانه کارون عبور می‌کند

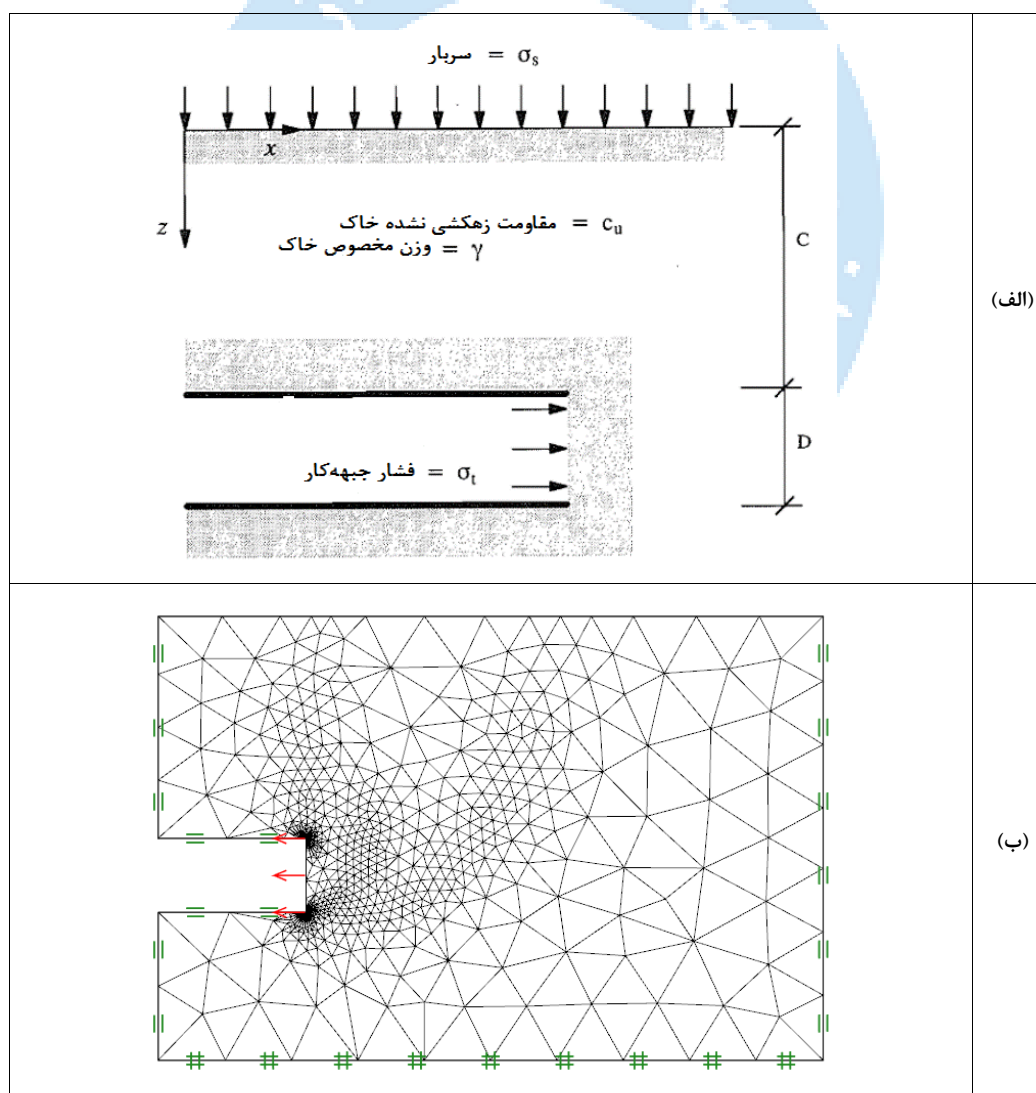
بخش ۳: بین ایستگاه میدان ساعت و ایستگاه جنوبی، تونل‌ها در خاک‌های یک‌دست ولی همراه با آب زیرزمینی قرار گرفته‌اند. بررسی‌ها در سر زمین، حضور انباشته‌های آبرفتی کواترنری عمیق را همراه با سطح آب زیرزمینی بالا نشان می‌دهند.

#### ۴- اعتبارسنجی

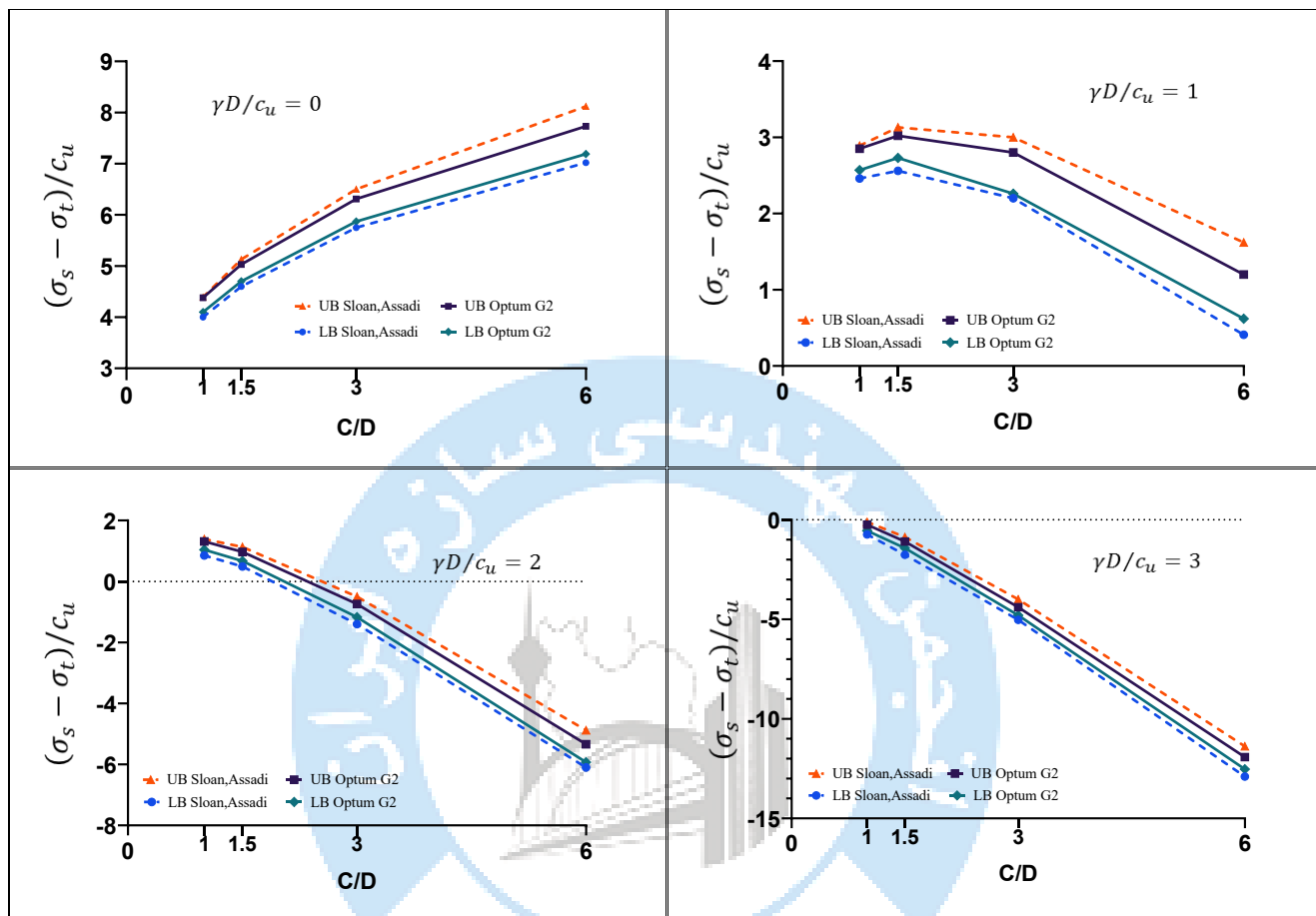
در این پژوهش، فشار پایداری جبهه‌کار با استفاده از نرم‌افزار *Optum G2* که از روش تحلیل حدی المان محدود بهره می‌برد، استفاده شده است. اسلوان و اسدی<sup>۴</sup> در سال ۱۹۹۴ که پایداری جبهه‌کار را برای خاک رس صرفاً چسبیده بررسی نموده و مدلسازی انجام شده توسط این محققین در شرایط کرنش صفحه‌ای (شکل ۸-الف) انجام شده است. با استفاده از نرم‌افزار *Optum G2* خاک مورد مطالعه این دو محقق مدلسازی گردید و نتایج بدست آمده، بمنظور اعتبارسنجی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نمونه‌ای از مش‌بندی استفاده شده در روش تحلیل حدی المان محدود، در شکل ۸-ب نشان داده شده است. قابل ذکر است که این مش‌بندی در سه مرحله به سازگارترین حالت تبدیل شده است که از مزیت‌های نرم‌افزار می‌باشد. همچنین همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، برای محاسبه دقیقتر در گوشه‌های سینه تونل، از مش پره استفاده شده است.

<sup>4</sup> Sloan and Assadi

اسلوان و اسدی کران بالا و کران پایین مورد نیاز جهت پایداری جبهه کار را در چهار حالت مختلف و در عمق  $C/D$  های متفاوت بررسی نمودند. نتایج بدست آمده توسط این دو محقق و نرم افزار، در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۸- الف) جبهه کار تحت شرایط کرنش صفحه‌ای (Sloan and Assadi, 1994) (ب) مش بندی استفاده شده برای بررسی پایداری جبهه کار در حالت  $C/D$  برابر سه

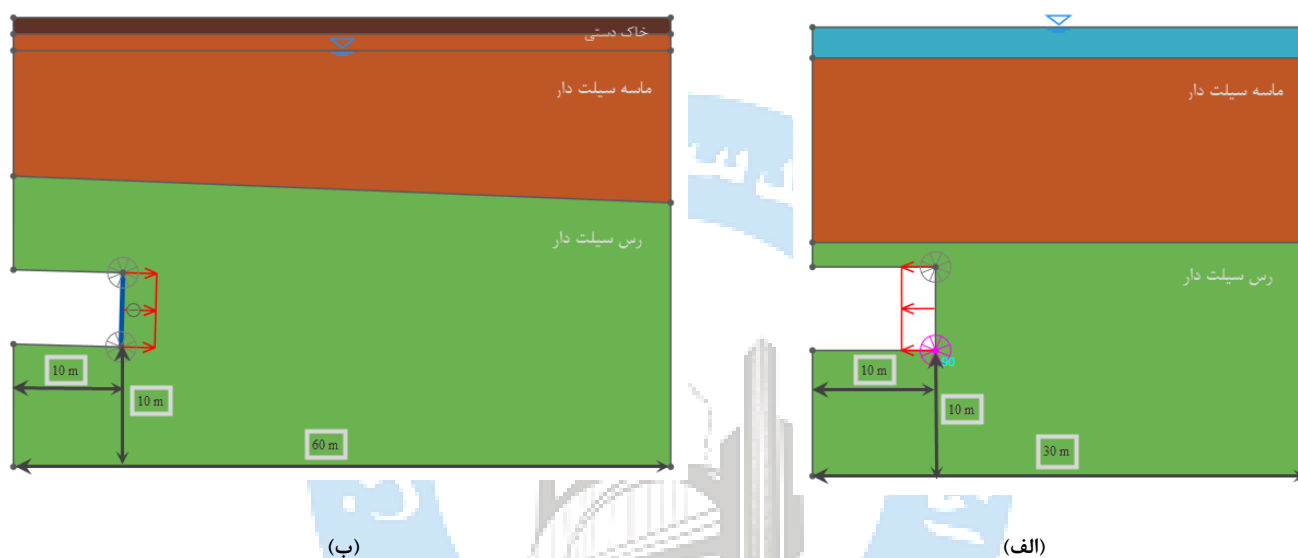


شکل ۹- کران بالا و کران پایین بدست آمده از نرم افزار *Optum G2* در مقایسه با مقادیر بدست آمده توسط *اسلوان و اسدی* (۱۹۹۴)

در آنالیز حدی، پایداری جبهه کار را با دو مقدار  $\gamma D/c_u$  و  $(\sigma_s - \sigma_t)/c_u$  که هر دو مقادیر بدون بعدی بوده که به ترتیب معرف بارگذاری ناشی از اثر گرانش ثقلی و سربار می‌باشند، بررسی می‌شوند. در روش آنالیز حدی هرچه اختلاف حدود بالا و حدود پایین کمتر باشد، نتایج بدست آمده از دقت بالاتری برخوردارند. همانطور که از نتایج نشان داده شده در شکل ۹ پیداست، مقادیر بدست آمده از نرم افزار *Optum G2* نه تنها با جواب‌های مقاله اسلوان و اسدی مطابقت دارد بلکه جواب‌های با دقت بیشتری نیز، ارائه می‌دهد. میانگین اختلاف بین کران بالا و پایین در مقاله اسلوان و اسدی به طور متوسط برابر ۴۶ درصد می‌باشد، در حالیکه نرم افزار *Optum G2* این اختلاف، برابر ۲۳ درصد می‌باشد. این خود نشان از دقت بالای نرم افزار در محاسبه کران بالا و پایین است، البته این اعداد می‌توانند از این نیز دقیق تر شوند اگر در هنگام تعریف مش در نرم افزار از مش بندی ریزتری استفاده کرد.

## ۵- نتایج تحلیل حدی المان محدود دوبعدی

فشار پایداری جبهه کار خط یک مترو اهواز در بخشی از مسیر که از زیر رودخانه کارون عبور می‌کند، در ۱۸ مقطع و در دو حالت مختلف گسیختگی، شامل بالازدگی و فروریزش، مورد بررسی قرار گرفت که این مقاطع در شکل ۷ نشان داده شده‌اند. در این بررسی، کران بالا و کران پایین فشار پایداری جبهه کار در هر مقطع محاسبه و در جدول ۱ آورده شده است. بمنظور مدلسازی مقاطع مختلف اشاره شده، نیاز به تعیین محدوده‌ای جهت آنالیز و مش‌بندی در نرم‌افزار داریم که با سعی و خطا این محدوده با توجه به شکل ۱۰ برای بررسی دو حالت فروریزش و بالازدگی انتخاب شده است. سپس با اعمال بار ضریب دار برابر واحد در جهت پیشروی دستگاه، فشار پایداری جبهه کار در حالت بالازدگی قابل بررسی می‌باشد و اگر این بار در خلاف جهت پیشروی دستگاه اعمال شود، حالت فروریزش مورد بررسی قرار می‌گیرد.



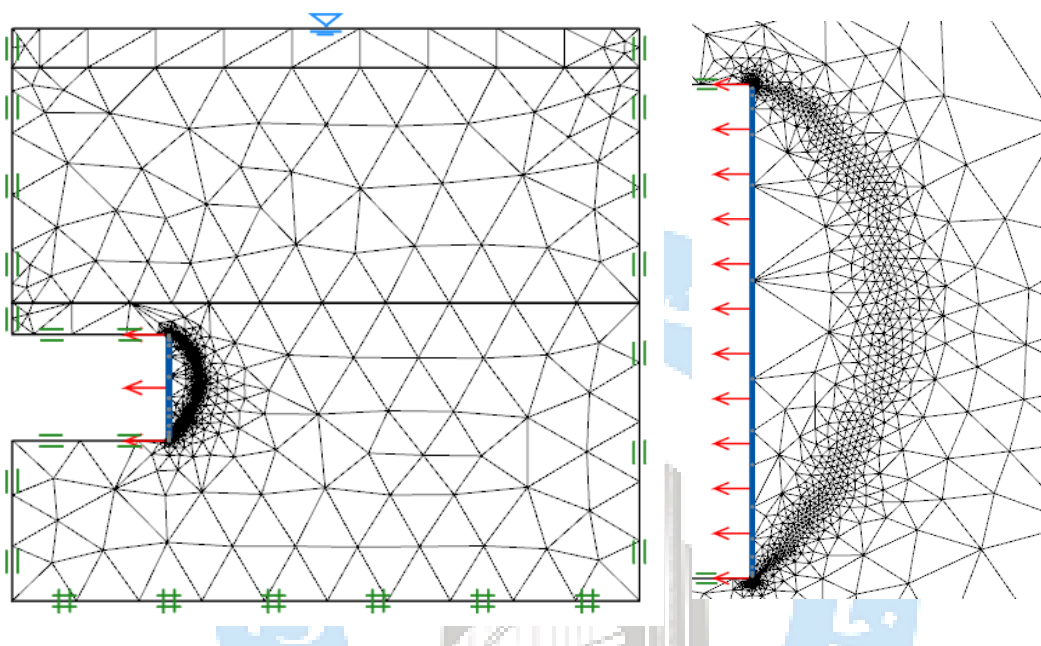
شکل ۱۰- محدوده انتخابی جهت مدلسازی  
الف) فروریزش ب) بالازدگی

مسیر دستگاه *EBP* از سمت ساحل غربی به طرف ساحل شرقی می‌باشد. در ابتدای مسیر این دستگاه با شیب منفی  $2/5$  درصد حفاری را انجام داده و در هنگام عبور از رودخانه بصورت افقی به حفاری ادامه می‌دهد. در انتها با شیب مثبت ۴ درصد حفاری کرده و بدین ترتیب از رودخانه کارون عبور می‌کند. در هنگام بررسی فشار پایداری توسط نرم‌افزار *Optum G2* با فعال کردن گزینه مش‌بندی انعطاف‌یافته<sup>۵</sup>، سازگارترین مش‌بندی جهت این بررسی در سه مرحله انتخاب شده است که نمونه‌ای از این مش‌بندی در بررسی فشار پایداری جبهه کار مقطع ۱۰ در دو حالت بالازدگی و فروریزش در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

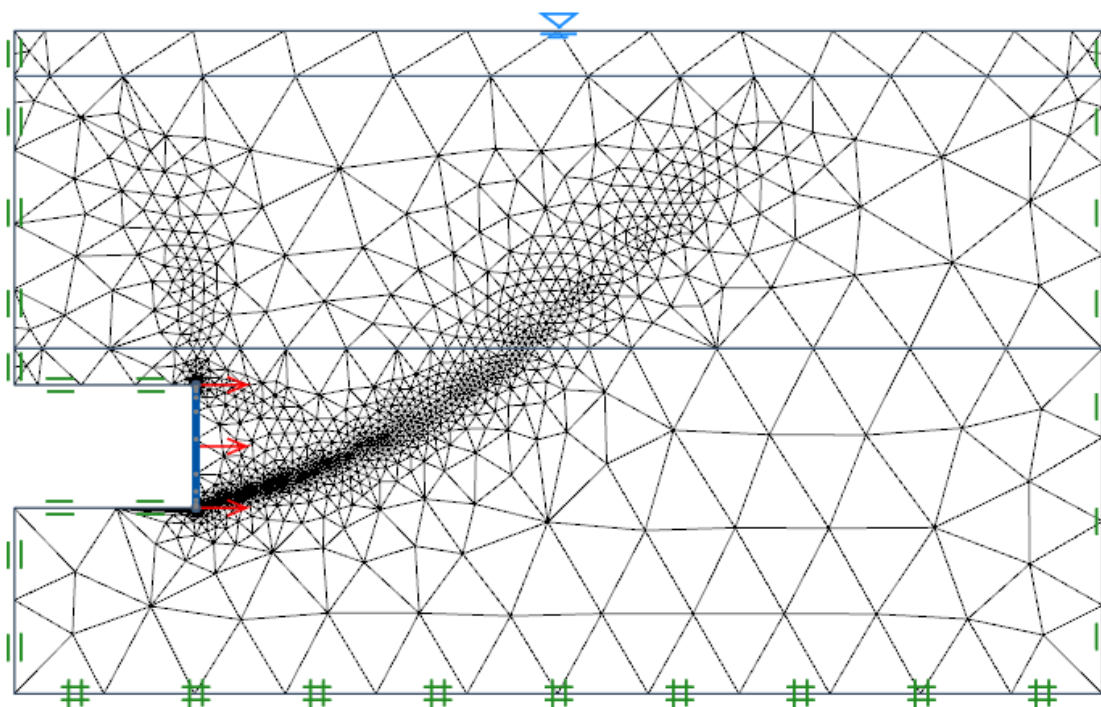
با توجه به جدول ۱ درصد اختلاف بین کران بالا و کران پایین محاسبه شده در هر مقطع بسیار ناچیز می‌باشد. این اختلاف ناچیز نشان‌دهنده دقت بالای روش تحلیل حدی المان محدود دوبعدی در محاسبه کران بالا و کران پایین فشار پایداری جبهه کار می‌باشد به نحوی که میانگین این کران‌ها را می‌توان برابر با جواب واقعی در نظر گرفت. لازم به ذکر است که با توجه به دوبعدی بودن مدلسازی، نمی‌توان از این نتایج با اطمینان در پروژه‌های عملی استفاده نمود زیرا که مقطع تونل در واقعیت بصورت دایره‌ای بوده و از طرف جداره‌ها

<sup>5</sup> Mesh Adaptivity

محدود می‌باشد، درحالی که در مدلسازی دوبعدی شرایط کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شده و فضای زیرزمینی انتخاب شده مانند یک تونل مستطیلی طولی می‌باشد. با این حال با توجه به شکل ۱۲، فشار پایداری جبهه کار محاسبه شده توسط این روش در مقایسه با فشار محاسبه شده توسط شرکت امبرگ<sup>۶</sup> [۲۱] که گسیختگی حالت فروریزش ملاک محاسبات بوده و با استفاده از روش‌های تحلیلی بدست آمده است، قابل قبول می‌باشد و در محدوده بین فشار بیشینه و کمینه قرار می‌گیرد. با این وجود استفاده از روش‌های سه‌بعدی که مدلسازی نزدیک به واقعیت دارند، بمنظور استفاده در پروژه‌های عملی پیشنهاد می‌شود.



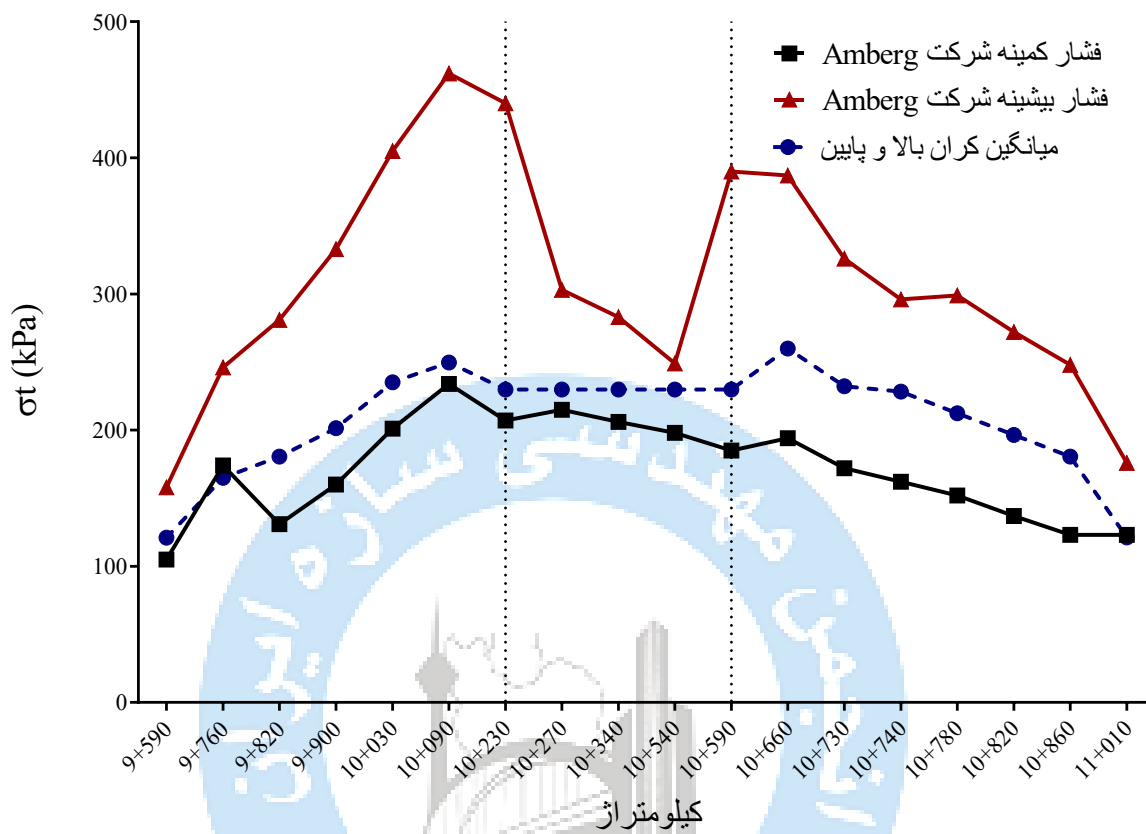
(الف)



(ب)

<sup>6</sup> Amberg

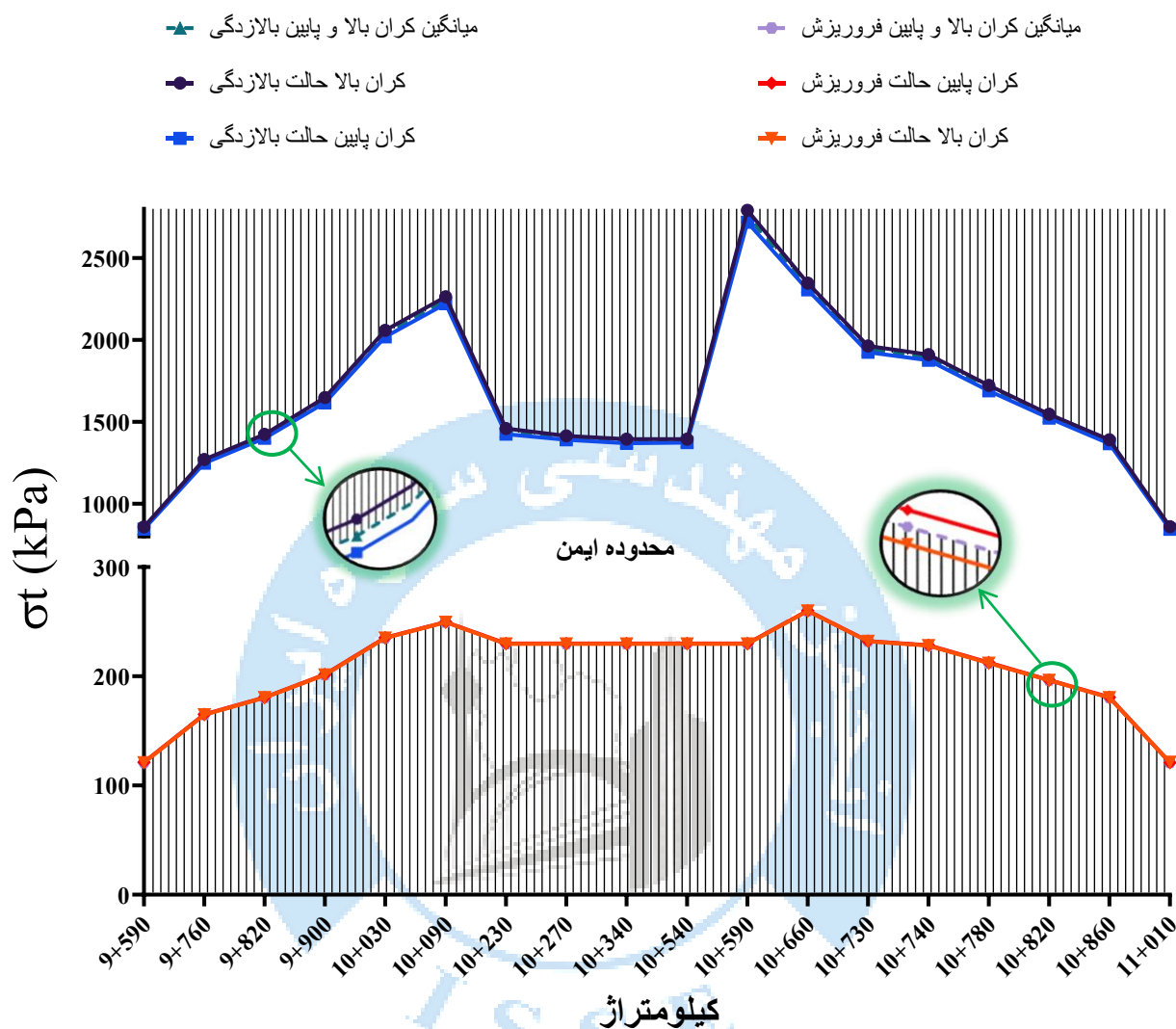
شکل ۱۱- مشربندی انعطاف یافته در مقطع ۱۰  
الف) فروریزش ب) بالازدگی



شکل ۱۲- فشار پایداری جبهه کار در حالت فروریزش

جدول ۱- فشار پایداری جبهه کار در مقاطع مختلف خط یک مترو اهواز

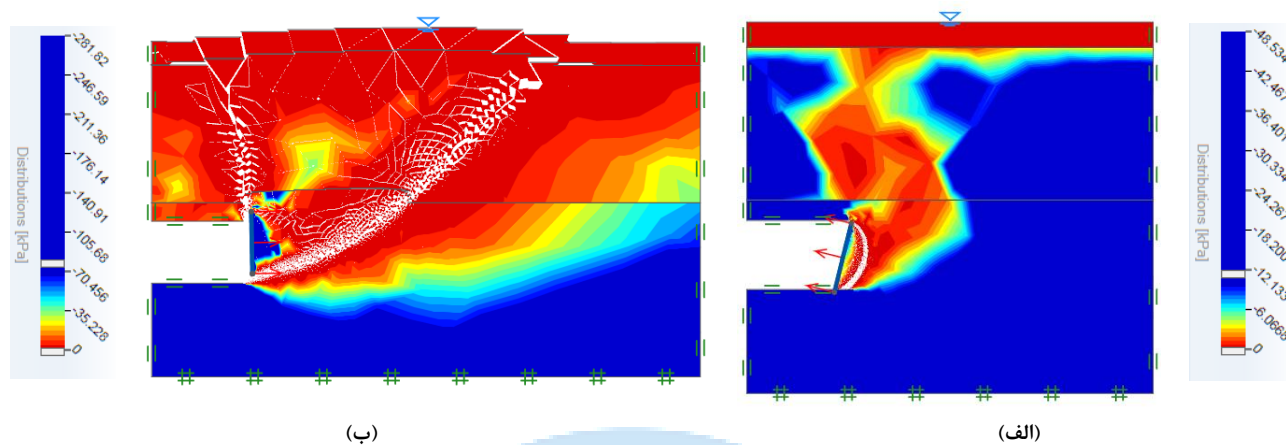
ردیف	فروریزش			بالازدگی			درصد اختلاف کران بالا و پایین
	کران پایین	کران بالا	میانگین کران‌ها	کران پایین	کران بالا	میانگین کران‌ها	
۱	۳۰/۱۲۱	۹۰/۱۲۰	۱۰/۱۲۱	۳۳/۰	۸۴۵	۸۵۹	۰/۸۵۲
۲	۱۰/۱۶۵	۷۰/۱۶۴	۹۰/۱۶۴	۲۴/۰	۱۲۴۸	۱۲۷۰	۰/۱۲۵۹
۳	۷۰/۱۸۰	۴۰/۱۸۰	۶۰/۱۸۰	۱۷/۰	۱۴۰۰	۱۴۲۴	۰/۱۴۱۲
۴	۶۰/۲۰۱	۲۰/۲۰۱	۴۰/۲۰۱	۲۰/۰	۱۶۱۷	۱۶۴۹	۰/۱۶۳۳
۵	۴۰/۲۳۵	۰/۲۳۵	۲۰/۲۳۵	۱۷/۰	۲۰۱۹	۲۰۵۸	۵/۲۰۳۸
۶	۷۰/۲۴۹	۶۰/۲۴۹	۷۰/۲۴۹	۰/۴/۰	۲۲۲۱	۲۲۶۴	۵/۲۲۴۲
۷	۰/۲۳۰	۷۰/۲۲۹	۹۰/۲۲۹	۱۳/۰	۱۴۲۵	۱۴۶۰	۵/۱۴۴۲
۸	۰/۲۳۰	۷۰/۲۲۹	۹۰/۲۲۹	۱۳/۰	۱۳۹۰	۱۴۱۵	۵/۱۴۰۲
۹	۰/۲۳۰	۷۰/۲۲۹	۹۰/۲۲۹	۱۳/۰	۱۳۷۰	۱۳۹۴	۰/۱۳۸۲
۱۰	۰/۲۳۰	۷۰/۲۲۹	۹۰/۲۲۹	۱۳/۰	۱۳۷۳	۱۳۹۵	۰/۱۳۸۴
۱۱	۰/۲۳۰	۶۰/۲۲۹	۸۰/۲۲۹	۱۷/۰	۲۷۱۸	۲۷۹۲	۰/۲۷۵۵
۱۲	۱۰/۲۶۰	۹۰/۲۵۹	۰/۲۶۰	۰/۸/۰	۲۳۰۶	۲۳۴۷	۵/۲۳۲۶
۱۳	۳۰/۲۳۲	۰/۲۳۲	۲۰/۲۳۲	۱۳/۰	۱۹۲۵	۱۹۶۳	۰/۱۹۴۴
۱۴	۴۰/۲۲۸	۱۰/۲۲۸	۳۰/۲۲۸	۱۳/۰	۱۸۷۶	۱۹۱۰	۰/۱۸۹۳
۱۵	۵۰/۲۱۲	۱۰/۲۱۲	۳۰/۲۱۲	۱۹/۰	۱۶۹۰	۱۷۲۳	۵/۱۷۰۶
۱۶	۶۰/۱۹۶	۳۰/۱۹۶	۵۰/۱۹۶	۱۵/۰	۱۵۲۳	۱۵۴۷	۰/۱۵۳۵
۱۷	۸۰/۱۸۰	۴۰/۱۸۰	۶۰/۱۸۰	۲۲/۰	۱۳۶۷	۱۳۹۰	۵/۱۳۷۸
۱۸	۰/۱۲۱	۳۰/۱۲۱	۲۰/۱۲۱	۲۵/۰	۸۴۴	۸۶۰	۰/۸۵۲
میانگین	-	-	-	۱۷/۰	-	-	-



شکل ۱۳- محدوده ایمن برای انتخاب فشار پایداری جبهه کار

تغییرات ناگهانی فشار پایداری جبهه کار نسبت به مکان مشاهده شده در شکل ۱۳، ناشی از تغییر در شیب حرکت دستگاه حفاری و در نتیجه افزایش و کاهش عمق قرارگیری تونل می‌باشد. محدوده میانی در این شکل، نشان دهنده فشار پایداری جبهه کار دستگاه در زیر رودخانه می‌باشد (کیلومتر از ۱۰+۲۳۰ تا ۱۰+۵۴۰). علت کاهش فشار پایداری در این محدوده به دلیل اختلاف تراز روباره می‌باشد، یعنی مطابق شکل ۷، ارتفاع روباره در قسمت رودخانه نسبت به اطراف کمتر بوده و آب رودخانه با عمق کمتر در این محدوده موجود می‌باشد. قابل ذکر است که در بررسی فشار پایداری جبهه کار در حالت فروریزش، فشار لازم جهت جلوگیری از ریزش توده خاک به داخل جبهه کار مورد بررسی قرار می‌گیرد و در حالت بالازدگی فشار لازم جهت به حرکت درآوردن توده خاک به سمت پیشروی دستگاه بررسی می‌شود. با افزایش عمق قرارگیری تونل، فشار آب حفره‌ای افزایش یافته و به همین دلیل به فشار بیشتری برای پایداری جبهه کار در مقابل ریزش نیاز است. اما فشار لازم برای بالازدگی توده خاک اطراف جبهه کار، علاوه بر فشار آب حفره‌ای به حجم توده خاک تحت تأثیر این فشار نیز وابسته است. چرا که کاهش حجم توده خاک در محدوده زیر رودخانه اثر قابل توجه‌تری بر فشار پایداری جبهه کار نسبت به حالت

فروریزش می‌گزارد. شکل ۱۴ محدوده خاک تحت تأثیر فشار پایداری جبهه‌کار را در کیلومتر ۱۰+۵۴۰ برای دو حالت فروریزش و بالازدگی نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- توده خاک تحت تأثیر فشار پایداری جبهه‌کار  
(الف) فروریزش (ب) بالازدگی

همانطور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، کران بالا و پایین فشار جبهه‌کار محاسبه شده که مانع بالازدگی می‌شود بسیار بیشتر از فشار پایداری جبهه‌کار در مقابل گسیختگی می‌باشد. این بدین معناست که با اعمال فشار محاسبه شده در حالت بالازدگی توسط دستگاه به توده خاک، می‌توان از وقوع این پدیده جلوگیری کرد و اگر از این مقدار بیشتر فشار اعمال شود، بالازدگی در سطح زمین رخ می‌دهد. اما اعمال فشار کمتر در صورتی که مانع گسیختگی ناشی از فروریزش شود نیز از بالازدگی جلوگیری می‌کند. به همین منظور در پروژه‌های عملی انتخاب فشار نزدیک به فشار حداقل در نظر گرفته می‌شود. این انتخاب از نظر اقتصادی نیز به صرفه‌تر است زیرا که نیروی لازم جهت حفاری توسط دستگاه EPB، کاهش چشمگیری خواهد داشت. بمنظور درک بهتر، شکل ۱۳ محدوده ایمن انتخاب فشار پایداری جبهه‌کار را نشان می‌دهد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش تحلیل حدی المان محدود دوبعدی، فشار پایداری جبهه‌کار تونل خط یک مترو اهواز محاسبه شده است. فشار پایداری برای دو حالت گسیختگی شامل فروریزش و بالازدگی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

۱- روش تحلیل حدی المان محدود قابلیت محاسبه فشار پایداری جبهه‌کار با دقت بالایی را دارد به نحوی که درصد اختلاف کران بالا و کران پایین به طور متوسط برای حالت فروریزش برابر 0/17 درصد و برای حالت بالازدگی برابر 1/87 درصد حاصل شد که بسیار ناچیز است.

۲- رابطه مستقیم بین فشار پایداری جبهه‌کار و عمق قرارگیری تونل برقرار است بنحوی که با افزایش عمق قرارگیری تونل، فشار پایداری جبهه‌کار افزایش یافته است و با کاهش آن، فشار پایداری جبهه‌کار کاهش یافته است.

۳- زاویه حفاری دستگاه بر فشار پایداری جبهه‌کار تأثیرگذار بوده و هرچه دستگاه نسبت به افق با زاویه منفی حفاری کند فشار پایداری، افزایش می‌یابد و شیب مثبت دستگاه باعث کاهش فشار پایداری جبهه‌کار می‌شود.

۴- مدلسازی دوبعدی استفاده شده در این تحقیق در واقعیت نشان‌دهنده یک تونل با مقطع مستطیلی که دارای بعد عمود بر صفحه بسیار طویل است، می‌باشد. بنابراین با مقطع اصلی تونل که دایروی می‌باشد متفاوت است قابل ذکر است که مدلسازی

دوبعدی مقطع تونل نسبت بحالت واقعی، حالت بحرانی تری را شبیه سازی نموده و به عبارت دیگر جواب حاصله محافظه کارانه خواهد بود و می توان از آن ها به عنوان تخمین اولیه فشار پایداری جبهه کار استفاده کرد. در ضمن مقایسات صورت گرفته با گزارشات شرکت امبرگ نیز مطلوب بودن این تخمین اولیه را تایید میکند.

۵- استفاده روش تحلیل حدی المان محدود دوبعدی برای بررسی انواع شرایط زمین از جمله زمین متشکل از چندین لایه خاک و پارامترهای متفاوت و شیب متغیر در لایه بندی خاک و همچنین خاک های اشباع و غیر اشباع، امکان پذیر می باشد.

از جمله پیشنهادهایی که می توان برای مطالعات آتی به آن اشاره کرد:

۱- بررسی فشار پایداری جبهه کار تونل با استفاده از روش تحلیل حدی المان محدود با مدلسازی سه بعدی

۲- تفاوت فشار پایداری جبهه کار تونل با مقاطع دایروی و مستطیلی

۳- تاثیر عمق قرارگیری دستگاه حفاری در فشار پایداری جبهه کار در خاک های غیر اشباع و اشباع

## ۷- مراجع

- [1] A. Koohsari, R. Kalatehjari, S. Moosazadeh, M. Hajihassani, and M. Tarafra, "Measurement and enhancing prediction of EPBM torque using actual Machine data," *Measurement*, vol. 223, p. 113780, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2023.113780.
- [2] R. HILL, "A VARIATIONAL PRINCIPLE OF MAXIMUM PLASTIC WORK IN CLASSICAL PLASTICITY," *Q. J. Mech. Appl. Math.*, vol. 1, no. 1, pp. 18–28, Jan. 1948, doi: 10.1093/qjmam/1.1.18.
- [3] D. C. Drucker, W. Prager, and H. J. Greenberg, "Extended limit design theorems for continuous media," *Q. Appl. Math.*, vol. 9, no. 4, pp. 381–389, 1952, doi: 10.1090/qam/45573.
- [4] N. Khezri, H. Mohamad, M. HajiHassani, and B. Fatahi, "The stability of shallow circular tunnels in soil considering variations in cohesion with depth," *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 49, pp. 230–240, Jun. 2015, doi: 10.1016/J.TUST.2015.04.014.
- [5] J. H. Atkinson and D. M. Potts, "Subsidence above Shallow Tunnels in Soft Ground," *J. Geotech. Eng. Div.*, vol. 103, no. 4, pp. 307–325, Apr. 1977, doi: 10.1061/AJGEB6.0000402.
- [6] E. H. Davis, M. J. Gunn, R. J. Mair, and H. N. Seneviratne, "The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material," *geotechnique*, vol. 30, no. 4, pp. 397–416, 1980.
- [7] E. Leca and L. Dormieux, "Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material," *Géotechnique*, vol. 40, no. 4, pp. 581–606, 1990.
- [8] E. Leca and M. Panet, "Application du calcul à la rupture à la stabilité du front de taille d'un tunnel," *Rev. française géotechnique*, no. 43, pp. 5–19, 1988.
- [9] C. Carranza-Torres, "Computation of factor of safety for shallow tunnels using Caquot's lower bound solution," *Turin Geod.*, 2004.
- [10] A. I. Caquot and J. Kerisel, "Traité de mécanique des sols," (*No Title*), 1956.
- [11] G. Mollon, D. Dias, and A.-H. Soubra, "Face Stability Analysis of Circular Tunnels Driven by a Pressurized Shield," *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 136, no. 1, pp. 215–229, Jul. 2009, doi: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000194.

- [12] X. W. Tang, W. Liu, B. Albers, and S. Savidis, "Upper bound analysis of tunnel face stability in layered soils," *Acta Geotech.*, vol. 9, no. 4, pp. 661–671, Jul. 2014, doi: 10.1007/S11440-013-0256-1/METRICS.
- [13] S. W. Sloan, "Lower bound limit analysis using finite elements and linear programming," *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, vol. 12, no. 1, pp. 61–77, 1988, doi: 10.1002/nag.1610120105.
- [14] S. W. Sloan, "Upper Bound Limit Analysis Using Finite," *Int. J. Numer. Anal. ...*, vol. 13, no. November 1987, pp. 263–282, 1989, [Online]. Available: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/nag.1610130304/full>
- [15] S. W. Sloan and A. Assadi, "Undrained stability of a plane strain heading," *Can. Geotech. J.*, vol. 31, no. 3, pp. 443–450, 1994, doi: 10.1139/t94-051.
- [16] J. Shiau and F. Al-Asadi, "Three-Dimensional Heading Stability of Twin Circular Tunnels," *Geotech. Geol. Eng.*, vol. 38, no. 3, pp. 2973–2988, 2020, doi: 10.1007/s10706-020-01201-z.
- [17] D. T. Tran, D. R. Kumar, S. Keawsawasvong, W. Wipulanusat, and P. Jamsawang, "Innovative approaches for predicting seismic stability of circular and rectangular tunnels in cohesive-frictional soils using machine learning and finite element limit analysis," *Model. Earth Syst. Environ.*, Aug. 2024, doi: 10.1007/S40808-024-02080-6.
- [18] M. A. Khan, M. R. Sadique, I. H. Harahap, M. Zaid, and M. M. Alam, "Static and Dynamic Analysis of the Shielded Tunnel in Alluvium Soil with 2D FEM Model," *Transp. Infrastruct. Geotechnol.*, vol. 9, no. 1, pp. 73–100, Feb. 2022, doi: 10.1007/S40515-021-00160-Z.
- [19] Y. Liu, Z. F. Wang, Y. Q. Wang, and X. L. Hou, "Investigation on the failure mechanism for surrounding rock in small interval tunnels using finite element limit analysis method," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 164, 2024, doi: 10.1016/j.engfailanal.2024.108719.
- [21] "Ahwaz urban railway project, line 1," 2015.