

# تعیین منحنی تنش محصورکننده-بیرون زدگی جبهه کار تونل با استفاده از مدل های عددی

حسن قاسم زاده<sup>۱\*</sup>، هانیه قائمی<sup>۲</sup>

۱- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

\*ghasemzadeh@kntu.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۸/۴/۱۵]

تاریخ دریافت: [۹۷/۱۲/۱]

## چکیده

کاهش تدریجی تنش از روی سینه کار تونل به هنگام حفاری، منجر به ایجاد تغییرشکل هایی در زمین دربردارنده آن می شود. بیرون زدگی<sup>۱</sup> سینه کار اولین مولفه پاسخ تغییرشکلی محیط به حفاری است. این پدیده به مقاومت و خواص تغییرشکلی هسته ی پیش روی و همچنین میدان تنش اصلی که تونل در معرض آن قرار گرفته و میزان قوس زدگی بستگی دارد و روی سطح سینه کار و در امتداد محور طولی تونل نمود پیدا می کند. در پژوهش پیش رو به کمک مدل سازی سه بعدی قسمتی از تونل متروی خط ۷ تهران، رابطه ی بین تنش محصورکننده سینه کار تونل و مقادیر بیرون زدگی آن بررسی شده و نتایج در قالب منحنی تنش محصورکننده-بیرون زدگی یا "منحنی مشخصه ی تونل" ترسیم شده است. در ادامه منحنی مشخصه تحت محورهایی به شکل بدون بعد ترسیم شده و مشاهده شد، که این منحنی های بدون بعد، با رعایت شرایط خاصی برای تونل های مختلف روی هم قرار می گیرند. شرایط لازم برای روی هم قرار گرفتن منحنی ها نیز در انتها آورده شده است.

**واژگان کلیدی:** بیرون زدگی سینه کار تونل، منحنی مشخصه، حفاری تونل، تنش محصورکننده، مدل سازی عددی، رفتار الاستوپلاستیک.

## ۱- مقدمه، ادبیات موضوع

به هنگام حفاری تونل میدان تنش اطراف قسمت حفاری شده تغییر کرده و سه حالت مختلف ممکن است رخ دهد. چنانچه تنش های ایجاد شده در اطراف سینه کار در محدوده ی الاستیک باشد، سینه کار با یک تغییرشکل کاملاً جزئی و محدود، پایدار باقی می ماند. در این موارد، انتقال تنش ها به اطراف حفره (اثر قوسی<sup>۲</sup>)، به صورت طبیعی صورت می پذیرد.

در صورتی که کاهش تصاعدی تنش سینه کار، موجب تولید تنش در محدوده الاستوپلاستیک در توده خاک اطراف آن شود، تغییر شکل سینه کار به صورت الاستوپلاستیک و به سمت داخل حفره ی تونل (بیرون زدگی سینه کار) خواهد بود. در این حالت شرایط پایدار در کوتاه مدت وجود دارد و در بلند مدت ممکن است ناپایداری رخ دهد.

1 Extrusion  
2 Arch effect

زمین، عمق مدفون تونل و پوششی که به محیط تونل و تکیه‌گاه تونل اعمال می‌شود بستگی دارد [3].

یکی از راه‌های کاهش بیرون زدگی، مسلح نمودن هسته‌ی پیش‌روی است. در سال ۲۰۱۶ میلادی، کیتچاه<sup>۵</sup> به بررسی تاثیر تسلیح سینه‌کار تونل تولون<sup>۶</sup> در فرانسه با استفاده از الیاف شیشه در کنترل تغییر شکل‌های آن پرداخته است [4]. پروژه او بر رفتار تونل‌های سطحی تمرکز داشته و اندازه‌گیری‌های برجای زیادی را در مورد تونل تولون انجام داده است. وی با استفاده از جابه‌جایی سنج و شیب سنج به اندازه‌گیری نشست‌های سطحی در حین عبور مقطع تونل و جابه‌جایی‌های سینه‌کار در حین حفاری پرداخته و نتایج به دست آمده را با مدل‌های دو و سه بعدی تونل، ساخته شده با نرم افزار تفاضل محدود FLAC مقایسه کرده است. طبق مطالعات او، مدل دوبعدی و سه بعدی با نتایج برجا هماهنگی خوبی داشته و تاثیر مسلح‌سازی با الیاف شیشه را به خوبی نشان می‌دهند.

به تازگی و با همکاری دانشگاه پلی تکنیک میلان، یک سری مطالعات آزمایشگاهی با ساخت نمونه کوچک مقیاس از یک تونل، با هدف توسعه روندی ساده اما قابل تعمیم برای مسائل ساخت و ساز زیرزمینی صورت گرفته است [5]. در این مطالعات منحنی مشخصه تونل یعنی رابطه‌ی تنش محصور کننده- بیرون زدگی سینه‌کار در حین حفاری، برای حالت‌های سینه‌کار الاستیک و الاستوپلاستیک مطابق شکل (۱) ترسیم شده است. آن‌ها پیشنهاد نمودند چنانچه این منحنی به گونه‌ای بی بعد شود که مستقل از مقادیر بیرون زدگی باقیمانده الاستیک ( $u_{r,e}$ ) و شرایط تنش اولیه ( $\sigma_0$ ) باشند، منحنی واحدی به دست می‌آید که آن را "منحنی مادر" نامیدند. پریسکو و لوناردی در سال ۲۰۱۷ درباره این منحنی، پارامتر همگنی خاک را مهم‌ترین پارامتر موثر در منحنی مادر دانسته‌اند. سایر پارامترها طول منحنی‌ها را تغییر داده اما همگنی خاک که با پارامتر "ضریب همگنی" معرفی شده بود، به طرز چشم‌گیری شکل منحنی را تغییر داده است [6].

در پژوهش پیش‌رو، با مدل‌سازی سه بعدی مراحل اجرایی

بدان معنی که در صورت عدم پایدارسازی، وضعیت خمیری به صورت شعاعی و طولی نسبت به دیواره‌ی فضای حفر شده گسترش خواهد یافت و رفته رفته منجر به دورتر شدن اثر قوسی از دیواره‌ها و انتقال آن به عمق تونل می‌شود. در حالت سوم اگر کاهش تصاعدی فشار محصورکننده سینه‌کار موجب تولید تنشی در محدوده‌ی شکست در زمین مقابل آن شود، در این صورت میزان تغییر شکل غیر قابل قبول بوده و یک وضعیت ناپایدار بر زمین پیش‌روی سینه‌کار حاکم می‌شود. در این حالت (اغلب در زمین‌های شل و فاقد چسبندگی) شکل‌گیری اثر قوسی ممکن نیست و این پدیده به صورت طبیعی رخ نمی‌دهد، پس باید آن را به شکل مصنوعی تولید کرد [1].

تاکنون مطالعات متعددی برای کنترل تغییر شکل سینه‌کار تونل و مشاهده‌ی رفتار مجموعه‌ی هسته-سینه‌کار صورت گرفته است. پژوهشگران مختلفی به بررسی پدیده‌ی بیرون زدگی سینه‌کار با استفاده از مدل‌های دو و سه بعدی، مدل‌سازی سانتریفیوژ و مدل‌های آزمایشگاهی پرداخته‌اند. در گذشته، اندازه‌گیری بیرون زدگی بیشتر برای کنترل پایداری سینه‌کار انجام می‌شد. امروزه علاوه بر آن، میزان همگرایی حفره نیز از روی میزان بیرون زدگی‌ها قابل تخمین و پیش بینی است. برای نمونه در تونل پیانورو<sup>۱</sup>، لوناردی<sup>۲</sup> و گاتی<sup>۳</sup> در سال ۲۰۱۰ ارتباط میان بیرون زدگی سینه‌کار و همگرایی حفره با میزان سربار را نشان داده‌اند [2].

در سال ۲۰۱۱، کانتینی<sup>۴</sup> و همکاران، طی مطالعات خود روی تغییر شکل جبهه کار تونل، سازوکار ایجاد بیرون زدگی در سینه‌کار را بدین صورت توضیح دادند که به هنگام حفاری، مقاومت شعاعی هسته‌ی زمین مقابل سینه‌کار به تدریج کاهش یافته و در نتیجه هسته بخاطر تنش شعاعی وارد شده از طرف زمین، تغییر شکل می‌دهد. در زمین نرم، هسته‌ی پیش‌روی، تحت این فشارهای شعاعی تسلیم شده و به سمت درون حفره بیرون می‌آید. مقدار این بیرون زدگی به مشخصات مکانیکی

1 Pianoro

2 Pietro Lunardi

3 Gatti

4 Cantieni

5 Fethi Kitchah

6 Tolon tunnel

الاستوپلاستیک تونل‌ها به صورت پارامترهای (  $N^* \cdot \frac{u_f}{u_{r,el}}$  ) و (  $N^* \cdot (1 - \frac{\sigma_f}{\sigma_0})$  ) برای محورهای افقی و قائم بدون بعد شوند، منحنی به صورت شکل (۲) درمی‌آید. با وجود تنوع زیادی که برای پارامترهای ژئوتکنیکی و هندسی تونل در نظر گرفته شده بود، آنها ادعا نمودند که همه منحنی مشخصه‌های بی بعد شده، با رعایت شرایط ذیل به یک منحنی واحد تبدیل می‌شوند [5].

- تونل عمیق باشد ( $d/D > 5$ )
- خاک به صورت یکنواخت (همگن) با رفتار الاستوپلاستیک کامل بوده و وزن مخصوص اشباع خاک در نظر گرفته شود.
- شرایط به صورت زهکشی نشده (تنش‌های کل) در نظر گرفته شده باشد.
- معیار گسیختگی برای خاک، معیار ترسکا است.
- قانون جریان وابسته رخ دهد.
- پوشش کاملاً صلب و بسیار سخت تر از خاک بوده و در تمام طول حفاری دقیقاً در محل سینه‌کار تمام شود.
- پارامترهای این منحنی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$\sigma_f$ : تنش افقی محصور کننده سینه کار<sup>۴</sup>

$\sigma_0$ : تنش متوسط اولیه (برجا) در محیط روی سینه کار<sup>۵</sup>

$u_f$ : کار الاستوپلاستیک<sup>۶</sup> زدگی بیشینه در سینه‌بیرون

$u_{r,el}$ : الاستیک سینه کار تونل<sup>۷</sup> زدگی باقیمانده‌بیرون

$$N^* = k_0^a \cdot N \quad (1)$$

$$N = \frac{\gamma d + q}{c_u} \quad (2)$$

$$a = 0.82$$

در ادامه شرایط ژئوتکنیکی محیط و مشخصات هندسی تونل مدل‌سازی شده در این پژوهش برای یافتن رابطه‌ی تنش محصورکننده-بیرون‌زدگی سینه‌کار و پژوهش در مورد منحنی مشخصه بی‌بعد تونل، تشریح می‌شود.

تونل متروی خط ۷ تهران، مطالعه‌ی نسبتاً جامعی در خصوص منحنی مشخصه‌ی تونل صورت پذیرفته است. بدین منظور برای تونل مورد مدل‌سازی، شرایط ژئوتکنیکی و هندسی متفاوتی در نظر گرفته شده و هربار منحنی مشخصه‌ی آن ترسیم شده است و در پایان شرایط لازم برای یکتایی این منحنی معرفی شده است.

## ۲- جزئیات منحنی مشخصه

در همایش<sup>۱</sup> ITUA در سال ۲۰۱۵ میلادی، پترو لوناردی نتایج یک مدل فیزیکی از فرایند حفاری تونل را ارائه نمود. [5]. در این مطالعات برای درک بهتر رفتار مدل فیزیکی، تحلیل‌های عددی به روش المان محدود برای تونل مورد مطالعه و به کمک مدل‌سازی سه بعدی با کد MIDAS GTS NX، انجام گرفته است. روند مدل‌سازی شامل قرار دادن مدل تحت تنش‌های اولیه ناشی از نیروی وزن، برداشتن گام به گام تنش افقی از روی سینه‌کار تونل و مشاهده بیرون‌زدگی سینه‌کار در هر گام است. با ترسیم تغییرات تنش محصورکننده<sup>۲</sup> در مقابل بیرون‌زدگی<sup>۳</sup> ( $\sigma_f - u_f$ )، برای سینه‌کار، منحنی مشخصه به صورت شکل (۱) به دست آمده است.

شکل ۱. منحنی مشخصه تونل برای سینه‌کار الاستیک و الاستو-پلاستیک

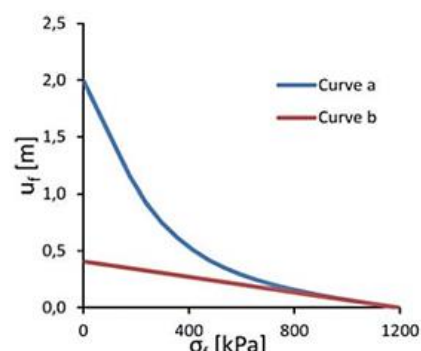


Fig. 1. Characteristic curve for elastic and elasto-plastic tunnel face

طبق این مطالعات، اگر منحنی مشخصه سینه‌کار

4 Horizontal confinement pressure onto the face

5 Initial stress state in the ground onto the face

6 Maximum face extrusive displacement

7 Medium elastic residual extrusive displacement

1 International Tunneling and Underground Space Association

2  $\sigma$  face

3  $u$  face

شکل ۳. محدوده انتخابی از مترو خط ۷ تهران برای مدل سازی تونل

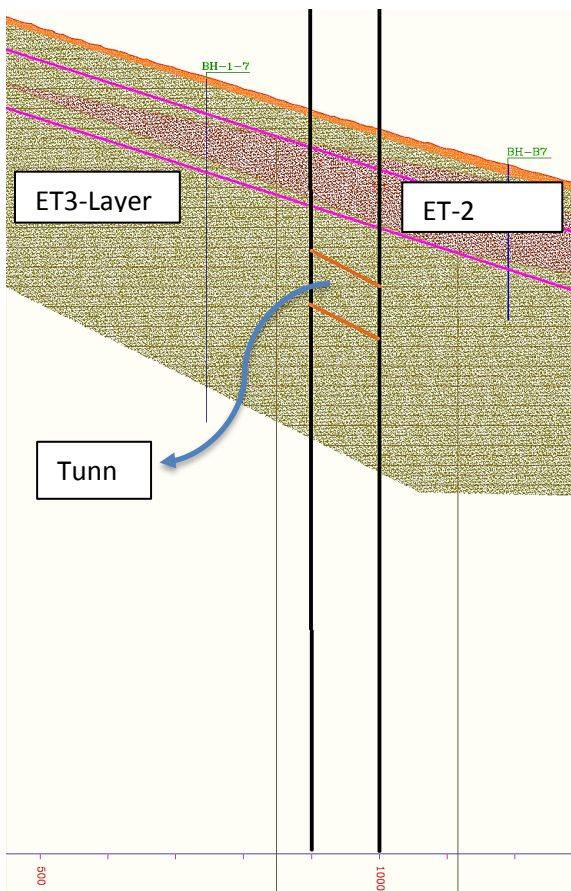


Fig. 3. The range of tehran subway line 7 for modelling

جدول ۱. اطلاعات ژئوتکنیکی خاک های مسیر تونل

Layer	C' (kg/cm <sup>2</sup> )	φ' (degree)	C <sub>cu</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )		φ <sub>cu</sub> (degree)		E (kg/cm <sup>2</sup> )	ν	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
			Recommended Value	Applicable range	Recommended Value	Applicable range			
ET-2	0.11	32	0.13	0.22	28	30	600	0.3	1.84
	0.15	34	0.18	0.13	29	28	750	0.3	1.84
ET-3	0.24	28	0.32	0.48	22	27	350	0.32	1.90
	0.30	38	0.4	0.32	23	27	450	0.32	1.90

Table 1. Geotechnical properties of tunnel soil [7]

۳-۲- هندسه تونل

تونل مورد مطالعه از نوع دایره ای شکل با قطر D=9.16m سطح مقطع کلی A<sub>total</sub>=65.9m<sup>2</sup> است. برای عدم تاثیرگذاری شرایط مرزی روی تونل، از هر طرف به اندازه ی کافی از

شکل ۲. منحنی مشخصه بدون بعد شده برای تونل مورد بررسی در تحقیقات دانشگاه پلی تکنیک میلان

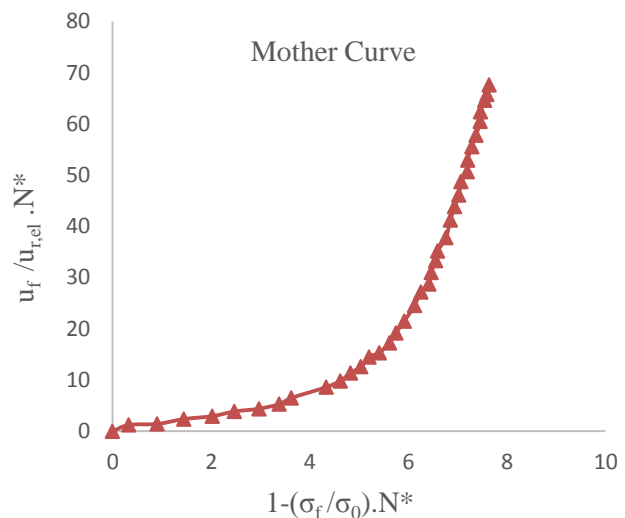


Fig. 2. Non-dimentional characteristic curve for the tunnel which is studying in milano-polytechnic university [5]

۳- مشخصات تونل مورد مدل سازی

برای مدل سازی از مشخصات ژئوتکنیکی قسمت ابتدایی خط ۷ مترو تهران (کیلومتر از ۰+۹۰۰ تا ۰+۱۰۰۰) از کل قسمت حفاری نشده، شامل ایستگاه A7 در مجاورت شهرک امیرالمومنین (کیلومتر از ۰+۹۰۰) تا ایستگاه N7 واقع در تقاطع خیابان قزوین و بزرگراه نواب (کیلومتر از ۰+۱۲۰۰) استفاده شده است.

۳-۱- اطلاعات ژئوتکنیکی

مطابق دفترچه اطلاعات ژئوتکنیکی خط ۷، خاک در محدوده مدل سازی و در عمق قرارگیری تونل از نوع ET3 است (شکل ۳).

برای پژوهش بیشتر در مورد اثر غیرهمگنی خاک، تونل در همان عمق قرار داده شده ولی مدل متشکل از دو نوع خاک ET3 و ET2 در نظر گرفته شده و منحنی مشخصه برای این حالت نیز ترسیم می شود. (حالت چهارم جدول (۳))  
اطلاعات ژئوتکنیکی مربوط به هر دو نوع خاک، در جدول (۱) آمده است [7].

گسیختگی پیش‌رونده مانند تونل و معادن سنگی و بارگذاری دینامیکی سازه‌های خاکی و سنگی مانند سد و تونل بسیار کاربردی است [8]

شکل ۵. شبکه‌بندی صورت گرفته در نرم‌افزار

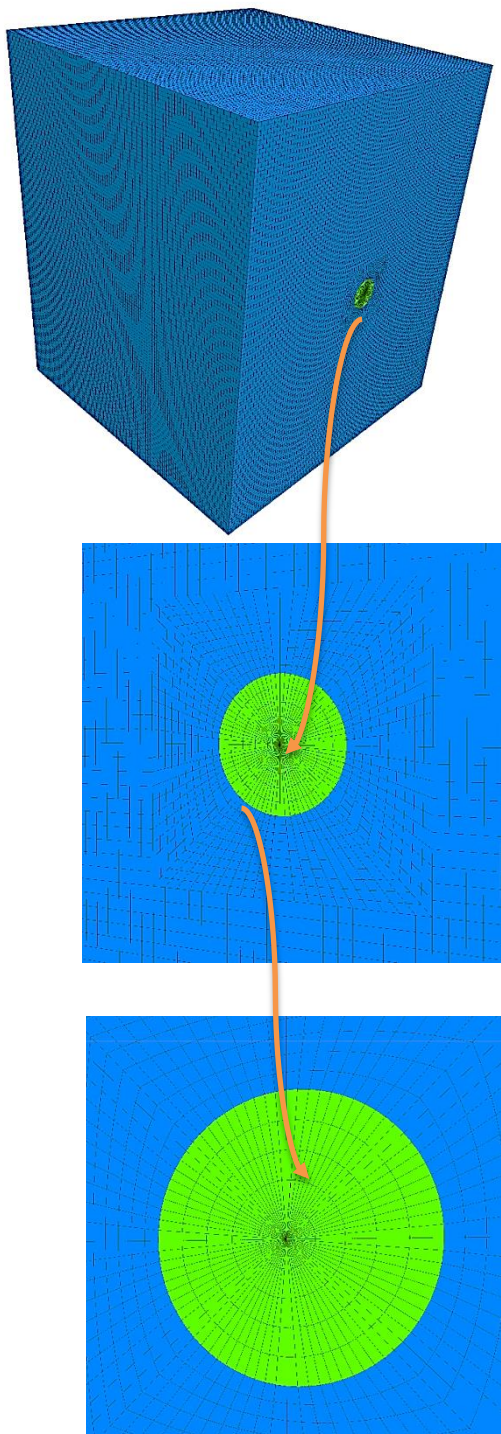


Fig. 5. Mesh created in Flac 3D

مرزهای تونل فاصله گرفته و ابعاد نهایی به صورت ۱۰۰ متر در جهت x (از مرکز تونل ۵۰ متر در هر طرف)، ۱۲۰ متر در جهت z (از مرکز تونل ۶۰ متر به سمت بالا و پایین) و در جهت y نیز ۱۰۰ متر (طول تونل، کیلومتر از ۰+۹۰۰ تا ۰+۱۰۰۰) در نظر گرفته شد. بار ساختمان نیز مطابق با گزارش ژئوتکنیک معادل  $15\text{ton/m}^2$  در طول تونل ( $10 < y < 90$ ) و محدوده  $-30 < x < 30$  و به سطح زمین ( $z=60$ ) اعمال شد. اطلاعات بالا به صورت خلاصه در شکل (۴) آمده است.

شکل ۴. هندسه تونل

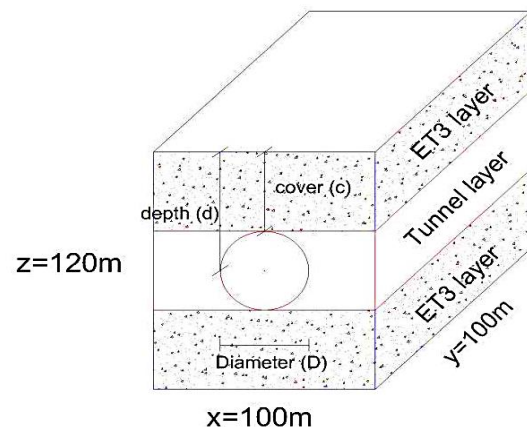


Fig. 4. Tunnel's geometry

در حالتی که تاثیر ناهمگنی خاک مدل را مورد بررسی قرار داده‌ایم، لایه‌ی تونل Tunnel layer در شکل (۴) به طور کامل از جنس خاک نوع ET2 مطابق جدول (۱) در نظر گرفته شده و لایه‌های بالا و پایین مانند قبل شکل (۴) از جنس خاک نوع ET3 باقی مانده است. همچنین در حالتی که تونل را سطحی در نظر گرفته‌ایم، تونل به طور کامل در لایه خاک ET3 بالایی قرار گرفته است (حالت پنجم جدول ۳).

### ۳-۳- شبکه‌بندی هندسه در نرم افزار

برای مدل‌سازی‌ها از نرم‌افزار FLAC3D بهره گرفته شده است. FLAC3D یک برنامه تفاضل محدود سه بعدی و یک کد چند منظوره برای مدل‌سازی محدوده کاملی از مسائل استاتیکی و دینامیکی به حساب می‌رود. این نرم‌افزار در تحلیل مسائل مربوط به پایداری مانند شیروانی و پی، تحلیل



سختی زیاد را به جداره‌های حفره تا محل سینه‌کار اعمال می‌کنیم. برای شبیه‌تر بودن شرایط حفاری مدل به شرایط واقعی حفاری، گام‌های مدل‌سازی به شرح زیر انجام شد:

- حفاری محدوده تونل از  $y=0-30m$ ، اعمال پوشش صلب به جداره‌ها تا محل سینه‌کار و همچنین اعمال تنش افقی اولیه به سینه‌کار و انجام تحلیل توسط نرم افزار برای تشخیص پوشش حفره و تنش اعمال شده به سینه‌کار و همچنین انتقال تنش‌ها بین خاک و پوشش.

- برداشتن تنش اعمالی از روی سینه‌کار در گام‌های مساوی، هر بار ۲۰٪ از کل تنش اعمالی اولیه کاسته شده و بیرون زدگی سینه‌کار مشاهده می‌شود. یعنی طبق گام‌های باربرداری توضیح داده شده، در ابتدا  $\sigma_f = \sigma_0$  بوده و در ادامه با برداشتن تدریجی تنش، برای محور افقی منحنی مشخصه خواهیم داشت:

$$(1 - \frac{\sigma_f}{\sigma_0}) \cdot N^* = (0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1) \cdot N^*$$

برای محاسبه  $u_{r,el}$  که بیرون زدگی سینه‌کار در آخرین گام باربرداری از روی مقطع و با فرض مدل الاستیک است، گام‌های فوق را برای مدل الاستیک انجام می‌دهیم. اما برای محاسبه پارامتر  $u_f$ ، تنش محصورکننده را به صورت تدریجی از روی مقطع  $y=30m$  و در شرایطی که خاک اجازه دارد وارد محدوده الاستوپلاستیک نیز بشود، برمی‌داریم تا تغییر شکل واقعی در سینه‌کار را ببینیم.

در ادامه گام‌های مدل‌سازی تشریح شده را برای تونل معرفی شده در این پژوهش و با تغییر پارامترهای آن در پنج حالت مطابق جدول (۳) انجام دادیم.

جدول ۳. حالت‌های مورد مدل‌سازی و پارامترهای در نظر گرفته شده

برای هر یک از آنها

Parameter/ Condition	Soil type	d (m)	$\gamma_{sat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	$C_{cu}$ (Pa)	$\phi_{cu}$ (°)	$N^*$
First	ET3	60	2400	40000	23	26.47
Second	ET3	60	2400	165000	23	5.7
Third	ET3	60	2100	40000	23	23.47
Forth	ET3	55.42	2400	40000	23	22.21
	ET2	4.58	2100	18000	33	
Fifth	ET3	10	2400	40000	23	6.49

Table 3. Different conditions for modelling and the parameters used in each of them

جدول ۲. مشخصات پوشش بتنی جداره تونل

Specification	amount
Grout Elasticity Module	$E=10.5GPa$
Poisson Module	$\nu=0.25$
Thickness	$t=30cm$
Density	$\gamma=2500g/cm^3$

Table 2. Concrete Specifications of tunnel walls

شبکه‌بندی مدل در شکل (۵) نشان داده شده و همانطور که مشاهده می‌شود ابعاد شبکه در محدود اطراف تونل که شرایط تنش-کرنشی بسیار حساس است، ریزتر در نظر گرفته شده تا دقت به هنگام حفاری زون‌ها بیشتر باشد.

۳-۴- مشخصات المان به کار رفته به عنوان پوشش<sup>۱</sup> بتنی جداره تونل

در تمامی مراحل پژوهش پیش‌رو از پوشش با مشخصات به شرح جدول (۲) برای جداره‌ی حفره‌ی تونل استفاده شده است. برای مدل‌سازی پوشش در نرم افزار از المان پوسته‌ای shell به عنوان پوشش که به صورت یک پوسته‌ی استوانه‌ای با مراکز ابتدا و انتهای و شعاع مشخص است، استفاده شده است.

۴- ترسیم منحنی تنش محصور کننده بیرون زدگی سینه کار

در این قسمت منحنی تنش محصور کننده-بیرون زدگی را برای تونل مذکور و تحت محورهای معرفی شده در قسمت ۲ ترسیم می‌کنیم.

روند انجام محاسبات و تحلیل‌ها توسط نرم‌افزار به این صورت بود که در ابتدا خاک کل مدل تحت وزن خود دارای تنش‌ها و نشست‌های برجا می‌شود. سپس این نشست‌ها که طی سالیان در خاک بوجود آمده و اکنون دیگر وجود ندارند، در نرم‌افزار نیز صفر می‌شوند تا قرائت‌های جابه‌جایی پس از آنها قرائت‌های مطلق باشند. پس از آن، مقطع تونل در  $y=30m$  متر را در نظر گرفته، تنش‌های افقی که روی سینه‌کار اعمال می‌شوند ( $\sigma_f$ ) را از نرم افزار قرائت می‌کنیم.

در مرحله‌ی بعدی خاک تونل از  $y=0-30$  متر را برداشته و تنش افقی معادل را به سینه‌کار و پوشش بتنی کاملاً صلب با

سوم را نشان می‌دهد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، منحنی مشخصه‌های این سه حالت با دقت خوبی روی هم قرار گرفته‌اند و تنها طول آن‌ها متفاوت است.

در شکل (۷) منحنی مشخصه تونل برای مدل ناهمگن در کنار منحنی مادر معرفی شده توسط ITUA رسم شده است. به وضوح مشخص است که در صورت ناهمگن بودن خاک محدوده‌ی تونل، منحنی مشخصه‌ی آن منحصر به فرد بوده و از مسیر منحنی مادر تبعیت نمی‌کند.

در شکل (۸) منحنی مشخصه تونل سطحی در کنار منحنی ITUA ترسیم شده که در این مورد هم ملاحظه می‌شود که منحنی ترسیم شده با اختلاف از منحنی مادر به دست می‌آید. اما نکته حائز اهمیت این است که تاثیر تغییر عمق تونل به اندازه تغییر پارامتر همگنی خاک محسوس نبوده و همگنی خاک تاثیرگذارترین پارامتر در شکل منحنی است.

در این مقاله منحنی تنش محصور کننده- بیرون زدگی منحنی مشخصه تونل نامیده شده است و اعمال نام منحنی واحد مادر برای همه‌ی تونل‌ها برای آن درست نیست زیرا با عدم رعایت هر یک از شرایط فوق، شکل منحنی تغییر می‌کند. بنابراین با رعایت شرایط فوق برای تونل‌های مختلف منحنی مشخصه‌ی بدون بعد آن‌ها با شکل یکسان و طول‌های مختلف به دست آمده که امکان پیش‌بینی مقادیر بیرون زدگی در حین حفاری از روی آن وجود دارد ولی فرضیه واحد بودن این منحنی برای همه‌ی تونل‌ها قابل استناد نیست.

شکل ۶. منحنی مشخصه بدون بعد برای تونل حالت‌های اول، دوم و سوم

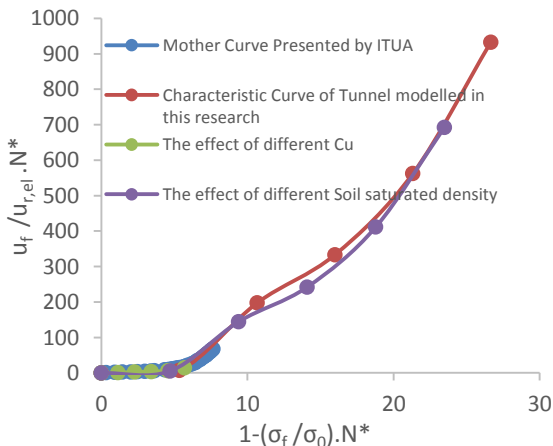


Fig. 6. Characteristic curves of conditions 1,2 and 3

در حالت اول، تونل را در عمق  $d=60m$  ( $d/D=6$ ) قرار داده، سایر مشخصات خاک مطابق جدول (۳) است. طبق رابطه (۱) برای این حالت داریم:

$$N^* = \left( \frac{2400 \cdot 60 + 15000}{4000} \right) \cdot (0.609^{0.82}) = 26.468$$

$$k_0 = 1 - \sin \theta = 1 - \sin 23 = 0.609$$

در حالت دوم، ضمن حفظ عمق ( $d/D=6$ )، چسبندگی خاک را با ثابت نگهداشتن سایر مشخصات، به بیش از چهار برابر افزایش دادیم. برای این حالت داریم:

$$N^* = \left( \frac{2400 \cdot 60 + 15000}{165000} \right) \cdot (0.609^{0.82}) = 5.7$$

در حالت سوم، ضمن رعایت ( $d/D=6$ )، وزن مخصوص اشباع خاک را با ثابت نگهداشتن سایر مشخصات، کاهش دادیم. برای این حالت داریم:

$$N^* = \left( \frac{2100 \cdot 60 + 15000}{4000} \right) \cdot (0.609^{0.82}) = 23.472$$

در حالت چهارم، با رعایت عمق قرارگیری تونل، مدل را به صورت غیرهمگن و با مشخصات خاک‌های نوع ET2 و ET3 ارائه شده در جدول (۱) و هندسه شرح داده شده در قسمت ۲-۳، در نظر گرفته ایم. برای این حالت نیز  $N^*$  مطابق ذیل محاسبه شده است:

$$N^* = \left( \frac{2400 \cdot 55.72}{4000} + \frac{2100 \cdot 4.58}{1800} + \frac{15000}{4000} \right) \cdot (0.455^{0.82}) = 22.214$$

در حالت پنجم، تمام مشخصات را مانند حالت اول در نظر گرفته، تنها تونل را به صورت سطحی ( $d/D=1$ ) در نظر گرفته ایم. برای این حالت داریم:

$$N^* = \left( \frac{2400 \cdot 10 + 15000}{165000} \right) \cdot (0.609^{0.82}) = 6.49$$

حالت‌های اول، دوم و سوم شرایط ذکر شده برای دست یافتن به منحنی واحد مادر را دارند. در حالت چهارم همگنی خاک مدل و در حالت پنجم عمیق بودن تونل نادیده گرفته شده است. شکل (۶) منحنی مشخصه‌ی تونل حالت‌های اول تا

منحنی های بلندتری داریم.

همچنین مشاهده می شود که پارامتر همگنی خاک مهم ترین عامل تاثیرگذار بر روی منحنی مشخصه است که تغییر آن می تواند تغییرات قابل توجهی روی منحنی مشخصه داشته باشد. تغییر هر یک از شرایط ذکر شده در ذیل نیز دستیابی به این منحنی واحد را مختل می کند.

- تونل عمیق باشد ( $d/D > 5$ )

- خاک به صورت یکنواخت (همگن) با رفتار الاستوپلاستیک کامل بوده و وزن مخصوص اشباع خاک در نظر گرفته شود.

- شرایط به صورت زهکشی نشده (تنش های کل) در نظر گرفته شده باشد.

- معیار گسیختگی برای خاک، معیار ترسکا است.

- قانون جریان وابسته رخ دهد.

- پوشش کاملا صلب و بسیار سخت تر از خاک بوده و در تمام طول حفاری دقیقا در محل سینه کار تمام شود.

منحنی مشخصه تونل فقط با در نظر گرفتن شرایط ایراد شده یکتا است و یک منحنی مادر یگانه برای کلیه تونل ها وجود ندارد.

شکل ۷. منحنی مشخصه بدون بعد برای تونل حالت چهارم

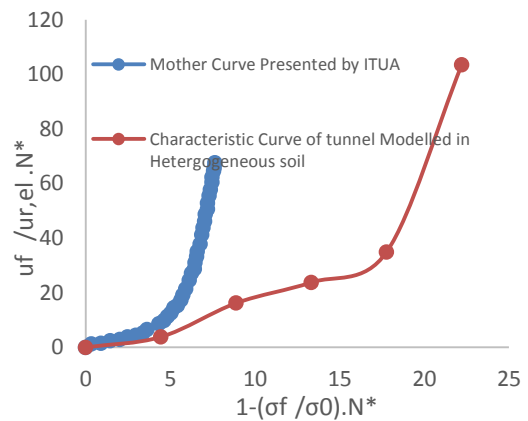


Fig. 7. Characteristic curves of condition No. 4

شکل ۸. منحنی مشخصه بدون بعد برای تونل حالت پنجم

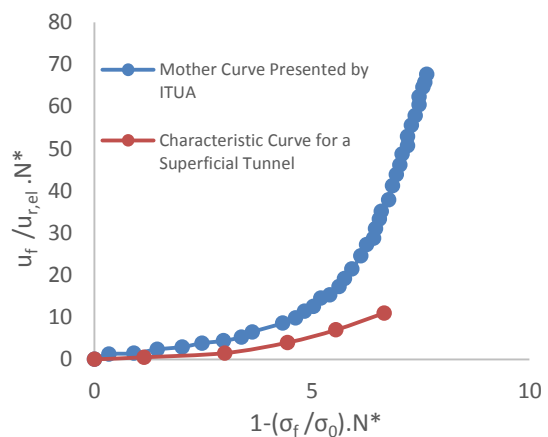


Fig. 8. Characteristic curves of condition 5

## References

- [1] Lunardi P. 2000 Design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soils. (ADECO-RS), Springer publication.
- [2] Lunardi G., Gatti M. 2010 Tunnel monitoring system—a contribution for the preparation of guidelines. ITA-AITES World Tunnel Congress 2010—Tunnel Vision Towards, Vancouver, Canada.
- [3] Cantieni L., Anagnostou G., Hug R. 2011 Interpretation of core extrusion measurements when tunnelling through squeezing ground. *Rock Mech Rock Eng* 44:641–670.
- [4] Kitchah F., Benmebarek S. 2016 Finite difference analysis of an advance core pre-reinforcement system. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 8 703-713.
- [5] Lunardi P. 2015 Extrusion control of The ground core at the tunnel excavation face as a stabilisation instrument for the cavity. International Tunneling and underground space association (ITUA). Muir Wood Lecture 2015.
- [6] di Prisco C., Flessati L., Frigerio G., Lunardi P. 2017 A numerical exercise for the definition under undrained conditions of the deep tunnel front characteristic curve. *Acta Geotechnica*, 1-15.
- [7] Geotechnical properties report of Tehran subway line 7 2010, (In Persian).
- [8] Manual, FLAC Users 2002. "Itasca Consulting Group Inc." Minnesota, USA.

## ۶- مراجع

## ۵- نتیجه گیری و بحث

در این مقاله کوشش بر آن بود تا با مدل سازی سه بعدی تونل با استفاده از نرم افزار 3D FLAC، رابطه میان تغییرات تنش محصورکننده سینه کار تونل و بیرون زدگی آن (منحنی مشخصه) تعیین شده و یکتایی آن مورد بررسی قرار گیرد. برای این منظور منحنی مشخصه بدون بعد تحت محورهای معرفی شده توسط ITUA، برای بخشی از خط ۷ متروی تهران ترسیم شده و برای پارامترهای ژئوتکنیکی و هندسی متفاوتی حساسیت سنجی شد.

در تمامی مدل سازی ها با رعایت شرایطی که در ادامه آمده است، مشاهده می شود که منحنی ها با دقت خوبی روی هم قرار می گیرند. انتهای شاخه منحنی ها با اختلاف اندکی روی هم قرار گرفته اند. همان گونه که مشاهده می شود، مقدار  $N^*$  طول منحنی ها را تحت تاثیر قرار می دهد و برای مقادیر بزرگتر  $N^*$



## Determination of Tunnel's Confinement Stress-Extrusion Curve by means of Numerical Models

H. Ghasemzadeh<sup>1\*</sup>, H. Ghaemi<sup>2</sup>

1- Associate professor of civil engineering, Faculty of Civil Eng., K. N. Toosi University of Technology

2- M.Sc. of Civil Engineering, Faculty of Civil Eng., K. N. Toosi University of Technology

\*ghasemzadeh@kntu.ac.ir

### Abstract:

The Geological hazard and the lack of appropriate underground investigation have always made the design and construction of underground works a risky affair. As a consequence a larger safety factor should always be considered for underground works compared to similar surface constructions. During excavation of a tunnel and by the opening a cavity the flow lines of stress field in the soil or rock mass are deviated and are channeled around it to create a zone of increased stress around the walls of the excavation. This channeling of the flow stresses or arch effect ensures that the cavity is stable and will last over time. Depending on the size of stresses created and the strength and deformation properties of the ground, arch effect can be produced in three states. In first state arching is close to the profile of excavation, when the ground around the cavity withstands the deviated stress flow around the cavity well, responding elastically in terms of strength and deformation. For second state, arching is far from the profile of the excavation, when the ground around the cavity is unable to withstand the deviated stress flow and responds an elastically-plasticizing and arch effect forms far from walls of the excavation. In the last state arching is not produced at all, when the ground around the cavity is unable to withstand the deviated stress flow and responds in the failure range producing the collapse of the cavity. The stability of tunnel can be determined and optimized through numerical modeling by finding stresses around tunnel and face movement.

The gradual reduction of horizontal stress from the tunnel face during the excavation process leads to the formation of deformation on the ground surrounded tunnel. Face Extrusion is the first response of environment to the excavation process. Extrusion appears on tunnel face and along the longitudinal axis of the tunnel and its geometry could be symmetric or asymmetric. This phenomenon depends on the resistance and properties of the advance core, arch effect and the main stress area exposed to the tunnel. In the present study a part of the Tehran Metro Line 7 tunnel in analyzed. The selected part for modeling locates in 0+900 to 0+1000 meters from the beginning of the southeast of line 7. Using geotechnical reports, the soil properties are selected and an elasto-plastic stress-strain behavior is considered for soil. All numerical modellings are done by finite difference method using in Flac 3D software. Based on results of numerical modelling the relationship between the stresses of the tunnel face and its extrusions are investigated and the results are presented in the form of confinement stress-extrusion curve or "tunnel characteristic curve". The characteristic curve is plotted under dimensionless axes and it is observed that these non-dimensional curves are placed on each other under special conditions for different tunnels i.e. there is only one characteristic curve for tunnels with different geometry. Conditions for unique characteristic curve are also presented here.

**Keywords:** Tunnel face extrusion, characteristic curve, underground excavation, confining stress, numerical modeling, elasto-plastic behavior.