



## تحلیل پایداری و پیش‌بینی نشست تونل خط ۳ مترو تهران با flac2D و نرم‌افزار Spss

کاوه آهانگری، علی نورزاد، ابوذر دارابی

۱ دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات تهران

۲ دانشگاه صنعت آب و برق شهید عباسپور

۳ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

[kaveh.ahangari@gmail.com](mailto:kaveh.ahangari@gmail.com)

### خلاصه

احداث تونل در مناطق شهری به‌سادگی فضاهای غیرمسکونی نیست. احداث تونل‌های سطحی، در نواحی متراکم و پرازدحام شهری با موانع و مشکلاتی روبه‌رو می‌شود که یکی از آن‌ها مسئله نشست است. تونل‌های مترو عموماً در عمق کمتر از ۲۰ متری و در محیط‌های آبرفتی حفر می‌شوند که وجود سازندهای فوقانی حفر و نگهداری و پیش‌بینی رفتار زمین را دشوار می‌کند. در تحقیق حاضر، تحلیل پایداری و بررسی میزان نشست تونل خط ۳ مترو تهران توسط نرم‌افزار عددی صورت پذیرفته است. تونل که با روش NATM حفاری می‌شود با استفاده از نرم‌افزار FLAC 2D مورد بررسی قرار گرفته و مقدار نشست سطح زمین و همچنین میزان همگرایی تونل در دیواره تونل با کمک نرم‌افزار پیش‌بینی شده و نتیجه به‌دست آمده با مقدار واقعی مقایسه شده است. میزان اختلاف مقدار پیش‌بینی شده با مقدار واقعی کم و قابل قبول می‌باشد. پیش‌بینی مورد نظر کمک شایانی در طراحی مناسب تونل، قبل از مرحله حفاری می‌کند. در ادامه با جمع‌آوری اطلاعات بالغ بر ۵۲ تونل مترو در ایران و سایر نقاط جهان که به لحاظ زمین‌شناسی، جنس خاک، عمق، روش حفر، گام حفاری و روش تحلیل مطابقت خوبی دارند، مبادرت به ارائه یک رابطه ریاضی با نرم‌افزار Spss شد. اطلاعات ورودی عبارتند از چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، وزن مخصوص، ضریب پواسون، همگرایی، که نتایج تطابق خوبی را میان این نتیجه حاصله از این رابطه با رابطه پک را نشان می‌دهد و همچنین این نرم‌افزار ضریب تاثیر هر متغیر و میزان تاثیر هر یک را بر روی نشست بیان می‌کند.

کلمات کلیدی: پیش‌بینی نشست، تونل خط ۳، متروی تهران، FLAC 2D، Spss

### ۱. مقدمه

از میان کلیه فعالیت‌های مهندسی، حفر تونل و به‌طور کلی فضاهای زیرزمینی، بیش از همه نیاز به بررسی دقیق و تحلیل مناسب دارد. زمین‌های سست و ریزشی، خردشده و گسل‌خورده، هوازده و متورم و همچنین آبدار بیشترین مشکلات را برای حفر تونل به وجود می‌آورند و این در حالی است که در بسیاری موارد، انتخاب زمین مناسب از حیثه ما خارج است. اغلب تونل‌های مترو که از مناطق شهری و زیر پی سازه‌های سطحی و کنار تاسیسات مهم شهری و از عمق کمی می‌گذرند و نمی‌توان مسیر آنها را برای رسیدن به زمین قابل اطمینان به مقدار زیادی تغییر داد. در این حال است که اهمیت تحلیل مناسب، نگهداری و روش احداث سازگار و ابزاربندی آشکار می‌شود.

احداث تونل در مناطق شهری به‌سادگی فضاهای غیرمسکونی نیست. احداث تونل‌های سطحی، در نواحی متراکم و پرازدحام شهری، با موانع و مشکلاتی روبه‌رو می‌شود که یکی از آن‌ها مسئله نشست است. برای کنترل نشست باید به ترتیب مراحل پیش‌بینی، پیش‌گیری و محافظت صورت پذیرد. روش‌های جلوگیری و کنترل نشست، بستگی به روش‌های پیش‌بینی نشست بستگی دارد که این امر اهمیت پیش‌بینی نشست را نشان می‌دهد.

توانایی در پیش‌بینی تأثیرات استخراج و نشست ناشی از آن، یکی از مهم‌ترین مراحل، در احداث تونل‌های سطحی، از جمله خطوط متروی شهری می‌باشد. در این تونل‌ها که در عمق کمتر از ۲۰ متری سطح زمین، در محیط‌های آبرفتی با مقاومت و چسبندگی کم حفر می‌شوند، رهایی تنش در اطراف تونل، سریع‌تر صورت می‌پذیرد.

روش‌های مختلف آماری و عددی، یکی از روش‌های مؤثر در تحلیل پایداری تونل، تعیین ضریب اطمینان همچنین پیش‌بینی میزان نشست می‌باشند. هدف از انجام این پروژه تحلیل پایداری تونل مترو با نرم‌افزار Flac 2D و با در نظرگیری مشخصات خاک، هندسه تونل و نحوه حفاری است که با محاسبه و پیش‌بینی نشست سطحی زمین و همگرایی دیواره‌های داخلی تونل با روابط تئوریک و ارائه رابطه مناسبی با استفاده از نتایج بالغ بر ۵۲ تونل حفاری شده در محیط خاکی مشابه با نرم‌افزار Spss Inc تکمیل می‌گردد.

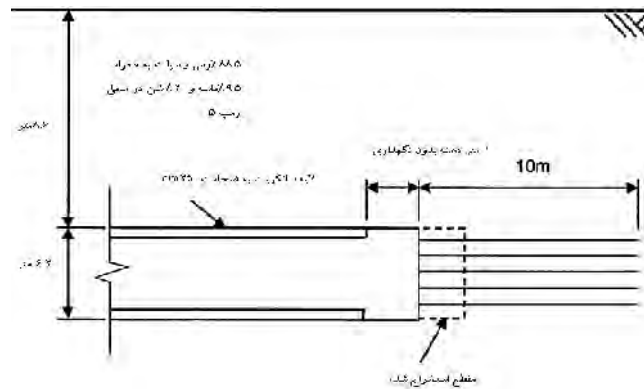


## ۲. معرفی خط سه مترو تهران

طرح خط ۳ متروی تهران که قرار است در سال ۱۳۹۳ به بهره‌برداری برسد، دارای ۵ فاز، حدود ۲۳ ایستگاه زیرزمینی به طول ۲۴ کیلومتر و ۷ ایستگاه روزمینی به طول ۱۱ کیلومتر خواهد بود. نخستین ایستگاه‌های این خط از حدود سه سال دیگر به بهره‌برداری می‌رسد. خط ۳ مترو تهران از بزرگراه لشکرک در شمال شرقی تهران آغاز می‌شود و تا بزرگراه آزادگان به سمت اسلامشهر ادامه می‌یابد که با طول تقریبی ۳۵ کیلومتر، ۳۱ ایستگاه دارد. که در میادین منیریه، ولیعصر (عج)، فاطمی، راه آهن و خیابان بهشتی، آزادگان، نعمت‌آباد کارگاه‌های ساخت تونل‌های مترو تجهیز شده است. در فاز نخست، پنج ایستگاه خط ۳ حد فاصل تقاطع این خط با خطوط ۱ و ۴ یعنی از خیابان شهید بهشتی تا چهارراه ولیعصر (عج) به بهره‌برداری می‌رسد. برای ادامه خط ۳ مترو از شریعتی تا ازگل، سه مسیر امام علی (ع)، استاد حسن بنا و صیاد شیرازی پیشنهاد شده بود که سرانجام مسیر بزرگراه صیاد شیرازی برای ادامه این خط برگزیده شد. در فاز دوم، توسعه خط سه از چهارراه ولیعصر (عج) تا راه آهن و آزادگان صورت می‌گیرد و در فاز سوم این خط از خیابان شریعتی تا ازگل ادامه می‌یابد، مقطع مورد بررسی در خط ۳ مترو تهران به صورت نعل‌اسبی و به روش اتریسی و تمام مقطع حفر می‌شود و در صورت تکمیل، ظرفیت تحت پوشش قرار دادن روزانه یک میلیون سفر را دارد. تونل مذکور با گام پیشروی ۱ متر و بصورت دستی و تمام مقطع در طی ۲۴ ساعت حفاری می‌شود، پس از حفر به محض شروع گام جدید عملیات نگهداری با ۲۵ سانتی‌متر شاکریت مسلح آغاز می‌گردد [۱].

## ۳. وضعیت کلی زمین‌شناسی منطقه‌ای تونل مترو خط ۳ تهران، محدوده رمپ ۵ و ۹:

منطقه در جنوب تهران نسبتاً هموار می‌باشد. وضعیت طبیعی منطقه قبلاً به صورت تپه ماهوری بوده که صاف شده است. مسیرهای رودخانه‌های قبلی و آبراه‌ها توسط خاک پر شده است. وجود خاک دستی در گمانه‌های حفر شده به عمق‌های مختلف این موضوع را اثبات می‌نماید. در برخی قسمت‌ها که خاک جابجا شده دارای بافت شبیه خاک طبیعی است و تشخیص آن عملاً غیرممکن می‌باشد. در جنوب تهران شبکه‌های درهمی از قنات‌ها در ترازهای مختلف وجود داشته که امروزه قسمت عمده آنها متروکه شده و ریزش نموده است شکل ۱ هندسه تونل و شرایط حفر را نشان می‌دهد. براساس طبقه‌بندی رسوبات تهران، در گزارش سازمان زمین‌شناسی ایران، سیلت‌های رسی کهریزک مربوط به آبرفت‌های BS منطقه را پوشانده و معادل سازند آبرفتی ناهمگن شمال تهران Bn می‌باشد. این رسوبات در گستره ری و کهریزک بوسیله پوشش نازک و نامنظم رسوبات دانه‌ریز آبرفت‌های کنونی (D) پوشیده شده است در جدول ۱ نتایج مطالعات ژئوتکنیکی و دانه‌بندی در محدوده مورد بحث ارائه شده است [۱].



شکل ۴ هندسه تونل و شرایط حفر [۱]

جدول ۴- نتایج مطالعات ژئوتکنیکی و دانه‌بندی در محل گمانه ۵ در اعماق مختلف [۱]

D10	D30	D60	D100	Cc	PI	LL	عمق	نوع نمونه‌گیری	شن	ماسه	رس و سیلت
۰/۰۰۷۷	۰/۰۱۱۶	۰/۰۶۳۱	۶/۷۳	<۱	۸	۲۶	۱ ۴/۴۵	Spt1	%۱۱/۰۳	%۲۴/۶۷	%۶۴/۳۰

۰/۰۰۶	۰/۰۰۷۹	۰/۰۲۷۶	۰/۴۲	<۱	۱۰	۲۶	۶/۵	۹/۹۵	Spt2	%۰	%۰/۳۰	%۹۹/۷
۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۸۷	۰/۰۳۰۲	۶/۷۳	<۱	۱۳	۳۱	۱۱	۱۱/۴۱	Spt5	%۱/۲	%۳/۸	%۹۵
۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۸۴	۰/۰۲۳۹	۶/۷۳	<۱	۱۲	۳۰	۱۴/۵	۱۴/۹۵	Spt6	%۱/۷	%۹/۷	%۸۸/۶

پارامترها از چپ به ترتیب اندازه‌ای از ذرات است که ۱۰٪، ۳۰٪، ۶۰٪، ۱۰۰٪ ذرات از آن کوچکتر است. LL, PI حد روانی و شاخص خمیری هستند.

بر طبق آزمایش سه‌محوری بدون تحکیم و زهکشی UU (رطوبت طبیعی) با سرعت بارگذاری ۰/۱ mm/min و شیر زهکشی باز جهت به دست آوردن مقادیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مطابق با رابطه موهز کلمب برابر  $0.22 \text{ Kg/cm}^2$  و  $37.5$  درجه به دست آمده‌اند. خلاصه پارامترهای مقاومتی خاک طبیعی قابل استفاده در محاسبات به قرار جدول ۲ می‌باشد. در حین آزمایش تحکیم برخی از نمونه‌های خاک طبیعی، فشار تورمی حدود  $1 \text{ Kg/cm}^2$  را نشان می‌دادند. مقدار ضریب پواسون نیز ۰/۴ منظور شده است.

جدول ۴ نتایج آزمایش‌ها و پارامترهای مقاومتی خاک [۱]

$\omega$ (%)	$\gamma_{dry} (\text{Kg}/\text{m}^3)$	بدون تحکیم و زهکشی UU		تحکیم و زهکشی شده CD		آزمایش برش مستقیم		تحکیم یافته	
		C	$\phi$	C	$\phi^0$	C	$\phi$	Cc	Cr
۱۵ تا ۱۹	۱۶۸۰ تا ۱۸۲۰	۰/۲۲	۳۷/۵	۰/۱۶	۳۵	۰/۱۲	۴۰	۰/۱۴۴	۰/۰۱۷

مدول الاستیسیته نیز به روش آزمایشگاهی که بر روی نمونه‌ها صورت پذیرفته مقدار  $180 \text{ Kg/cm}^2$  به دست آمده است. همچنین برای ماسه‌ها و رس‌هایی که به طور عادی تحکیم یافته‌اند K دامنه‌ای از ۰/۴ تا ۰/۵ دارد و به نحو زیر تابعی از زاویه اصطکاک داخلی  $\phi$  است. سایر پارامترهای مربوط مورد در تحلیل به صورت جدول ۳ ارائه شده است که مشخصات مربوط به هندسه تونل، خصوصیات زمین و نگهداری را شامل می‌شود.

$$K = 1 - \sin \phi = 1 - \sin 37.5 = 0.4364 \quad ( )$$

جدول ۳ خصوصیات هندسی و ژئومکانیکی مربوط به تونل و خاک دربرگیرنده [۱]

توضیحات	مقدار	توضیحات
پارامتر عرض گود(اریلی و نیو ۱۹۸۲)	$K_W = 0.5$	مدول الاستیته خاک MPa
افت زمین (بوروز ۱۹۹۴ و نایر و تیلور ۱۹۹۸)	$V_L = 1\%$	مدول الاستیته بتن MPa
شعاع تونل m	$R = 3.025$	سختی نگهداری MPa
گام پیشروی m	$X = 1$	m
زاویه گود نشست نسبت به خط گذرا از مرکز	$\beta = 0.13$	فشار نگهداری MPa
زاویه مربوط به نشست صفر (ساگاستا و اتو ۱۹۸۲)	$\eta = 55$	مقاومت تک‌محوری بتن MPa

#### ۴.۴ پیش‌بینی نشست و همگرایی با روابط تئوریک:

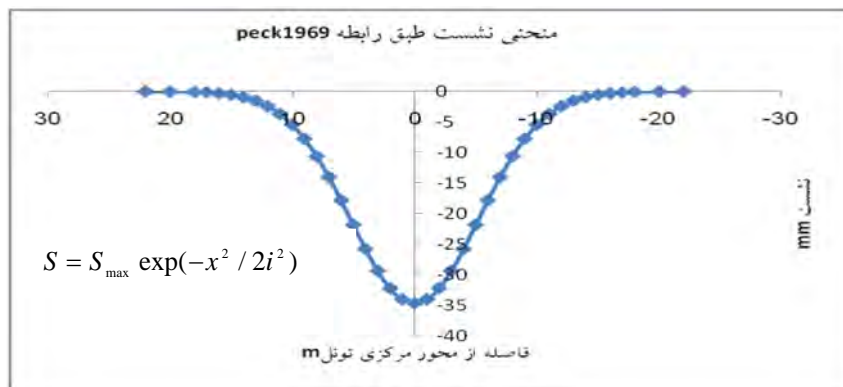
با استفاده از مقادیر مناسب بدست آمده برای روابط تجربی که در جدول ۳ ارائه شده است، میزان نشست و همگرایی با استفاده از روابط تجربی ارائه شده در جدول ۴ بدست آمده که نتایج در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴ نتایج تحلیل تئوریک نشست و همگرایی براساس روابط تجربی متفاوت [۲]

توضیحات	مقدار	نتایج
حجم کل نشست زمین (یک ۱۹۶۹) (دییور ۱۹۶۹)	۰/۲۴ تا ۲۸۷۷	$V_S$

$\Delta V_e$	۰/۲۴۰۳	کاهش حجم الاستیک (دبیر ۱۹۶۹)	
$i$	۵/۰۹	$i/R = \eta \times [1.05 \times Z/D - 0.42]$	فاصله نقطه عطف از خط مرکز m (ساگاستا و اتو ۱۹۸۲)
$i$	۵	$i = [0.175 + 0.325(1 - ZZ_0)] Z_0$	مایر ۱۹۹۸
$i$	۴/۵۲	$\frac{i}{R} = \left(\frac{z_0}{2R}\right) 0.8$	اشمیت ۱۹۸۱
$i$	۴/۵۲	$i = R(Z/D)^{0.8}$	پک ۱۹۶۹
$i$	۵	$i = 0.43Z_0 + 1.1 \Rightarrow \text{for } 3 \leq Z_0 \leq 34m$	اولی نیو ۱۹۸۲
$S_{max}$	۴۳/۳	$S_{max} = 0.0126V_L(R)(Z_0/2R)^{0.8}$	پک ۱۹۶۹ (mm)
$S_{max}$	۳۹/۸	$S = S_{max} \exp(-x^2/2i^2)$	پک (mm)
$S_{max}$	۲۵/۹	$S_{max} = 0.0126V_L R^2 / i$	رانکین (mm)
$U$	۶/۵ ۴/۲	پنت ۱۹۹۵ (mm)	
$\lambda$	٪۳۹	درصد تریخ تنش قبل از نصب نگهداری (گام پیشروی ۱) (۱۹۹۵)	

7: در جدول ۳ توضیح داده شده است.



شکل ۴ منحنی نشست طبق رابطه تجربی پک ۱۹۶۹

تغییرات فشار نگهداری و جابجایی دیواره براساس رابطه پنت<sup>۱</sup> ۱۹۹۵ مطابق جدول ۵ ارائه شده است [۴].

$$U_r = \left[ \frac{R^2}{r} \right] \left[ \frac{1+\nu}{E} \right] (P_V - P_S) \quad ( )$$

که روی دیواره  $R=r$   $P_V$  فشار نگهداری و فشار روباره می باشد.

$$P_{Sc \max} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \left[ 1 - \frac{(r_i - t_c)^2}{r_i^2} \right] = 10 \left[ 1 - \frac{(3.025 - 0.25)^2}{3.025^2} \right] = 1.58 \text{ Mpa} \quad ( )$$

$$K_C = \frac{E_c \left[ r_i^2 - (r_i - t_c)^2 \right]}{(1+\nu_c) \left[ (1-2\nu_c)r_i^2 + (r_i - t_c)^2 \right]} = 1956.02 \text{ Mpa} \quad ( )$$

$$U = U_{io} + \frac{P_{SC} * r_i}{K_C} = 4.75 + 2.45 = 7.20 \text{ mm} \quad ( )$$

جدول ۵ تغییرات همگرایی برحسب تغییرات فشار نگهداری براساس رابطه (۲)

$P_{SC \text{ Support}}$ (MPa)	۰	۰/۳	۰/۵	۰/۷۵	۱	۱/۲۵	۱/۵	۱/۷	۲
--------------------------------	---	-----	-----	------	---	------	-----	-----	---

<sup>۱</sup>:Panet



$U$ (mm)	۵۵/۳	۴۵/۶	۳۹	۳۱	۲۲/۸	۱۴/۶	۶/۵	۳	۰/۰۶
----------	------	------	----	----	------	------	-----	---	------

روابط تئوری جهت محاسبه نشست در جلو و پشت جبهه کار به صورت زیر می‌باشد [۳].

$$U_a = U_0 + A_a [1 - \exp(-B_a X)] \quad ( )$$

$$A_a = -0.22v - 0.19$$

$$B_a = 0.73v + 0.81$$

بطور تئوریک باید  $U_a$  به ازای مقادیر بزرگ  $X = |x|/R$ ، به صفر برسد، برای این منظور باید  $A_a = -U_a$  یا برابر رابطه بالا شود.  $B_a$  ثابت

وابسته به ضریب پواسون است و از آنالیز آماری نتایج حاصل می‌شود. روابط برای پشت سطح پیشروی نیز با  $r^2 = 0.9987$  به صورت زیر ارائه شدند [۳].

$$U_b = U_0 + A_b \left[ 1 - \left( \frac{B_b}{B_b + X} \right)^2 \right] \quad ( )$$

$$A_b = -0.22v - 0.81$$

$$B_b = 0.39v + 0.65$$

تاکنون تعدادی تحقیقات با محوریت تخمین مقدار نرمالایز شده  $(U_r/U_r^\infty = LDP)$  یا اثر آن بر تنش‌های هیدرواستاتیک منطقه اطراف تونل

دایره‌ای انجام گرفته که باعث پیشنهاد روابط زیر برای مناطق پشت سطح پیشروی توسط پنت ۱۹۹۳<sup>۱</sup> و گیونت<sup>۱</sup> ۱۹۸۲ بر پایه آنالیز المان محدود گردیده است [۴].

$$\frac{U_r}{U_r^\infty} = 0.28 + 0.72 \left[ 1 - \left( \frac{0.84}{0.84 + x/R} \right)^2 \right] \quad ( )$$

که  $x \geq 0$  فاصله از سطح پیشروی است. بر پایه آنالیز کرنش الاستیک کوربتا<sup>۲</sup> و همکارانش، در سال ۱۹۹۱ رابطه تجربی متفاوتی را ارائه کردند [۳].

$$\frac{U_r}{U_r^\infty} = 0.29 + 0.71 \left[ 1 - \exp(-1.5 x/R)^{0.7} \right] \quad ( )$$

و در سال ۱۹۹۵ پنت رابطه جایگزین دیگری را پیشنهاد کرد [۳].

$$\frac{U_r}{U_r^\infty} = 0.25 + 0.75 \left[ 1 - \left( \frac{0.75}{0.75 + x/R} \right)^2 \right] \quad ( )$$

اخیراً کارانزا توریس<sup>۳</sup> و فایرهوست<sup>۴</sup> (۲۰۰۰) یک رابطه تجربی بر پایه تحقیقات هوک<sup>۵</sup>، برای تخمین مقدار نرمالایز شده LDP، برای مناطق جلوی

سطح پیشروی  $x \leq 0$  و پشت سطح پیشروی  $x \geq 0$  تونل ارائه دادند [۳].

$$U = \frac{U_r}{U_r^\infty} = \left[ 1 + \exp\left( \frac{-x/R}{1.10} \right) \right]^{-1.7} \quad ( )$$

باید یادآوری کرد که روابط ۵، ۶ و ۷ برای رفتارهای الاستیک و رابطه ۸ بر پایه اطلاعات صحرایی انجام شده توسط چرن و همکارانش<sup>۶</sup> (۱۹۹۸)

می‌باشد. طبق روابط، تغییرات نسبت  $U$  جایجایی در امتداد جهت طولی تونل تحت تاثیر فاصله بر حسب شعاع  $(x/R)$  تونل است. در روابط بالا مقدار پیش

دگرشکلی الاستیک  $(U_0)$  از ۰/۲۵ تا ۰/۳۰۸ متغیر است که با مقادیر گزارش شده توسط سایر پژوهشگران تطابق دارد. آنچه حائز اهمیت می‌باشد این است که

تاکنون رابطه‌ای ارائه نشده که مقدار پیش‌دگرشکلی الاستیک  $(U_0)$  را نیز مدنظر قرار دهد. شکل ۳ و ۴ و ۵ نتایج تحلیل مقطع مورد نظر را نشان می‌دهد [۴].

<sup>۱</sup> : Giunet

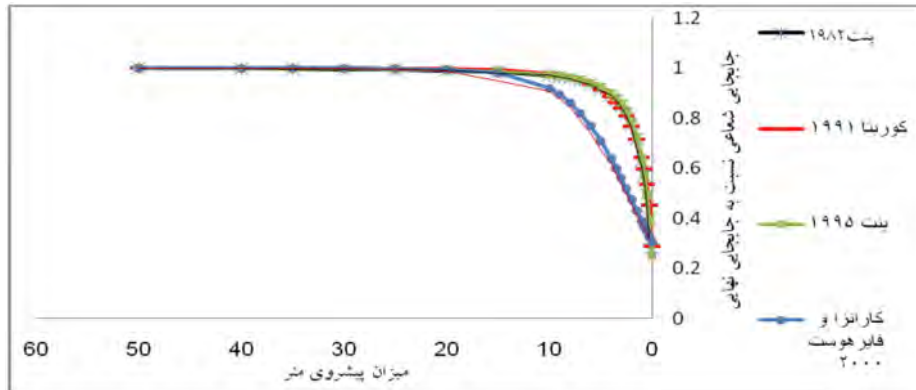
<sup>۲</sup> : Corbetta

<sup>۳</sup> : Carranza

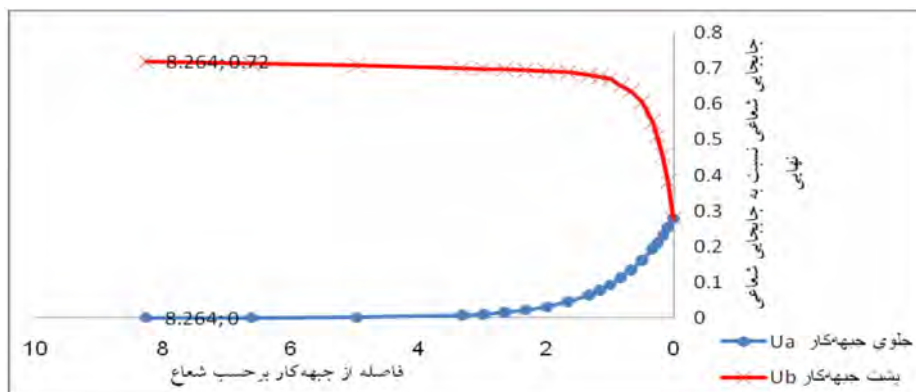
<sup>۴</sup> : Fairhurst

<sup>۵</sup> : Hoek

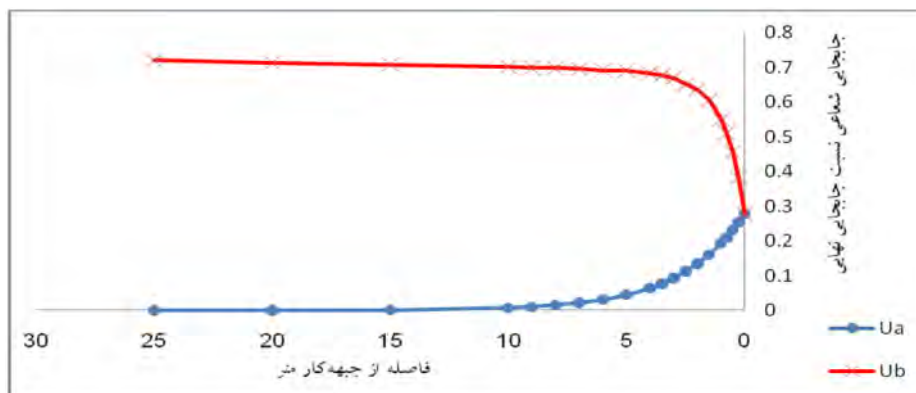
<sup>۶</sup> : Chern



شکل ۳ تاثیر پیشروی بر روی نسبت تابش شعاعی به تابش شعاعی در نقطه پایانی در محدوده رمپ ۵ متر و خط ۳ تهران



شکل ۴ تاثیر پیشروی بر حسب شعاع بر روی تابش شعاعی نورمالایز شده در پشت و جلوی سینه کار در محدوده رمپ ۵ متر و خط ۳ تهران



شکل ۵ تاثیر پیشروی بر حسب متر بر روی تابش شعاعی نورمالایز شده در پشت و جلوی سینه کار در محدوده رمپ ۵ متر و خط ۳ تهران

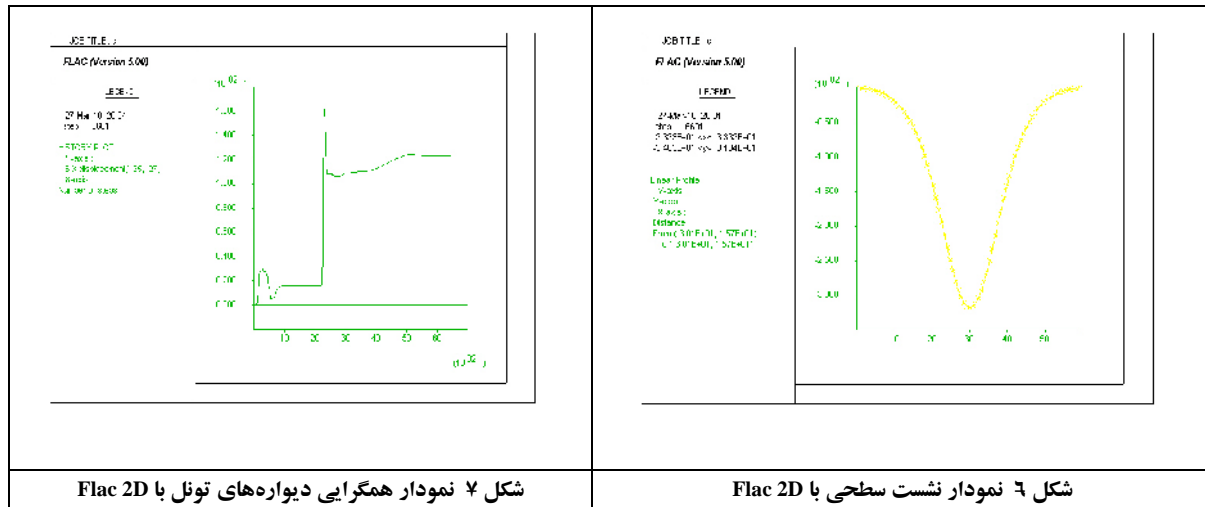
در پشت سطح پیشروی تابش شعاعی افزایش می یابد و به سرعت به مقدار مفروض کرنش صفحه ای  $U_r^\infty$  در فاصله مشخصی از سطح پیشروی (شکل ۴) که تقریباً در فاصله ۳ برابر قطر (دقیقاً  $5/7$  برابر شعاع) تونل می رسد. و در فاصله ۳ برابر شعاع یا  $1/5$  برابر قطر در جلوی سینه کار به مقدار ۰ برای این تونل، می رسد.

### ۵. پیش بینی نشست با تحلیل عددی:

با توجه به خصوصیات زمین‌شناسی و ژئومتری تونل مدل‌سازی تونل صورت پذیرفته، و با اعمال گام پیشروی در رابطه پنت میزان تریخس تنش قبل از نصب نگهداری وارد می‌شود [۵]:

$$\frac{u_r}{u_r^\infty} = \left( 1 + \exp \frac{-X/D}{0.55} \right)^{-1.7} = \lambda = \left[ 1 + \exp \frac{-1/6.05}{0.55} \right]^{-1.7} = 0.39 \quad ( )$$

که D قطر تونل و X گام پیشروی است. با توجه به رابطه ارائه شده توسط پنت که براساس تحلیل چندین تونل به روش‌های تئوری ابزار 3UDC حاصل شده است، می‌توان گام پیشروی را که دربرگیرنده کرنش مجاز و زمان است وارد محاسبات Flac نمود [۵]. پس واردسازی و مدل‌سازی تونل نتایج به صورت شکل ۶ و ۷ ارائه شده است که حداکثر نشست و همگرایی به ترتیب ۳۴ و ۱۳ میلیمتر بدست آمده است.



### ۶. پیش‌بینی نشست با ارائه رابطه آماری نرم افزار Spss Inc

نرم افزار spss عمدتاً<sup>۱</sup> برای سرعت بخشیدن به کاربرد روش‌ها و آزمون‌های کلاسیک آماری در سطح وسیعی استفاده می‌گردد. به‌علت نیاز به بررسی رابطه نشست با همگرایی، مقاومت فشاری و نسبت عمق به قطر، در اینجا کلیه داده‌ها به صورت یکباره وارد نرم افزار شده است.

- رابطه خطی بدون عرض از مبدا:

$$R^2 = 0.994 \text{ (تعدیل شده)} \text{ و } R^2 = 0.995 \text{ (عمق به قطر)} + 0.55 \text{ (مقاومت فشاری)} + 0.64 \text{ (همگرایی)} = 2.85 \text{ نشست}$$

در این رابطه ضریب همبستگی تعدیل شده<sup>۱</sup> که نسبت به ضریب همبستگی ( $R^2$ ) معیار حقیقی‌تری است با افزایش تعداد متغیرهای مستقل افزایش نمی‌یابد در حالی که مقدار ضریب همبستگی تابع تعداد متغیر مستقل مدل می‌باشد. خطای استاندارد مدل نیز ۲/۴۱ می‌باشد. مقدار آماره آزمون معنی‌داری ضرایب رگرسیون این رابطه ۱۱۰۱/۲۴ می‌باشد. این مقدار حاصل تقسیم خطای متوسط رگرسیون به خطای متوسط میان مقدار واقعی متغیر منهای مقدار پیش‌بینی شده معادله رگرسیون می‌باشد. سطح معنی‌داری<sup>۲</sup> رابطه ۰/۰۰۳ می‌باشد که نشان می‌دهد مدل رگرسیون معتبر است. سطح معنی‌داری همگرایی، مقاومت فشاری و نسبت عمق به قطر به ترتیب ۰/۰۰۰، ۰/۱۵۲، ۰/۱۴۳ می‌باشد که نشان می‌دهد ابتدا همگرایی سپس نسبت عمق به قطر و در نهایت مقاومت فشاری در این رابطه تاثیر بیشتری دارند.

- رابطه خطی با عرض از مبدا:

$$R^2 = 0.975 \text{ (تعدیل شده)} \text{ و } R^2 = 0.975 \text{ (عمق به قطر)} + 0.18 \text{ (مقاومت فشاری)} + 0.84 \text{ (همگرایی)} = 2.77 \text{ نشست}$$

در این رابطه خطای استاندارد ۲/۴۳ است.

در مورد مدل‌های غیرخطی، بهتر است در این مدل‌بندی سعی گردد از روابطی که کاربرد وسیعی در معادله‌سازی دارند استفاده گردد.

<sup>1</sup> Adjusted correlation coefficient  
<sup>2</sup> significance level



- رابطه لگاریتمی:

$$R^2 = 0.94 \quad \text{الف} \quad (\text{عمق به قطر}) \ln(43/4) + (\text{مقاومت فشاری}) \ln(14/81) + (\text{همگرایی}) \ln(6/94) = \text{نشست}$$

در این رابطه، خطای استاندارد همگرایی، مقاومت فشاری و نسبت عمق به قطر به ترتیب ۵/۴۵، ۴/۶۳، ۶/۹۴ می باشد. در روابط غیر خطی نمی توان سطح معنی داری و نیز ضریب همبستگی تعدیل شده را تعریف نمود.

$$R^2 = 0.943 \quad \text{ب} \quad (\text{عمق به قطر}) \ln(4/7) + (\text{مقاومت فشاری}) \ln(14/9) + (\text{همگرایی}) \ln(7/36) = \text{نشست}$$

خطای استاندارد همگرایی، مقاومت فشاری، نسبت عمق به قطر و ضریب عرض از مبدا به ترتیب ۵/۸۳، ۵/۲۲، ۱۰/۸۲ و ۲۹/۲۵ می باشد. با استفاده از نتایج و مقادیر اولیه حدود ۵۲ تونل مترو در محیط های خاکی که به روش NATM و در عمق کمتر از ۳۰ متر حفر شده اند رابطه زیر ارائه شده است.

$$R^2 = 0.958 \quad (\text{قطر}) 0.209 + (\text{عمق}) 0.995 + (\text{مدول الاستیسیته}) 0.281 + (\text{زاویه اصطکاک}) 0.835 + (\text{چسبندگی}) 0.757 = \text{نشست}$$

## ۷. نتیجه گیری:

همان طوری که در جدول ۵ مشاهده می شود نتایج به دست آمده از نرم افزار و مقدار تئوریک و روش آماری بجز در مورد همگرایی، اختلاف ناچیزی دارند که علت آن را می توان در عدم اعمال گام پیشروی، فشار سیستم نگهداری و برخی پارامترهای اساسی خاک در روابط تجربی دانست. همچنین نتایج تحلیل ها نشان می دهند که از روش های عددی بخصوص روش تفاضل محدود و نرم افزار Flac و روش های آماری (Spss) می توانند به عنوان ابزاری مناسب در جهت پیش بینی نشست در تونل متروی تهران استفاده شوند.

جدول ۵ نتایج تحلیل تونل متروی خط ۳ تهران

همگرایی در سقف mm			نشست mm				
۷/۲			۳۱				مقدار تئوریک
۹/۸	۱۴/۴۸	۱۲	۲۹/۴۳	۲۶	۳۲/۹۶	۳۷/۷۴	مقدار با Spss Inc
۱۳			۳۴				مقدار تحلیل عددی Flac 2D
۶.۸			۳۲/۶۵				مقدار واقعی

## ۸. قدردانی

از مساعدت بی دریغ جناب مهندس عباسی و مهندس مهری در شرکت جهاد توسعه منابع آب، مجری طرح خط ۳ مترو تهران کمال تشکر را دارم.

## ۹. مراجع

- گزارش زمین شناسی و نتایج آزمایش های آزمایشگاهی مربوط به پروژه خط ۳ مترو تهران در محل انتهای پارکینگ خواجه وند رمپ ۵، ۱۳۸۷
- وفائیان، محمود، (۱۳۸۲)، الگوی دگرشکلی های خاک بر اثر احداث تونل دایره ای در آن، هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان.
- Unlu T, Gercek H. 2003 *Effect of Poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel*, Department of mining engineering, Zonguldak Karaelmas University.
- Descoudres F. 1974 *Analyse tridimensionnelle de la stabilite' d'un tunnel au voisinage du front de taille dans une roche elastoplastique*. Advances in Rock Mechanics, Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Congress on Rock Mechanics, ISRM, Vol. 2, pp.1130-1135.
- Carranza, C. T. C, Fairhurst, 1999, *The Elasto-plastic Response of uUnderground Excavations in Rock Masses that Satisfy the Hoek-Brown Failure Criterion*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol 36, pp.777-809