

# رابطه تجربی برای نشست زمین در اثر حفر تونل دو قلو مترو اصفهان با TBM

حسن بخشنده امنیه<sup>۱</sup>، امیرحسین رستمی<sup>۲</sup>، کورش شهریار<sup>۳</sup>، حمید چاکری<sup>۴</sup> و مسعود چراغی سیف آباده

<sup>۱</sup>دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup>دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

<sup>۳</sup>استاد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۴</sup>استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

<sup>۵</sup>دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۳/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۲۵

## چکیده

تونل‌های مترو از مهم‌ترین زیرساخت‌های حمل و نقل شهری هستند. با توجه به عمق کم حفاری، مهم‌ترین عامل برای جلوگیری از نشست حداکثر، کنترل تغییر شکل‌ها و نیروهای برشی ایجاد شده است تا از آسیب و تخریب سازه‌های سطحی و زیرسطحی جلوگیری شود. تاکنون روش‌های مختلفی برای تخمین نشست ارائه شده است که به سه دسته روابط تجربی، روابط تحلیلی و روابط عددی تقسیم می‌شوند. در این تحقیق با توجه به شرایط ژئومکانیکی محل مورد مطالعه و با استفاده از برداشت‌های انجام گرفته در رفتارنگاری حین حفر تونل مترو دو قلو توسط ماشین حفاری تمام مقطع (TBM) رابطه نشست زمین  $(s = A_2 + \frac{s_{max}}{2})$ ، نشست ماکزیمم  $(s_{max} = A_1 - A_2)$  و نقطه عطف  $(i = x_0)$  بر اساس تابع بولتزمان ارائه شد.

**کلیدواژه‌ها:** نشست، نشست ماکزیمم، نقطه عطف، روابط تجربی، روابط تحلیلی، روابط عددی.

\***نویسنده مسئول:** حسن بخشنده امنیه

E-mail: hbakhshandeh@ut.ac.ir

## ۱- پیش‌نوشتار

یکی از مهم‌ترین پارامترهایی که در یک پروژه تونل‌سازی شهری باید مورد بررسی قرار گیرد، میزان نشست سطح زمین است. برای محاسبه و تخمین میزان نشست سطح زمین روابط تجربی، روابط تحلیلی و روابط عددی متعددی توسط محققین ارائه شده است. روابط تجربی بر اساس بررسی داده‌های حاصل از پروژه‌های عملی و ایجاد رابطه بین پارامترهای مختلف به دست می‌آید که مهم‌ترین محدودیت روابط تجربی نیز همین عامل است. یعنی اینکه برای شرایط زمین‌شناسی خاصی ارائه می‌شود و برای کاربرد آنها در سایر شرایط باید دقت کرد. از روابط تجربی می‌توان به روش Peck (1969) اشاره کرد که بر اساس داده‌های موجود از تعداد زیادی پروژه‌های تونل‌سازی، میزان نشست در بالای تونل را با دقت قابل قبولی توسط منحنی گوسی به دست آورد. Oteo and Moya (1979) با اصلاح روش Peck و استفاده از پارامترهای متعدد شرایط ژئومکانیکی محل حفاری، رابطه تجربی خود را ارائه کردند. O'Reilly and New (1982) با بررسی مشاهدات خود در تونل‌سازی در انگلستان روابطی برای زمین‌های چسبنده و زمین‌های دانه‌ای ارائه کردند. Attewell et al. (1986) و Mair and Taylor (1993) روابطی برای تعیین میزان نشست سطحی زمین و تعیین نقطه عطف منحنی نشست ارائه کرده‌اند. Chakeri et al. (2013) نیز بر اساس مدل‌سازی عددی و تحلیل اطلاعات مربوط به ۳ تونل مترو مشهد، تهران و استانبول رابطه‌ای برای به دست آوردن نشست ماکزیمم در اثر تونل‌سازی مکانیزه ارائه کرده‌اند.

## ۲- تحلیل تجربی

### ۲-۱. روش Peck (1969)

بر اساس داده‌های موجود از تعداد زیادی پروژه‌های تونل‌سازی، این محقق عنوان کرد که گودی نشست بالای تونل را می‌توان با دقت قابل قبولی به وسیله تابع خط یا منحنی احتمال نرمال (معروف به منحنی گوس) به دست آورد.

به‌طور کلی در رابطه ارائه شده توسط Peck دو پارامتر اصلی مقدار نشست بیشینه  $S_{max}$  و پهنای گودی نشست  $i$  نقش اصلی را دارند (رابطه ۲):

$$S_{V(m)} = S_{V,max} \cdot \text{EXP} \left( -\frac{y^2}{2i^2} \right) \quad (1)$$

که در آن  $S_V$  مقدار نشست سطح در مقطع عرضی تونل،  $S_{V,max}$  مقدار نشست حداکثر،  $y$  فاصله از محور تونل و  $i$  فاصله نقطه عطف از محور تونل است.

### ۲-۲. روش Oteo and Moya (1979)

این روش یک روش نیمه تجربی است، که امکان تخمین نشست در امتداد عمود بر محور تونل را می‌دهد. به‌طور کلی این روش، اصلاح شده روش Peck است، که در آن پارامترهای بیشتری از تونل و توده در برگیرنده آن به کار گرفته شده است:

$$\omega_{(y)} = \varphi \frac{\gamma(2a_0)^2}{E} (0.85 - \theta) \text{EXP} \left[ -\frac{y^2}{2i^2} \right] \quad (2)$$

در رابطه فوق  $E$  مدول یانگ خاک،  $a_0$  شعاع تونل،  $Z_0$  عمق تونل،  $\theta$  ضریب پواسون،  $\varphi$  یک ثابت تجربی و  $i$  موقعیت نقطه عطف منحنی نشست است. در این روش مقدار  $i$  از رابطه ۴ محاسبه می‌شود:

$$i = a_0 \eta (1.05 \frac{Z_0}{a_0} - 0.42) \quad (3)$$

که در آن  $\eta$  یک ثابت تجربی است.

### ۲-۳. روش O'Reilly and New (1982)

O'Reilly and New (1982) با بررسی مشاهدات خود در تونل‌سازی در انگلستان، معادلات زیر را به ترتیب برای زمین‌های چسبنده و زمین‌های دانه‌ای ارائه دادند:

$$i = 0.43Z + 1.1 \quad (r^2 = 0.96) \quad (4)$$

برای  $3 \leq Z \leq 34m$

$$i = 0.28Z - 0.1 \quad (r^2 = 0.78) \quad (5)$$

برای  $6 \leq Z \leq 10m$

### ۲-۴. روش Attewell et al. (1986)

Attewell et al. (1986) یک روش نیمه تجربی برای تعیین نشست ارائه دادند. مهم‌ترین ویژگی که این روش داشت تعیین پروفیل سه‌بعدی نشست بود. رابطه ۷ معادله ارائه شده توسط ایشان را برای یافتن پروفیل سه‌بعدی تنش نشان می‌دهد:

$$S = \frac{V_s}{i \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot \text{EXP} \left[ -\frac{y^2}{2i^2} \right] \cdot \left\{ G \frac{X - X_i}{i} - G \left[ \frac{X - X_F}{i} \right] \right\} \quad (6)$$

که در آن  $S$  نشست قائم سطحی در موقعیت  $x$  و  $y$ ،  $y$  فاصله نقطه مفروض از محور تونل،  $X$  موقعیت طولی نقطه سطحی مفروض،  $V_s$  حجم نشست برای هر متر پیشروی تونل تعریف شده بر حسب درصدی از  $X_i$ ،  $V_L$  موقعیت اولیه یا مقطع شروع تونل و  $X_F$  موقعیت جبهه کار تونل است.

**۲-۵. روش (Mair and Taylor (1993)**

(Mair and Taylor (1993) یک سری داده‌های گسترده از اندازه‌گیری‌های میدانی را بررسی کردند و پارامترهای عرض گودی نشست یا نقطه عطف را براساس یافته‌هایشان ارائه دادند. در نهایت نتایج مبنی بر اینکه نشست سطحی بالای تونل در رس به روش ساخت بستگی دارد را تأیید کردند. ایشان یک مقدار متوسط را برای تونل‌ها در خاک‌های دانه‌ای تعیین کردند ( $K=0.35$ ).

**۲-۶. روش (Chakeri et al. (2013)**

از مهم‌ترین روش‌های تجربی می‌توان به روش ارائه شده توسط (Chakeri et al. (2013) اشاره کرد که با استفاده از مطالعه موردی ۳ تونل مترو مشهد، تهران و استانبول، داده‌های رفتارنگاری و مدل‌سازی عددی رابطه تخمین نشست بیشینه در تونل‌سازی مکانیزه ارائه شد.

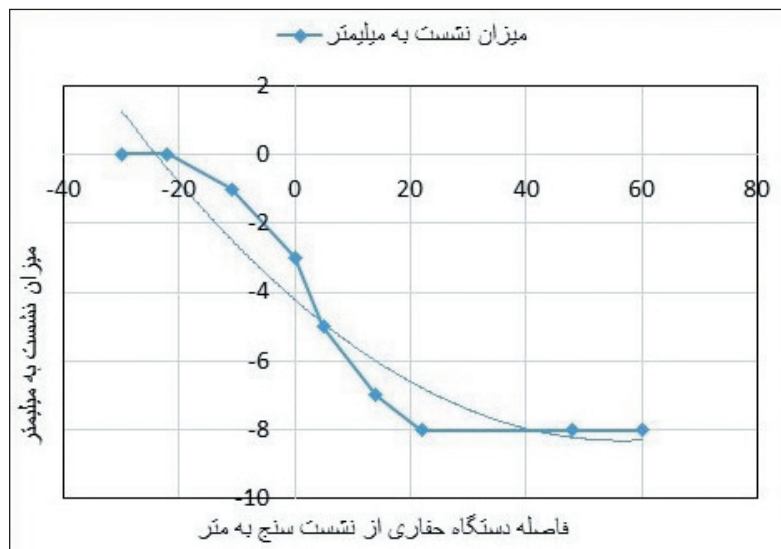
$$S_{\max} = 3198.744 \left( \frac{D}{Z_0} \right) * \left( \frac{\gamma Z_0 + \sigma_v - (c + 0.3\sigma T)}{E} \right) (1 - \theta)(1 - \sin \phi)^{0.8361} \quad (7)$$

این روش در برابر روش‌های دیگر یک مزیت عمده دارد و آن استفاده از پارامترهای ضریب پواسون و زاویه اصطکاک داخلی است که هر دو پارامتر در ایجاد نشست دخیل هستند. در نتیجه، این روش بهتر می‌تواند نشست‌های سطحی ایجاد شده را پیش‌بینی کند. در این تحقیق خط شمالی- جنوبی متروی اصفهان برای مطالعه موردی در نظر گرفته شد که اولویت اول شبکه متروی اصفهان است و پایانه کاوه در شمال شهر اصفهان را به پایانه صدف در جنوب آن منتقل

می‌کند. روش حفاری به صورت حفر تونل‌های دو قلو با قطر ماشین حفاری برابر ۶/۹ متر، فاصله مرکز تا مرکز دو تونل ۱۸/۱۲ متر، قطر تونل ۶/۶ متر و ضخامت سگمنت‌های ۳۰ سانتی‌متر است که در ابتدا تونل غربی حفر شد. با توجه به گمانه‌های حفر شده در مسیر حفاری تونل وضعیت ژئوتکنیکی مسیر مشخص شد که مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌ها در جدول ۱ مشاهده می‌شود. همچنین رفتارنگاری با نصب دوربین NAK2 در فواصل ۵۰ متری بر روی محور تونل و به فاصله ۱۰۰ متری در پیاده‌روهای شرقی، غربی و رفوژ وسط و در زمان حفاری انجام گرفت. جدول ۲ یک نمونه از جدول‌های تهیه شده برای رفتارنگاری است، که در فاصله ۳۰ متری از جبهه کارمیزان نشست ۸ میلی‌متر برآورد شد. در شکل ۱ نمودار تغییرات نشست نسبت به حرکت دستگاه حفاری بر اساس اطلاعات جدول ۲ نشان داده شده است (Rostami, 2017).

با تحلیل اطلاعات رفتارنگاری با نرم‌افزار OriginLab نشست زمین در اثر حفر تونل مترو دو قلو اصفهان بر اساس تابع بولتزمان به دست آمد (www.OriginLab.com). تحلیل اطلاعات جدول ۲ در نرم‌افزار بر اساس تابع بولتزمان در شکل ۲ به صورت نمودار رسم شد.

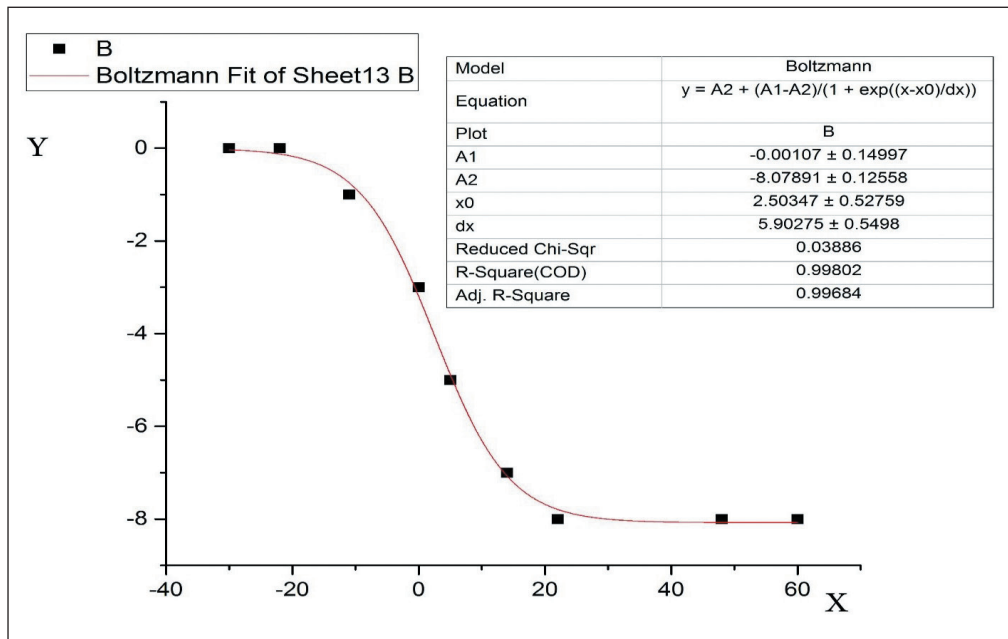
بر اساس تحلیل‌های انجام شده نشست زمین  $(S = A_2 + \frac{S_{\max}}{2})$ ، نشست ماکزیمم  $(s_{\max} = A_1 - A_2)$  و نقطه عطف  $(i=x_0)$  تعیین شد. در روابط بالا  $A_1$  مساحت یا حجم اولیه و  $A_2$  مساحت یا حجم نهایی است.



شکل ۱- نمودار تغییرات نشست نسبت به حرکت دستگاه حفاری (Rostami, 2017).

جدول ۱- مشخصات ژئوتکنیکی لایه‌های خاک محدوده تونل (Rostami, 2017).

مشخصات	نوع لایه	CL	GC	ML	SM	MW	سنگ بستر
وزن مخصوص خشک $(\gamma_{dry} \text{ (KN/m}^3\text{)})$	۱۶/۷	۱۷/۱	۱۶/۵	۱۷/۲	۲۴	۲۴	۲۴
وزن مخصوص تر $(\gamma_{wet} \text{ (KN/m}^3\text{)})$	۱۹/۵	۲۰	۱۹	۲۰	۲۴/۷	۲۴/۷	۲۴/۷
ضریب پواسون $(\nu)$	۰/۳۵	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷	۰/۲۷
ضریب الاستیسیته $(E_i \text{ (Kg/cm}^2\text{)})$	۲۰۰	۵۰۰	۳۰۰	۵۰۰	۸۶	۸۶	۸۶۰
چسبندگی $(C \text{ (Kg/cm}^2\text{)})$	۰/۱	۰/۱۵	۰/۱۸	۰/۲	۰/۳۷۵	۰/۵	۰/۵
ضریب اصطکاک داخلی $(\Phi \text{ (}^\circ\text{)})$	۲۲	۳۰	۲۴	۲۹	۳۷	۴۹	۴۹
پارامتر اتساع $(\psi \text{ (}^\circ\text{)})$	۰	۳	۰	۱	۰	۰	۰



شکل ۲- نمودار تغییرات نشست نسبت به حرکت دستگاه حفاری بر اساس تابع بولتزمن (Rostami, 2017).

جدول ۲- رفتارنگاری ثبت شده در حین حفر تونل مترو (Rostami, 2017).

ردیف	فاصله نشست سنج از TBM (m)	میزان نشست (mm)
۱	-۳۰	۰
۲	-۲۲	۰
۳	-۱۱	-۱
۴	۰	-۳
۵	۵	-۵
۶	۱۴	-۷
۷	۲۲	-۸
۸	۴۸	-۸
۹	۶۰	-۸

### ۳- نتیجه گیری

تطابق بسیار مناسبی از نشست ماکزیمم ثبت شده در زمان رفتارنگاری (۸ میلی متر) و نشست ماکزیمم به دست آمده از فرمول تجربی (۸/۰۷۷۸۴ میلی متر) وجود دارد. همچنین نقطه عطف به دست آمده از فرمول تجربی در تطابق کامل با منحنی نشست رسم شده از اطلاعات رفتارنگاری است که شکل ۲ نشان دهنده این امر است. رابطه تجربی ارائه شده بر اساس تابع بولتزمن است که میزان نشست از رابطه  $S = A_2 + \frac{S_{max}}{2}$ ، نشست ماکزیمم از رابطه  $S_{max} = A_1 - A_2$  و عرض گودی نشست (نقطه عطف) از رابطه  $i = x_0$  تعیین شد.

این مطالعه به بررسی نشست سطح زمین در اثر حفاری تونل با استفاده از نتایج رفتارنگاری برداشت شده پرداخته است. در نهایت بر مبنای نتایج حاصل از برداشت فرمول تجربی برای محاسبه ماکزیمم نشست سطح زمین و نقطه عطف منحنی نشست ارائه شده است. ثبت نتایج رفتارنگاری با استفاده از دوربین NAK2 انجام و برای بالا بردن صحت نتایج در زمان واحد از دو شاخص عکس تهیه و اطلاعات مربوطه ثبت شده است. همچنین با بالا بردن تعداد دفعات رفتارنگاری و ثبت اطلاعات نتایج بسیار مطلوبی به دست آمده است.

## References

- Attewell, P. B., Yeates, J. and Selby, A. R., 1986- Soil Movements Induced by Tunnelling. Chapman & Hall, New York.
- Chakeri, H., Ozcelik, Y. and Unver, B., 2013- Hacettepe University, Effects of important factors on surface settlement prediction for metro tunnel excavated by EPB. Ankara.
- Mair, R. J. and Tailor, R. N., 1993- Surface Settlement Profiles Above Tunnels In Clay. Journal Of Geotechnique, Vol, 37. No.3, pp. 301- 330.
- O'Reilly, M. P. and New, B. M., 1982- Settlements above tunnels in United Kingdom their magnitude and prediction. Tunnelling 82 symposium, London IMM, pp.173– 181.
- Oteo, C. S. and Moya, J. F., 1979- Evaluacion de Parametors Del Suelo de Madrid Con Relacion a la Construccion de Tuneles. In Proceedins of the 7th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Paper f 13, vol, 3. pp. 239- 247.
- Peck, R. B., 1969- Deep excavations and tunneling in soft ground. In: Proc. 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State of the Art Volume, pp. 225– 290.
- Rostami, A. H., 2017- Estimation of settlements induced in tunneling with TBM in Urban Environments. Case study: Isfahan Subway Line 1. Ph.D. Unpublished, Ph.D. Thesis in Mining Engineering.
- [www.OriginLab.com](http://www.OriginLab.com)

## Subsidence prediction for twin tunnels using empirical formula – A case study: Isfahan, Iran

H. Bakhshandeh Amnieh<sup>1\*</sup>, A. H. Rostami<sup>2</sup>, K. Shahriar<sup>3</sup>, H. Chakeri<sup>4</sup> and M. Cheraghi Seifabad<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, School of Mining, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Ph.D. Student, Faculty of Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

<sup>3</sup>Professor, Faculty of Mining and Metallurgy Engineering, Amir Kabir University, Tehran, Iran

<sup>4</sup>Assistant Professor, Faculty of Mining Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

<sup>5</sup>Associate Professor, Faculty of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Received: 2017 May 23

Accepted: 2017 September 16

### Abstract

Metro tunnels are one of the most important urban transportation infrastructures. Due to shallow depth of drilling, the most important factors to prevent the maximum subsidence and subsequent damage of surface and subsurface structures are deformation control and shear forces. The various methods of estimating the subsidence are divided in three categories, namely; Empirical, analytical and numerical methods. In this research, according to the geotechnical conditions of the study area using the data collected from the monitoring during the excavation of twin tunnels of metro by TBM, the empirical methods for the subsidence ( $s=A_2+s_{max}/2$ ), the maximum subsidence ( $s_{max}=A_1-A_2$ ) and the inflection point ( $i=x_0$ ) are presented by using Boltzmann function.

**Keywords:** Subsidence, Maximum subsidence, Inflection point, Empirical Method, Analytical Method, Numerical Method.

For Persian Version see pages 3 to 6

\*Corresponding author: H. Bakhshandeh Amnieh; E-mail: hbakhshandeh@ut.ac.ir