

## بررسی نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل‌های مترو با استفاده از EPB TBM به روش‌های عددی و آماری

محسن حوائج<sup>۱</sup>، رضا رحمان نژاد<sup>۲\*</sup>، محمد علی ابراهیمی<sup>۳</sup>

- ۱- کارشناسی ارشد استخراج دانشگاه شهید باهنر کرمان
- ۲- دانشیار گروه مهندسی معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان [r\\_rahmannejad@hotmail.com](mailto:r_rahmannejad@hotmail.com)
- ۳- استادیار گروه مهندسی معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت 19 دی 1389، پذیرش 27 آذر 1390)

### چکیده

حفاری‌های کم عمق از جمله تونل‌ها می‌توانند باعث حرکت زمین شوند که این حرکت‌ها به صورت نشست در سطح زمین نمایان می‌شوند. تونل‌ها ممکن است در مناطق شهری با تراکم جمعیت زیاد ساخته شوند، بنابراین نشست ایجاد شده بر ساختمان‌ها و تأسیسات قرار گرفته در بالای تونل تأثیرگذار است. به همین دلیل تخمین میزان نشست ناشی از حفر این تونل‌ها ضروری است. عوامل مختلفی از قبیل عمق، فشار سینه‌کار و فشار تزریق بر میزان نشست ناشی از حفر تونل توسط EPB TBM تأثیرگذار هستند. در بخش اول این مقاله همه‌ی پارامترهای تأثیرگذار بر نشست ناشی از حفر تونل در محیط‌های رسی، حفر شده توسط EPB TBM معرفی می‌شود سپس با استفاده از مدل‌سازی عددی با نرم‌افزار Plaxis 3D TUNNEL، کاربرد اطلاعات مربوط به متروی شیراز و بررسی پارامتری، نوع و میزان اثر این پارامترها بر نشست مشخص شده است. در ادامه با انجام تحلیل حساسیت نشست نسبت به پارامترهای مؤثر، تأثیرگذارترین پارامترها بر نشست معرفی می‌شوند. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که فشار سینه‌کار، فشار تزریق، همگرایی، مدول الاستیک خاک و عمق تونل بیشترین تأثیر را بر میزان نشست دارند. در بخش دوم این مقاله با استفاده از مدل‌سازی عددی فرآیند ساخت تونل‌های مترو به وسیله‌ی EPB TBM در محیط رسی اشباع از آب مدل شده است. سپس میزان نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل و نتایج 27 مدل عددی برای ارائه رابطه‌ای آماری با استفاده از روش رگرسیون چند متغیره استفاده شده است. در نهایت رابطه ارائه شده با داده‌های حاصل از اندازه‌گیری‌های برجای نشست در پروژه متروی شیراز مقایسه شده است. به‌کارگیری رابطه به‌دست‌آمده در تعیین نشست متروی شیراز و مقایسه آن با داده‌های ایزاربنندی، کارا بودن رابطه ارائه شده را نشان می‌دهد. استفاده از این رابطه با داشتن پارامترهای ورودی آن که در همه پروژه‌های مترو موجود هستند، بسیار ساده بوده و خطای آن قابل قبول است.

### کلمات کلیدی

نشست، EPB TBM، مدل‌سازی عددی، مطالعه پارامتری، رگرسیون چند متغیره.

## 1- مقدمه

در این تحقیق رابطه‌ای برای تخمین میزان نشست سطح زمین، ناشی از حفر تونل‌های مترو در محیط رسی اشباع از آب که توسط EPB TBM حفر می‌شوند، به کمک رگرسیون چند متغیره ارائه شده است. با استفاده از مدل‌سازی عددی به کمک نرم‌افزار Plaxis 3D Tunnel و اطلاعات ژئومکانیکی متروی شیراز، اطلاعات عددی مورد نیاز برای مدل‌سازی آماری بدست آمده است. برای انجام رگرسیون چند متغیره از نرم‌افزار SPSS 16 استفاده شده است. رابطه‌ی ارائه شده، سادگی کاربرد روابط تجربی و تحلیلی را در کنار در نظر گرفتن فرآیند حفاری مرحله به مرحله و نصب سگمنت دارا است.

## 2- مشخصات محیط و مدل در نظر گرفته شده

برای مدل‌سازی نشست و انجام مطالعات پارامتری، مشخصات محیط حفاری تونل‌های مترو شیراز استفاده شده است. محیط اشباع، خاک مورد نظر از جنس رس، تونل‌ها (دو تونل) با قطر حفاری 6 متر و فاصله دیوار به دیوار 8 متر با ضخامت سگمنت 30 سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. در این مدل خاک اشباع، جک‌های جلوبرنده، تزریق پشت سگمنت و پوشش تونل با المان‌های عددی معرفی شده است. فشار سینه‌کار در اتاقک حفاری، وزن TBM و اندرکنش بین TBM و خاک، جک‌ها و لاینینگ تونل به صورت واقع بینانه‌ای لحاظ شده است. عملیات تزریق پشت سگمنت با استفاده از ایجاد فشار منفذی پشت لاینینگ مدل شده است. پوسته شیلد نیز به عنوان یک پوسته‌ی تغییرشکل ناپذیر در مدل وارد شده است. مدل برای شبیه‌سازی تونل مستقیم، کم‌عمق، در خاک‌های رسی استفاده شده است. در تحلیل‌های انجام‌شده، از مدل رفتاری موهر-کولمب برای مدل‌سازی رفتار خاک استفاده شده است. مرزهای مدل نیز چنان در نظر گرفته شده است که اثرات مرزها به کم‌ترین حد ممکن برسد. این مرزها شامل مرزهای ثابت شده در راستای افقی در اطراف مدل و مرزهای ثابت شده در راستای عمودی در پایین مدل هستند. پارامترهای مربوط به خاک، سگمنت‌ها و سپر مطابق جدول (1)، (2) و (3) است.

ساخت تونل‌های کم‌عمق در محیط خاکی باعث حرکت خاک به سمت فضای خالی ایجاد شده و در نتیجه نشست سطح زمین می‌شود. در صورتی که مقدار نشست ایجاد شده از مقدار مجاز آن بیشتر شود می‌تواند به سازه‌های سطحی و زیرسطحی آسیب وارد کند، به همین دلیل شناسایی عوامل تأثیرگذار بر نشست ناشی از حفر تونل مهم است. در مناطق شهری حفاظت از ساختمان‌ها و تأسیسات سطحی و زیرسطحی در حین تونل‌سازی ضروری است. بدین منظور مهندسیین مسئول طراحی و ساخت تونل نیازمند ابزار و روش‌هایی هستند که به کمک آن‌ها میزان نشست زمین را تخمین زده و مشخص کنند که آیا ساختمان‌ها تحت تأثیر این جابجایی‌ها آسیب خواهند دید یا خیر [1].

طراحی تونل نیازمند برآورد مناسبی از تغییر شکل‌های زمین است. بسته به روش حفاری و نگهداری، تونل‌سازی می‌تواند باعث نشست‌هایی با مقادیر مختلف شود [2،3]. در مطالعات خود برخی از پارامترهایی که بر نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل در محیط خاکی و نرم - مؤثرند را معرفی کرده‌اند. در این تحقیق با استفاده از نتایج مطالعات این محققین، و انجام مدل‌سازی‌های عددی، با استفاده از نرم‌افزار Plaxis 3D Tunnel، بررسی کامل‌تری انجام شده است و پارامترهای مؤثر بیشتری معرفی شده‌اند. سپس با مشخص کردن حساسیت نشست به هر یک از آن‌ها، مؤثرترین پارامترها بر نشست زمین در اثر حفر تونل در محیط خاکی و نرم تعیین می‌شوند [4].

رویکردهای مختلفی که اغلب برای تخمین جابجایی‌های زمین استفاده می‌شوند عبارتند از: روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی، روش‌های عددی و روش‌های هوشمند. با استفاده از این روش‌ها محققین مختلف راه‌حلهایی را برای تخمین نشست ارائه کرده‌اند [5-10]، اما رابطه‌ای که خاص تونل‌های متروی حفاری شده با EPB Shield باشد، پیش از این مطالعه، ارائه نشده است.

جدول 1: خصوصیات ژئومکانیکی خاک مورد نظر [11]

ν	E (KN/m <sup>2</sup> )	φ (°)	C (KN/m <sup>2</sup> )	γ <sub>Sat</sub> (KN/m <sup>3</sup> )	γ <sub>Dry</sub> (KN/m <sup>3</sup> )	نوع خاک
0/25	حدود 100	29	20	20	17	رس

γ<sub>Dry</sub>: وزن مخصوص خشک، γ<sub>Sat</sub>: وزن مخصوص اشباع، C: چسبندگی، φ: زاویه اصطکاک، E: مدول الاستیک، ν: ضریب پواسون.

جدول 2: خصوصیات سگمنت [11]

ν	E (KN/m <sup>2</sup> )	γ (KN/m <sup>3</sup> )
0/15	3/14×10 <sup>7</sup>	24

γ: وزن مخصوص، E: مدول الاستیک، ν: ضریب پواسون.

جدول 3: خصوصیات Shield استفاده شده در مدل‌سازی [11]

W <sub>p</sub> (KN/m/m)	EA (KN/m)	EI (KNm <sup>2</sup> /m)
38/15	8/2×10 <sup>6</sup>	8/38×10 <sup>4</sup>

EI: سختی خمشی، EA: سختی محوری، W<sub>p</sub>: وزن واحد سطح.

حفاری) تقسیم کرد. در هر کدام از این مراحل، گام‌های مشابه تونل‌سازی و نگهداری تونل تکرار می‌شود.

برای انتخاب پارامترهای حیاتی موثر بر نشست تونل از نتایج مطالعات دیگر محققین استفاده شده است. پارامترهای بررسی شده در تحقیقات پیشین عبارتند از: وزن Trailer، طول TBM، وزن TBM، زاویه اصطکاک داخلی خاک، درجه بیش تحکیم یافتگی خاک، نفوذپذیری خاک و ویژگی‌های هیدراسیون سیمان [2]، [3]. به علاوه پارامترهای دیگری که در این تحقیق بررسی شده است، عبارتند از: فشار سینه‌کار، فشار تزریق، همگرایی، مدول الاستیک خاک و عمق تونل.

لازم به یادآوری است که برای شبیه‌سازی افت حجمی خاک در اثر حفاری تونل با استفاده از شیلد از پارامتر همگرایی استفاده می‌شود. همگرایی عبارت است از کاهش سطح مقطع تونل به سطح مقطع اولیه تونل بر حسب درصد. این پارامتر دارای تأثیر قابل توجهی بر میزان نشست سطح زمین است.

### 3- مدل‌سازی عددی و مطالعات پارامتری

در این پژوهش از نرم‌افزار Plaxis 3D Tunnel برای مدل‌سازی عددی استفاده شده است. در مراحل مدل‌سازی به منظور نزدیک شدن نتایج مدل‌سازی به واقعیت، فرآیند ساخت گام به گام حفاری تونل رعایت شده است. پیشروی تونل و جابه‌جا شدن دستگاه TBM در مدل وارد شده است. این واقعیت با تغییر مکان المان‌هایی که نشان‌دهنده جک‌های بین کله حفار و آخرین حلقه سگمنت و همچنین تغییر محل اعمال فشار سینه‌کار و تغییر مکان پوسته TBM است، در نظر گرفته شده است. در زمان نصب سگمنت‌ها، دستگاه TBM ثابت باقی می‌ماند. بعد از اینکه مرحله نصب سگمنت به پایان رسید، مرحله حفاری دوباره آغاز می‌شود. مرحله حفاری تا زمانی که خاک به اندازه کافی برای نصب رینگ بعدی حفاری شود، ادامه می‌یابد. بنابراین می‌توان فرآیند ساخت تونل را به مراحل ساخت با طول سگمنت 1/4 متر (طول یک چرخه

سپس شیب خط محاسبه شده است. نتایج محاسبات انجام شده برای پارامترهای مختلف در جدول 4 آورده شده است.

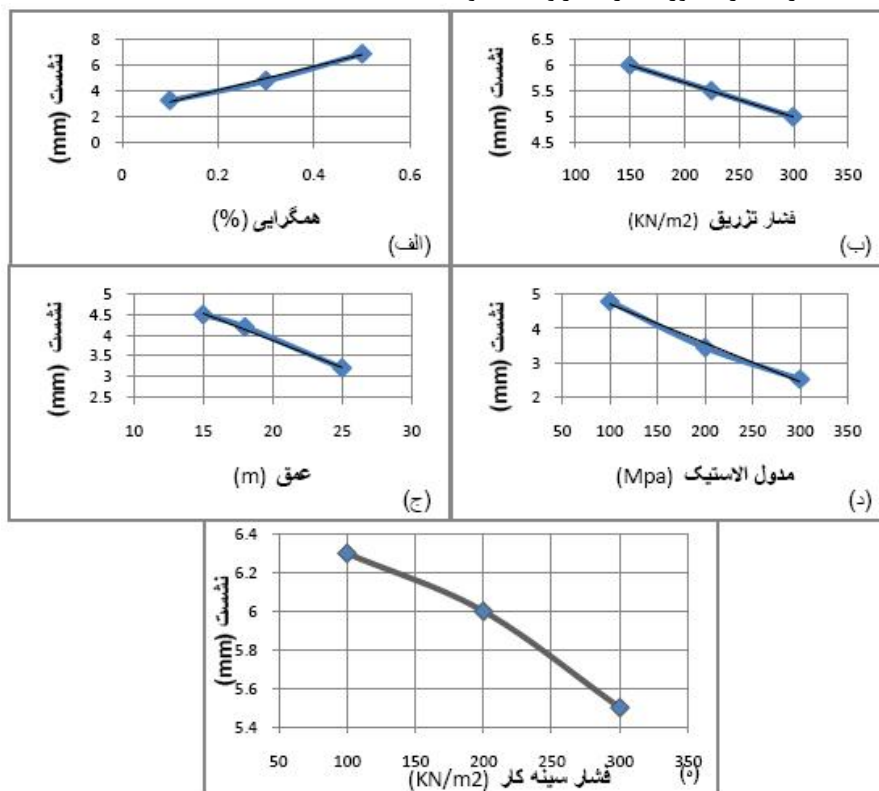
در جدول 4،  $m_1$  ضریب زاویه خطی است که نقطه اول را به نقطه دوم وصل می‌کند،  $\alpha_1$  شیب این خط،  $m_2$  ضریب زاویه خطی است که نقطه دوم را به نقطه سوم وصل می‌کند و  $\alpha_2$  شیب این خط است. با توجه به جدول 4 و احتساب شیب تغییرات نشست نسبت به تغییر در هر یک از پارامترها، مشخص شد که نشست نسبت به پارامترهای فشار سینه کار، فشار تزریق، مدول الاستیک خاک، همگرایی و عمق حساس تر است.

در نتیجه فقط این پارامترها برای انجام مراحل بعدی تحقیق به کار رفتند.

چون امکان استفاده از تمام پارامترهای نامبرده برای به دست آوردن رابطه ریاضی به منظور پیش‌بینی میزان نشست زمین ناشی از حفر تونل در محیط‌های رسی میسر نبود، مؤثرترین پارامترها تعیین شدند.

بدین منظور با انجام آزمایش‌های عددی شیب نمودار مربوط به تغییرات نشست نسبت به هر یک از پارامترهای بالا، محاسبه شده و سپس پارامترهایی که نمودار آن‌ها دارای شیب بیشتری است به عنوان مهم‌ترین پارامترها معرفی شده‌اند. با محاسبه شیب در نمودارهای ارائه شده توسط این محققین و اضافه کردن آن به نتایج بررسی تأثیر پارامترهای پیشنهادی توسط نگارندگان (شکل 1)، مؤثرترین پارامترهای نشست مشخص شده‌اند.

از آنجایی که محور افقی این نمودارها واحدهای متفاوتی دارد، ابتدا محور افقی آن‌ها بی‌بعد شده سپس با تعیین نسبت تغییرات در محور Y به تغییرات در محور X ضریب زاویه خط و



شکل 1: نتایج مطالعات پارامتریک عوامل مؤثر بر نشست  
الف: اثر همگرایی؛ ب: اثر فشار تزریق؛ ج: اثر عمق؛ د: اثر مدول الاستیک؛ ه: اثر فشار سینه کار

جدول 4: نتایج محاسبات انجام شده برای تعیین مهم‌ترین پارامترها

$m_1$	$\alpha_1$	$m_2$	$\alpha_2$	$(\alpha_1 + \alpha_2)/2$	پارامتر
-2/72	-70	-1/417	-55	-62/3	فشار سینه کار ( $\text{kN/m}^2$ )
-4	-76	-2/5	-68	-72/1	فشار تزریق ( $\text{kN/m}^2$ )
این پارامتر اثری موقتی و ناچیز بر میزان نشست دارد [2]					وزن Trailer
0/083	5	2/48	68	36/4	طول TBM (m)
1/6	58	2/15	65	61/6	وزن TBM (kN)
-3/95	-76	-1/104	-48	-61/8	زاویه اصطکاک داخلی ( $^\circ$ )
-3	-72	-0/8	-39	-55/1	فشار بیش تحکیمی ( $\text{kN/m}^2$ )
0/111	6	0/0222	1	3/8	نفوذپذیری (m/s)
-1/3	-52	-0/433	-23	-37/9	ویژگی‌های هیدراسیون سیمان ( $\text{kN/m}^2$ )
-2/68	-69/57	-1/86	-61/77	-65/7	مدول الاستیک خاک (MPa)
2/31	66/63	3/14	72/35	69/5	همگرایی
-1/80	-60/98	-2/57	-68/78	-64/9	عمق تونل (m)

جدول 5: دامنه تغییرات در نظر گرفته شده برای پارامترهای مؤثر در نشست سطح زمین

مقدار	فشار تزریق ( $\text{KN/m}^2$ )	فشار سینه کار ( $\text{KN/m}^2$ )	عمق تونل (m)	پارامتر همگرایی [12] (%)	مدول الاستیک خاک [13] (MPa)
حداکثر	300	300	25	0/5	300
متوسط	200	225	18	0/3	200
حداقل	100	150	15	0/1	100

بنابراین تعداد کل حالت‌های ممکن برای 3 پارامتر دیگر در مدل‌سازی‌ها  $3^3$  یعنی 27 حالت خواهد بود. سپس صحت انتخاب تعداد 27 آزمایش عددی بر اساس ارزیابی نتایج تعیین و در صورت نیاز می‌توان به تعداد آزمایش‌ها افزود. در جدول 6 تعدادی از حالات ممکن به‌عنوان نمونه ارائه شده است. جدول 6: برخی از حالت‌های ممکن مدل‌سازی عددی

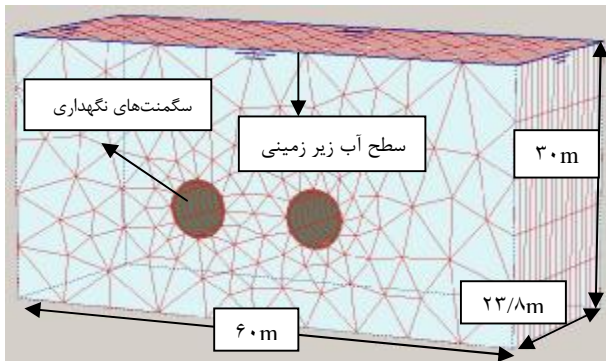
شماره حالت	مدول الاستیک	عمق	همگرایی
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	-	-	+
5	+	+	-
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

#### 4- مدل‌سازی عددی بر اساس مهم‌ترین پارامترهای مؤثر در نشست

بنابر محاسبات انجام شده در مرحله قبل، پارامترهای همگرایی (C)، مدول الاستیک خاک (E)، عمق تونل (D)، فشار تزریق ( $G_p$ ) و فشار سینه کار ( $F_p$ ) انتخاب شد. در این مرحله ابتدا دامنه تغییرات برای هر یک از پارامترها بر اساس مطالعه جامع اطلاعات پروژه‌های حفر تونل مترو با EPB TBM در محیط رسی اشباع از آب انتخاب و سپس برای هر یک از آن‌ها، سه مقدار مختلف حداکثر، حداقل و متوسط مطابق جدول 5 در نظر گرفته و آزمایشات عددی بر اساس آن انجام شد.

به دلیل اینکه مدل‌ها در اعماق مختلفی ساخته می‌شوند و در هر عمق برای پایداری تونل فشار سینه کار و فشار تزریق مطابق با آن عمق نیاز است، مقادیر مناسب این دو پارامتر به‌طور مستقیم با نرم‌افزار برای هر عمق معین محاسبه شد.

پس از ساخت مدل سه بعدی، حفر مرحله به مرحله تونل انجام شد که شکل 2 مدل نهایی و آماده انجام محاسبات را نشان می‌دهد.



شکل 2 مدل سه بعدی ساخته شده نهایی

#### 5- مدل‌های ساخته شده و نتایج آن‌ها

همانطور که در بخش 4 گفته شد، در این تحقیق 27 حالت برای مدل‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است. پس از انجام مدل‌سازی برای هر یک از این موارد، میزان نشست مربوط به هر حالت محاسبه شده است.

جدول 7 تمامی مدل‌های ساخته شده و خروجی‌های گرفته شده برای هر مدل را نشان می‌دهد.

جدول 7: مدل‌های ساخته شده و نتایج آن‌ها

No.	E (MPa)	H (m)	C (%)	F <sub>p</sub> (KN/m <sup>2</sup> )	G <sub>p</sub> (KN/m <sup>2</sup> )	S (mm)
1	100	15	0/1	215	260	3
2	200	15	0/1	215	260	2/55
3	300	15	0/1	215	260	2/2
4	300	15	0/3	215	260	4/5
5	200	15	0/3	215	260	4/9
6	100	15	0/3	215	260	5
7	100	15	0/5	215	260	7/5

+ : مقدار حداکثر

\* : مقدار متوسط

- : مقدار حداقل

#### 4-1 - هندسه مدل

مطابق جدول 5 اغلب تونل‌های مترو در عمق 15 تا 25 متر قرار دارند بنابراین سه عمق مختلف برای مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. این اعماق عبارتند از: 15، 18 و 25 متر.

مدل‌هایی که تونل در عمق 15 متر و 18 متر است، دارای عرض 60 متر و ارتفاع 30 متر و مدل‌های با تونل واقع در عمق 25 متر دارای عرض 60 متر و ارتفاع 40 متر هستند. طول مدل‌ها در جهت عمود بر صفحه نیز 23/8 متر بر اساس محاسبه تعیین شد.

#### 4-2 - مش‌بندی سه بعدی

در ساخت مش‌بندی سه بعدی به منظور مدل کردن فرآیند ساخت تونل، حفر 17 برش و هر یک به طول 1/4 متر (عرض سگمنت و طول یک گام حفاری) مدل شده است. برای مدل‌هایی با تونل واقع در عمق 15 متر و 18 متر، یک مدل سه بعدی با تعداد 3366 المان 15 گره‌ای و تعداد کل 10701 گره و برای مدل مربوط به عمق 25 متر یک مدل سه بعدی با تعداد 4998 المان 15 گره‌ای، و تعداد کل 15185 گره ساخته شد.

ادامه جدول 7

8	200	15	0/5	215	260	7
9	300	15	0/5	215	260	6/75
10	100	18	0/1	230	275	2/86
11	200	18	0/1	230	275	2/39
12	300	18	0/1	230	275	2/86
13	100	18	0/5	230	275	8/95
14	200	18	0/5	230	275	7/49
15	300	18	0/5	230	275	5/95
16	100	18	0/3	230	275	5/75
17	200	18	0/3	230	275	5/4
18	300	18	0/3	230	275	4/83
19	100	25	0/1	418	500	2/45
20	300	25	0/1	418	500	1/97
21	300	25	0/5	418	500	6/68
22	100	25	0/5	418	500	7/3
23	200	25	0/1	418	500	2/03
24	200	25	0/5	418	500	7/38
25	100	25	0/3	418	500	4/45
26	200	25	0/3	418	500	4/72
27	300	25	0/3	418	500	4/7

No: شماره مدل E: مدول الاستیک خاک (MPa) H: فاصله مرکز تونل تا سطح زمین (m) C: همگرایی (%) F<sub>p</sub>: فشار سینه کار  
G<sub>p</sub>: فشار تزریق (KN/m<sup>2</sup>) S: حداکثر نشست سطح زمین (mm)

C: همگرایی (%)

6- مدل آماری ارائه شده با استفاده از رگرسیون چند متغیره

H: فاصله مرکز تونل تا سطح زمین (m)

برای به دست آوردن مدلی آماری که بتواند مقدار متغیر وابسته (نشست)، را با متغیرهای مستقل (پارامترهای معرفی شده) توضیح دهد، از روش رگرسیون چندمتغیره استفاده شده است و برای این کار از نرم افزار SPSS کمک گرفته شده است.

E: مدول الاستیک خاک (MPa)

F<sub>p</sub>: فشار سینه کار (KN/m<sup>2</sup>)

مدل آماری به دست آمده مطابق رابطه 1 است:

S: فشار تزریق (KN/m<sup>2</sup>)

در جدول 8 مقادیر ضریب همبستگی و ضریب همبستگی اصلاح شده مدل نشان داده شده است. مقادیر بالای R<sup>2</sup> و R<sup>2</sup> اصلاح شده، نشان از تأثیر زیاد متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته دارد.

$$S = 12.163 C - 0.004 E - 1.305 \times 10^{-7} \times H \times G_p \times F_p + 2.459 \quad (1)$$

که در این رابطه پارامترهای زیر به کار رفته است:

جدول 8: مقادیر ضریب همبستگی و ضریب همبستگی اصلاح شده مدل

R	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> اصلاح شده	خطای استاندارد تخمین
0/975	0/951	0/941	0/5217

جدول (9) و جدول (10) خروجی های نرم افزار را نشان می دهند که در انجام آزمایش های آماری از آن ها استفاده می شود.

جدول 9: خلاصه اطلاعات آماری مدل

اهمیت	F	میانگین مربعات	مجموع مربعات	
00/0	149/86	24/727	74/181	رگرسیون
		0/165	3/811	باقیمانده
			77/992	مجموع

جدول 10: خلاصه ضرایب پارامترهای مدل و پارامترهای مؤثر بر آن

اهمیت	t	خطای استاندارد	b	
0/000	5/590	0/440	2/459	مقدار ثابت
0/019	-2/639	0/002	0/004	E
0/000	16/151	0/753	12/163	C
0/048	-2/168	0/000	-1/305E-7	H, G <sub>p</sub> , F <sub>p</sub>

انجام آزمایش F برای بررسی کلی مدل:

$$F_{(Model)} = \frac{74.181/3}{3.811/23} = 149.86 > 3.03 = F_{0,0}^{(3)}$$

در نتیجه مدل به صورت کلی پذیرفته می شود.

انجام آزمایش T برای بررسی تک تک پارامترها:

$$t_{\left(\frac{m-k}{n}\right)} = t_{\left(\frac{27-4}{23}\right)} = 2.0$$

با توجه به اینکه  $t_{\left(\frac{m-k}{n}\right)} = 2.0$  از تمام

tهای مربوط به مدل کوچک تر است، در نتیجه در سطح اطمینان 95 درصد، مدل قابل قبول است.

6-1-2- اعتبار سنجی رابطه با استفاده از برداشت های واقعی

6-1-1 اعتبار سنجی مدل آماری

پس از به دست آوردن رابطه ای که بتواند مقدار متغیر وابسته را با ضریب همبستگی بالا توضیح دهد، لازم است که این مدل اعتبارسنجی شود. در این تحقیق مدل به دست آمده با دو رویکرد بررسی شده است. در رویکرد اول با استفاده از آزمایش های آماری F, T، مدل ارزیابی شده است. در رویکرد دوم مقداری که مدل آماری پیشنهاد می دهد با مقادیر واقعی مقایسه شده است.

6-1-1- اعتبارسنجی با استفاده از آزمایش های آماری

در این روش ابتدا با استفاده از آزمایش F کل مدل مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس با استفاده از آزمایش T، اهمیت هر متغیر به صورت جداگانه بررسی شده است.



در این مرحله تعدادی از داده‌های واقعی نشست مربوط به متروی شیراز برای اعتبارسنجی رابطه ارائه شده، مورد استفاده قرار گرفته است.

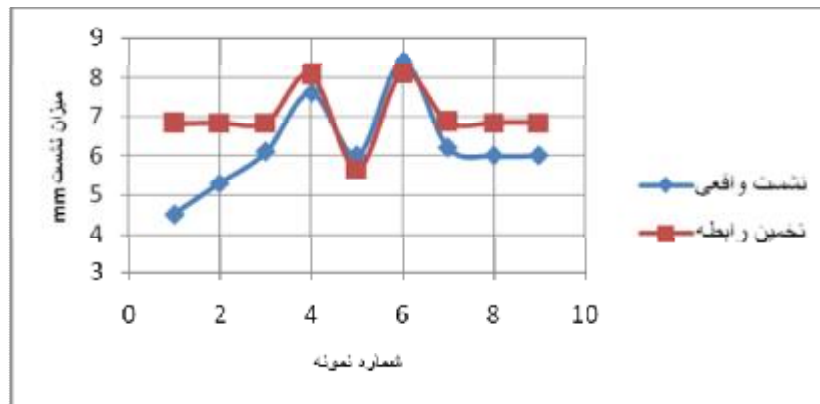
در جدول 11 اطلاعات مربوط به متروی شیراز برای دو TBM فعال در محل و مقدار نشست برداشت شده با استفاده از ابزاربندی [14] و همچنین میزان نشست که مدل برای این

شرایط پیشنهاد می‌دهد به همراه میزان خطای این تخمین ارائه شده است. همچنین نتایج رابطه‌ی ارائه شده و داده‌های واقعی متروی شیراز در شکل (3) نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل 3 ملاحظه می‌شود رابطه ارائه شده در اکثر نقاط، مقدار نشست را با خطای قابل قبولی تخمین می‌زند.

جدول 11: مقایسه تخمین رابطه ارائه شده و داده‌های واقعی مترو شیراز

No.	E (MPa)	H (m)	C (%)	$F_p$ ( $KN/m^2$ )	$G_p$ ( $KN/m^2$ )	S (mm)	تخمین مدل (mm)	خطا (%)
1	100	20	0/4	190	230	4/5	6/81	/34
2	100	20	0/4	170	210	5/3	6/83	/89
3	100	20	0/4	160	200	6/1	6/84	/14
4	100	20	0/5	150	180	7/6	8/07	6/18
5	100	20	0/3	140	170	6	5/65	5/90
6	100	15	0/5	120	150	8/4	8/11	3/51
7	100	20	0/4	150	180	6/2	6/85	/54
8	100	20	0/4	160	200	6	6/84	/01
9	100	20	0/4	160	200	6	6/84	/01



شکل 3: مقایسه تخمین نشست با استفاده از رابطه ارائه شده و داده‌های واقعی مترو شیراز

سطح آب زیرزمینی پایین‌تر از سایر نقاط است، خطای تخمین، بیش‌تر از سایر نقاط خواهد بود. به عبارت دیگر با فاصله گرفتن زمین‌شناسی منطقه از زمین‌شناسی مدل ساخته شده، مقدار خطای تخمین افزایش خواهد یافت و هرچه شرایط زمین-

در دو مورد اول، نشست ارائه شده توسط رابطه دارای خطای قابل توجه‌ای است که این مسئله به این صورت قابل توجیه است که چون این مدل‌ها در شرایط اشباع از آب ساخته شده‌اند، رابطه ارائه شده بیشترین کارایی را در شرایط اشباع از آب دارد. چون در محل ابزاربندی شده مترو در این دو نقطه

متغیر وابسته را به خوبی نشان می‌دهد، می‌تواند برای پیش‌بینی میزان نشست استفاده شود.

نتایج اعتبارسنجی مدل با داده‌های واقعی مترو شیراز نشان می‌دهد که مقدار خطای تخمین در تمام نقاطی که شرایط زمین‌شناسی آن‌ها مشابه شرایط مفروض این مطالعه است، کمتر از 20% بوده که تأییدکننده کارایی مدل است.

چون مدل‌های در شرایطی خاصی - تونل مستقیم حفر شده در محیط رسی اشباع از آب - ساخته شده‌اند، رابطه ارائه شده بیشترین کارایی را در این شرایط دارد و هرچه شرایط واقعی از این شرایط فاصله بگیرد، خطای تخمین نیز افزایش خواهد یافت.

شناسی واقعی به شرایط زمین‌شناسی مدل نزدیک‌تر باشد تخمین دقیق‌تری را خواهیم داشت.

## 7- نتیجه‌گیری

پارامترهای مؤثر بر نشست عبارتند از: وزن Trailer، طول TBM، وزن TBM، زاویه اصطکاک خاک، درجه بیش تحکیم یافتگی خاک، نفوذپذیری خاک، ویژگی‌های هیدراسیون سیمان، فشار سینه‌کار، فشار تزریق، پارامتر همگرایی، مدول الاستیک خاک و عمق تونل که پارامترهای فشار سینه‌کار، فشار تزریق، همگرایی، مدول الاستیک خاک و عمق تونل بیشترین تأثیر را بر نشست دارند.

نتایج آزمایش‌های آماری نشان می‌دهد که مدل آماری ارائه شده با ضریب همبستگی 95% که تأثیر متغیرهای مستقل بر

## منابع

in Clays" journal of geotechnical and geoenvironmental engineering 1998.

[7] Attewell. P. B, Farmer. I. W; "Ground Deformations Resulting from Shield Tunnelling in London Clay." *Can. Geotech. J.*, Ottawa, Canada 1974.

[8] Attewell, P. B, Woodman, J. P; "Predicting the Dynamics of Ground Settlement and its Derivatives by Tunnelling in Soil." *Ground Engrg* 1982.

[9] Moller. Sven Christian; "Tunnel Induced Settlements and Structural Forces in Linings" Doctoral Thesis, Institute for Geotechnics, Stuttgart University, 2006.

[10] Sweeney, Paul." A Study of Interaction Effects due to Bored Tunnels in Clay" Doctoral Thesis, University of Dublin, Trinity College, 2006.

[11] Bamrah Company, Shiraz Metro Project "Characteristic of EPB Shield TBM Employed in Shiraz Metro Project", 2005.

[12] Brinkgreve .R.B.J, Broere .W; "PLAXIS 3D TUNNEL Tutorial Manual version 2" Delft University of Technology & PLAXIS B.V., The Netherlands, 2002.

[13] Atkinson. J; "The Mechanics of Soils and Foundations", Taylor & Francis e-Library 2007.

[14] Bamrah Company, Shiraz Metro Project "Settlement Control Report", 2008.

[1] Toan .N.D; "TBM and Lining Essential Interface". M.Sc Thesis: Politecnico di Torino, Italy 2006.

[2] Kasper.T, Meschke.G; "On the Influence of Face Pressure, Grouting Pressure and TBM Design in Soft Ground Tunneling" Institute for Structural Mechanics, Ruhr University Bochum, Universitätsstrabe 150, 44780 Bochum, Germany, 2006.

[3] Kasper.T, Meschke.G; "A Numerical Study of the Effect of Soil and Grout Material Properties and Cover Depth in Shield Tunnelling" Institute for Structural Mechanics, Ruhr University Bochum, Universitätsstrabe 150, 44780 Bochum, Germany, 2006.

[4] Havaej. M, Rahmannedjad. R, Ebrahimi Farsangi. MA "An Equation to Predict Ground Surface Settlement, due to Metro Tunneling Using EPB TBM. (Case Study: Shiraz Metro)".

[5] Mroueh .H, Shahrour. I; "A Simplified 3D Model for Tunnel Construction Using Tunnel Boring Machines." Laboratoire de Me'canique de Lille, Universite' des Sciences et Technologies de Lille, F-59655 Villeneuve d'Ascq, France 2008.

[6] Loganathan. N, Poulos. H. G; "Analytical Prediction for Tunneling- Induced Ground Movement