

تحلیل سه بعدی اثر مشخصات هندسی سگمنت‌های بتنی در حفاری تونل به روش EPB TBM در نشست سطح زمین

حسن شرفی* (استادیار)

امین فلاحي (کارشناس ارشد)

الهه مرادی (کارشناس ارشد)

محمد حاجی عزیزی (دانشیار)

دانشکده فنی و مهندسی، دانشکده عمران، دانشگاه رازی

مهندسی عمران شریف، (بهار ۱۳۹۷)
دوره ۲ - ۳۴، شماره ۱/۱، ص. ۱۱۴-۱۰۷، (پادداست فنی)

در نوشتار حاضر، به بررسی آثار طول و ضخامت سگمنت‌های بتنی اجرا شده در تونل در نشست‌های عرضی و طولی سطح زمین پرداخته شده است. در انجام آنالیزها از روش اجزاء محدود (FE) با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. در پژوهش حاضر، ابتدا نتایج به دست آمده از مدل ساخته شده در نرم‌افزار ABAQUS جهت صحت‌سنجی با نتایج تجربی و مشاهده‌های محلی برای قطعه‌ی ۲۸-۵۵ از خط ۱ متروی میلان مقایسه شده است. در نهایت، اثر ضخامت و طول سگمنت‌های بتنی که به کمک دستگاه EPB TBM نصب شده‌اند، در نشست سطحی بررسی شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند با افزایش ضخامت و نیز افزایش طول قطعات و به تبع آن افزایش طول گام‌های حفاری در روش ذکر شده از تونل‌زنی، هم در راستای طولی و هم راستای عرضی تونل، مقدار نشست‌های سطحی کاهش می‌یابند که به دلیل افزایش سختی محیط به علت اجرای پوشش تونل است. همچنین با افزایش ضخامت و طول سگمنت‌ها، افت حجمی ایجاد شده در اثر حفاری تونل کاهش می‌یابد.

h-sharafi@razi.ac.ir
aminfallahi@yahoo.com
e.moradi1989@yahoo.com
mhazizi@yahoo.com

واژگان کلیدی: نشست، EPB TBM، سگمنت بتنی، تونل، اجزاء محدود.

۱. مقدمه

طراحی تونل‌های سطحی، تخمین و کنترل نشست‌های حاصل مذکور در سطح زمین است. نشست سطحی ایجاد شده در اثر حفر تونل، به صورت شکل ۱ نمایش داده می‌شود.^[۶]

رویکردهای مختلفی توسط دانشمندان و پژوهشگران مختلف برای تعیین بیشینه‌ی نشست سطح زمین در امتداد محور تونل ارائه شده است. نشست‌های مذکور می‌توانند به کمک روش‌های تجربی و نیمه‌تجربی،^[۷-۱۳] روش‌های تحلیلی،^[۱۴-۲۰] و روش‌های عددی،^[۲۱-۲۳] تعیین شوند.

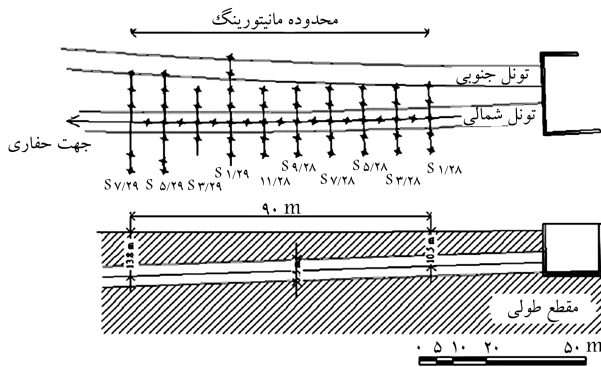
نشست رخ داده در سطح زمین ناشی از حفر تونل به کمک دستگاه EPB TBM از نظر بزرگی و شکل نموداری به عوامل متعددی، از جمله: عمق تونل، فشار سینه‌ی کار، فشار تزریق، هندسه‌ی تونل، نوع نگهدارنده و مشخصات هندسی و مکانیکی آن بستگی دارد. اما آنچه که در روش‌های تجربی و نیمه‌تجربی به چشم می‌خورد، اختلاف‌های قابل توجهی است که در تخمین نشست توسط روش‌های مذکور وجود دارد. زیرا روش‌های تجربی مختلف قادر به در نظر گرفتن تمامی پارامترهای موجود نیستند و نیز از تفاسیر و مفروضات متفاوتی برای تخمین نشست بهره می‌گیرند، لذا قادر به حل دقیق مسائل پیچیده نخواهند بود. به همین دلیل،

کمبود فضاهای شهری در مقایسه با تقاضای روزافزون جوامع، سبب بهره‌گیری از فضاهای مذکور به کمک احداث سازه‌های زیرزمینی شده است. یکی از متداول‌ترین حفاری‌های ذکر شده، تونل متروهاست که با هدف تسهیل در عبور و مرور و سرعت بخشی به آن ساخته می‌شوند. اما حفاری‌های مذکور با حجم وسیع که عمدتاً در اعماق کم از سطح زمین و در داخل خاک‌های نرم انجام می‌شوند، باعث حرکت خاک به سمت فضای خالی ایجاد شده می‌شوند؛ و در نتیجه‌ی آن، وضعیت جدیدی از کرنش‌ها پدید می‌آید که به صورت نشست‌های قائم در سطح زمین نمایان می‌شود.^[۱-۵] در صورتی که نشست‌های مذکور، جزئی از مقدار مجاز بیشتر شوند، باعث ایجاد خسارت در سازه‌های سطحی اعم از ساختمان‌ها و تأسیسات شوند. لذا کنترل آنها به منظور حفاظت از سازه‌های سطحی در حین حفاری تونل و پس از آن، مهم‌ترین مسئله‌ی است که توسط مهندسان طراح همواره مدنظر قرار می‌گیرد. بنابراین یکی از مهم‌ترین جنبه‌های

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۴/۹/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۵/۲/۲۵، پذیرش ۱۳۹۵/۵/۳.

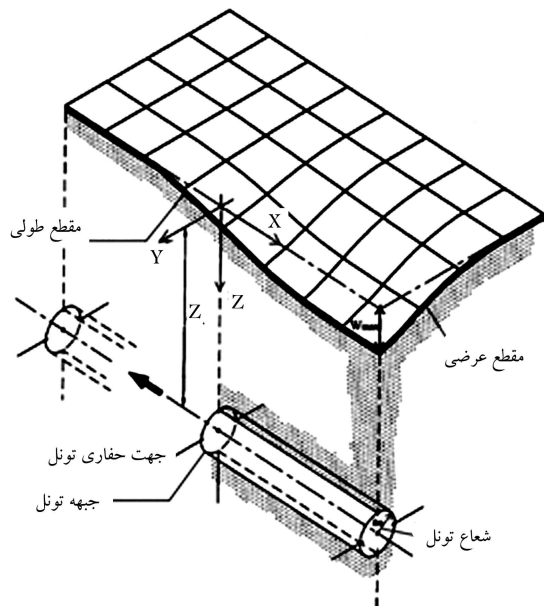
DOI:10.24200/J30.2018.1453



شکل ۲. نقشه و مقطع طولی ناحیه‌ی موردنظر از خط ۱ متروی میلان.

جدول ۱. مشخصات مصالح.

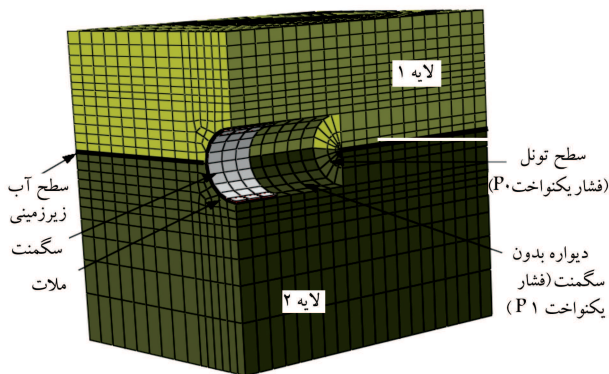
ملاط	پوشش بتنی	لایه‌ی دوم	لایه‌ی اول	وزن مخصوص (KN/m ³)
۲۵	۲۵	۱۸	۲۲	۲۵۰۰۰
۱۵	۲۵۰۰۰	۷۵	۱۰۰	۰/۳
۰/۲	۰/۲	۰/۳	۰/۳	زاویه‌ی اصطکاک داخلی (°)
		۳۰	۳۰	زاویه‌ی اتساع (°)
		۱۰	۱۰	



شکل ۱. نشست سطحی ایجاد شده در اثر حفر تونل. [۶]

بهره‌گیری از روش‌های عددی به منظور افزایش سرعت و دقت محاسبات به ویژه در مسائل پیچیده، کاربرد ویژه‌ی یافته است. [۲]

در پژوهش حاضر پس از صحت‌سنجی مدل سه‌بعدی ساخته شده در نرم‌افزار ABAQUS با نتایج حاصل از روابط تجربی و مشاهدات محلی در قطعه‌ی S5-28 از خط ۱ متروی میلان، به بررسی اثر ضخامت و طول سگمنت‌های بتنی که دو عامل مهم در تعیین سختی لاینینگ هستند، پرداخته شده است.



شکل ۳. مدل اجزاء محدود.

۲. مشخصات قطعه‌ی S5-28 از خط ۱ متروی میلان

خط ۱ متروی زیرزمینی میلان برای ایجاد ارتباط شهر میلان و ناحیه‌ی مسکونی متروپل شمالی احداث شده است. خط مذکور از منطقه‌ی با تراکم جمعیتی بالا می‌گذرد و از ۲ تونل سطحی با عمق‌های متفاوت ۸ و ۱۹ متر و با پیشینه‌ی فاصله‌ی محور به محور ۴۰ متر با ۲ ایستگاه شفت میانی ساخته شده است. طول کلی تونل‌ها در حدود ۲/۱ کیلومتر است و روش حفاری استفاده شده با توجه به مطالعات ژئومکانیکی صورت گرفته به روش TBM EPB مناسب تشخیص داده شده است. نگهدارنده از نوع لاینینگ پیش‌ساخته‌ی بتنی است که ضمن حفاری به صورت سگمنت‌های بتنی به وسیله‌ی دستگاه در محل نصب می‌شوند. فاصله‌ی میان لاینینگ و دیواره‌ی حفاری به وسیله‌ی تزریق گروت پر شده است. شکل ۲، نشان‌دهنده‌ی نقشه و مقطع طولی ناحیه‌ی موردنظر از خط ۱ متروی میلان است.

مشخصات مکانیکی و فیزیکی مورد استفاده در مدل‌های عددی و آنالیزهای خاک حفر شده با بهره‌گیری از نتایج مطالعات و پژوهش‌های ژئوتکنیکی و جزئیات موجود تعیین و مشخصات مذکور برای خاک ۲ لایه‌ی موجود در جدول ۱ گزارش شده است. اندازگیری‌های محلی به منظور کنترل نشست‌های سطحی در ۳۵۰ نقطه‌ی کلی برای خط مذکور صورت گرفته است، که تعداد ۶۲ نقطه از آنها به عنوان نقاط کنترل توپوگرافی سطحی مطابق با شکل ۳ در امتداد سرتاسری سطحی و نزدیک به محور تونل نصب شده‌اند. [۶]

۳. روش‌های تجربی و تحلیلی تخمین نشست

داده‌های مشاهده‌ی در محل طی فازهای مختلف حفاری با منحنی‌های نشست حاصل از روابط تجربی، تحلیلی و عددی مقایسه شده‌اند. برای این منظور، روش‌های تحلیلی و تجربی مورد استفاده به صورت مختصر در ادامه، شرح داده شده‌اند.

۱.۳. روش پک

فرمول تجربی که به صورت گسترده و پرکاربرد در امور مهندسی فضاهای زیرزمینی به کار می‌رود، رابطه‌ی پک^۱ است، که در آن پروفیل نشست سطحی در امتداد محور تونل با تابعی، که توزیع نرمال گاوس دارد، تخمین زده می‌شود (رابطه‌ی ۱). [۲۶]

$$w(y) = w_{\max} e^{-\frac{y^2}{r_s^2}} \quad (1)$$

که در آن، از w_{max} رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$w_{max} = \frac{v_s}{i\sqrt{2\pi}} \quad (2)$$

که در آن، w_{max} بیانگر بیشینه نشست در بالای محور تونل، i نقطه‌ی عطف منحنی نشست و v_s نشست حجمی واحد است.

۲.۳. روش ساجاستا

در روش ارائه شده‌ی ساجاستا^۲، حرکت قائم خاک در صفحه‌ی عمود بر محور تونل (w_y) و نیز در صفحه‌ی طولی تونل (w_x) می‌توانند به کمک روابط ۳ و ۴ تعیین شوند:^[۲۵،۱۵،۱۲]

$$w_y = \frac{v_s}{\pi} \frac{z_0}{y^2 + z_0^2} \quad (3)$$

$$w_x = \frac{v_s}{2\pi z_0} \left(1 + \frac{x}{\sqrt{z_0^2 + x^2}} \right) \quad (4)$$

که در آنها، v_s افت حجمی (نسبتی از حجم نشست یافته‌ی سطحی به اِزاء هر متر از ناحیه‌ی حفاری شده) و z_0 عمق محور تونل است.

بعدها روش مذکور توسعه یافت، به گونه‌ی که پارامترهای بیشتری را در نظر می‌گرفت،^[۲۶] بیان کلی تغییر مکان سطحی قائم در محل به صورت رابطه‌ی ۵ است:

$$w_y = 2\varepsilon a_0 \left(\frac{a_0}{z_0} \right)^{2\alpha-1} \frac{1}{(1+y'^2)^\alpha} \left(1 + \frac{1-y'^2}{1+y'^2} \right) \quad (5)$$

که در آن، ε انقباض شعاعی و برابر با $\frac{u_0}{a_0}$ ، u_0 جابه‌جایی شعاعی یکنواخت، a_0 شعاع تونل، y' فاصله از مرکز تونل و مقیاس شده با عمق z_0 تونل و α مؤلفه‌ی قابلیت فشردگی حجمی است.

۳.۳. روش رویجت و بوکر

روش ارائه شده‌ی رویجت و بوکر^۳ بیانگر روشی تحلیلی برای تخمین نشست محلی ناشی از حفر تونل در یک خاک با قابلیت فشردگی است.^[۱۶] نشست افقی و قائم در روش مذکور به صورت تابعی از افت شعاعی یکنواخت زمین به صورت رابطه‌ی ۶ بیان می‌شود:

$$w_{(y,z)} = -\varepsilon \cdot a_0^2 \left(\frac{z_1 z_2}{r_1^2 r_2^2} \right) + \delta \cdot a_0^2 \left[\frac{z_1 (k y^2 - z_1^2)}{r_1^2} + \frac{z_2 (k y^2 - z_2^2)}{r_2^2} \right] + 2\varepsilon \cdot a_0^2 \left[\frac{(m+1)z_2}{r_1^2} + \frac{mz(z_1^2 - z_2^2)}{r_2^2} \right] - 2\delta \cdot a_0^2 \cdot z_0 \left[\frac{(y^2 - z_1^2)}{r_1^2} + \frac{m}{m+1} \frac{2 \cdot z_2 \cdot z_1 (3y^2 - z_1^2)}{r_2^2} \right] \quad (6)$$

که در آن، ε و δ پارامترهای مشخص کننده‌ی جابه‌جایی نسبی سطحی تونل و $r_1^2 = y^2 + z_1^2$ ، $r_2^2 = y^2 + z_2^2$ ، $z_2 = z + Z_0$ ، $z_1 = z - Z_0$ و $K = v(1-v)$ ، $m = (1-2v)^{-1}$ است. v نسبت پواسون خاک، a_0 و z_0 به ترتیب شعاع و عمق تونل هستند. در سطح زمین، نشست قائم (w_y) به صورت رابطه‌ی ۷ بیان می‌شود:

$$w_y = 4\varepsilon \cdot a_0^2 (1-v) \frac{z_0}{y^2 + z_0^2} - 2\delta \cdot a_0^2 \cdot z_0 \frac{y^2 - z_0^2}{(y^2 + z_0^2)^2} \quad (7)$$

با انتگرال‌گیری از رابطه‌ی ۷، می‌توان مقدار نشست زمین (A) را از رابطه‌ی ۸ به دست آورد:

$$A = 4(1-v)\varepsilon\pi R^2; \varepsilon = \frac{v_s}{4(1-v)} \quad (8)$$

که در آن، v_s افت حجمی و قابل بیان به صورت نسبتی از حجم نشست در هر متر و حجم حفاری شده به اِزاء واحد متر از پیشرفت تونل است.

۴.۳. روش لوگانتان و پلوس

در روش لوگانتان و پلوس^۴، رابطه‌ی ۹ را داریم:

$$w_y = 4(1-v)a_0^2 \frac{z_0}{z_0^2 + y^2} \frac{4ga_0 + g^2}{4a_0^2} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{3.8y^2}{(z_0 + a_0^2)^2}\right] \quad (9)$$

که در آن، g پارامتر گپ است و از مجموع ۳ مؤلفه‌ی G_p و U_{rD}^* و ω مطابق رابطه‌ی ۱۰ به دست می‌آید:

$$g = G_p + U_{rD}^* + \omega \quad (10)$$

که در آن، G_p فاصله یا گپ فیزیکی که مساوی با فاصله‌ی هندسی بین پوسته‌ی بیرونی سپر تا لاینینگ است، U_{rD}^* تغییر شکل کشسان خمیری سه بعدی معادل در جهه‌ی تونل و ω نیز مقداری بین کمینه‌ی مساوی با $G_p/6$ و بیشینه‌ی مساوی با جابه‌جایی تاج تونل است.^[۲۷،۱۷]

۵.۳. روش اوتنو

در روش نیمه تجربی اوتنو^۵ جابه‌جایی سطحی قائم در امتداد مقطع عرضی تونل مطابق رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود:^[۲۸،۱۲]

$$w_y = \Psi \frac{\gamma(2a_0)^2}{E} (0.185 - v) e^{-\frac{y^2}{r_0^2}} \quad (11)$$

که در آن، i بیانگر موقعیت نقطه‌ی عطف منحنی نشست و قابل تخمین از رابطه‌ی $i = a_0 \eta (1.05 \frac{z_0}{r_0} - 0.42)$ ، Ψ یک پارامتر تجربی، E مدول کشسانی خاک، a_0 شعاع تونل و v نسبت پواسون است.

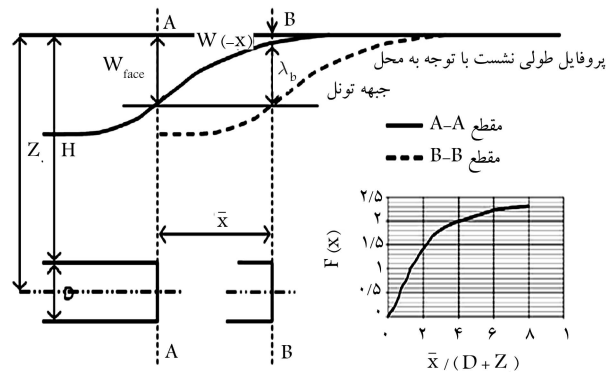
۶.۳. روش رومو و دیاز

رومو و دیاز^۶ فرمولی تجربی پیشنهاد کرده‌اند که از تحلیل‌های اجزاء محدود حاصل می‌شود و به کمک آن می‌توان نشست در امتداد محور تونل را مطابق رابطه‌ی ۱۲ پیش‌بینی کرد.^[۲۹]

$$\lambda_b(\bar{X}) = (0.10083 - 0.10014 \frac{z_0}{H})(\sigma_h - P)F(\bar{x})(Z_0 + D) \frac{\varepsilon_f}{\sigma_f} \quad (12)$$

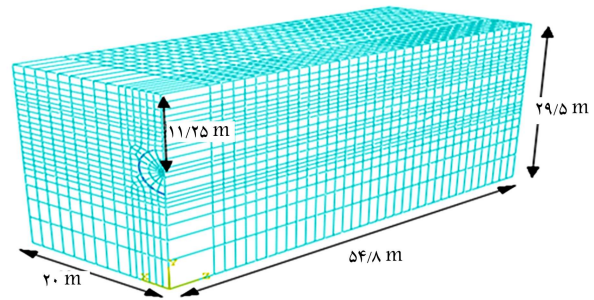
که در آن، λ_b مساوی با نشست در مقطع B-B (مطابق شکل ۴) پس از عبور از مقطع A-A است که تا مقطع B-B جهه‌ی تونل است، Z_0 عمق محور تونل، H سربار تونل، D قطر تونل، σ_h تنش افقی در محور تونل، P فشار مؤثر در جهه‌ی کار، σ_f متوسط مقدار مقاومت از سطح زمین تا کف تونل، ε_f متوسط مقدار کرنش در شکست از سطح زمین تا کف تونل و $F(\bar{X})$ تابعی است که وابسته به فاصله‌ی بین مقطع A-A و مقطع B-B (شکل ۴) است.

• گام دوم (فاز حفاری اولیه‌ی نظیر به حفاری با طول حفاری ۵/۶ متر): در این گام باری با توزیع یکنواخت P_0 بر جبهه‌ی کار و نیز بار دیگری با توزیع یکنواخت P_1 هم‌زمان با حذف المان‌های حفر شده بر دیواره‌ی حفاری اعمال می‌شوند (شکل ۴ الف). بار P_0 اعمال شده بر جبهه، مقدار 100 کیلوپاسکال دارد، تا بتوان به کمک آن فشار ناشی از محفظه‌ی حفاری در دستگاه EPB در قسمت جبهه‌ی کار را شبیه‌سازی کرد. این مقدار برابر با متوسط تنش‌های افقی مؤثر بر جبهه‌ی تونل و با فرض ضریب ثابت 0.46 از تنش‌های قائم حاصل شده است. بار P_1 نیز 50 کیلوپاسکال بوده و به المان‌های بدون نگهدارنده (ممتناظر با ناحیه‌ی سپر EPB) به منظور شبیه‌سازی اثر محصورکنندگی ناشی از تزریق بتن بین دیواره‌ی تونل و سپر دستگاه حفاری شده است. بار P_0 بر جبهه‌ی تونل و نیز P_1 بر دیواره‌ی تونل اعمال می‌شود، اما طول حفاری در هر گام ثابت و مساوی با 1.4 متر است (شکل ۴ ب).



شکل ۴. شرایط ژئوتکنیکی و مقادیر F در روش رومو و دیاز. [۲۹]

• گام‌های سوم تا هفتم (فازهای حفاری): این گام‌های محاسباتی مشابه با گام دوم هستند. بدین صورت که فشارهای یکنواخت P_0 بر جبهه تونل و نیز P_1 بر دیواره‌ی تونل اعمال می‌شوند، اما طول حفاری در هر گام ثابت و مساوی با 1.4 متر است (شکل ۴ ب).



شکل ۵. مدل اجزاء محدود سه‌بعدی.

• گام‌های هشتم تا بیست و پنجم (فازهای اعمال نگهدارنده و حفاری): طی این گام‌ها، المان‌های نگهدارنده به صورت هم‌زمان با حذف بار المان‌های تونل فعال می‌شوند. جبهه‌ی کار همچنان تحت نگهداری با فشار ثابت P_0 است، در حالی که دیواره‌ی تونل فقط در نزدیکی جبهه‌ی تونل (در فاصله‌ی برابر با 8.4 متر) تحت اثر بار P_1 واقع می‌شود (شکل ۴ ج).

۴. مدل اجزاء محدود سه‌بعدی (FEM)

در بخش حاضر، ساخت مدل به کمک یک کد ABAQUS اجزاء محدود سه‌بعدی به منظور تحلیل یکی از تونل‌های قطعه‌ی S5-28 از خط ۱ متروی میلان با نصب نگهدارنده‌ی دائمی، هم‌زمان با حفر آن به صورت گام به گام صورت گرفته است. در مدل‌سازی تونل موردنظر به علت تقارن در هندسه و بارگذاری، فقط نیمی از کل خاک و تونل مدل شده‌اند. ابعاد مدل طوری انتخاب شده‌اند که از تأثیر منفی مرزها در نتایج آنالیزها کاسته شود. ابعاد مدل به صورت $20 \times 29.5 \times 54.8$ متر و قطر تونل حفر شده با سربار 8 متر مساوی 6.75 متر بوده است (شکل ۵). همچنین شرایط مرزی در اطراف مدل به صورت غلطکی و در کف آن به صورت مفصلی بوده است. المان‌های انتخاب شده برای خاک از نوع C3D8 (المان‌های پیوسته‌ی سه‌بعدی ۸ گره‌ی) و برای سگمنت از نوع C3DAI (المان‌های پیوسته‌ی سه‌بعدی ۸ گره‌ی با در نظر گرفتن حالت shear looking) است. سربار 8 متر برابر با متوسط سربار در ناحیه‌ی ۲۸ از منطقه‌ی موردنظر است. رفتار خاک به صورت کشسان خمیری کامل و معیار گسیختگی لحاظ شده‌ی موهر-کولمب است. المان‌های بتن و ملات، رفتار کشسان دارند. مشخصات مکانیکی و فیزیکی مفروض برای المان‌های خاک، بتن لاینیگ و ملات در جدول ۱ ارائه شده‌اند. شبیه‌سازی عددی حاصل برای مدل‌سازی 37.8 کیلومتر از طول تونل با استفاده از روش گام به گام مطابق با مراحل شرح داده شده در ادامه (در 25 گام کلی) صورت گرفته است:

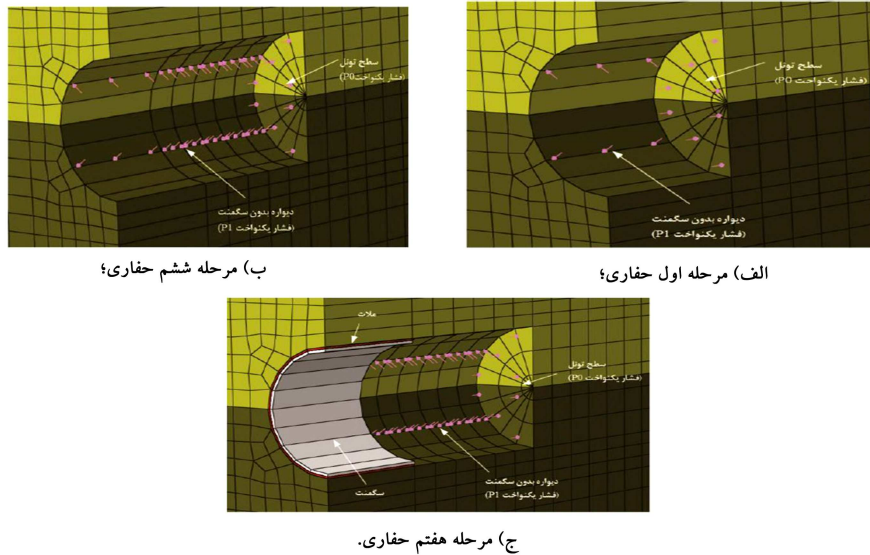
۵. مقایسه‌ی نتایج تجربی، تحلیلی و عددی

پس از مدل‌سازی قطعه‌ی S5-28 از خط ۱، به مقایسه‌ی نشست‌های سطحی حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی اجزاء محدود انجام شده با نتایج تجربی و تحلیلی پرداخته شده است. جابجایی‌های حاصل از روابط تحلیلی و تجربی نیازمند تعریف پارامترهای متداول در هر کدام از روش‌های مذکور هستند. از جمله پارامترهای مذکور، مشخصه‌های هندسی (مانند: عمق و قطر تونل) و پارامترهای معرف جنس مصالح (مانند: مدول یانگ، نسبت پواسون و ...) و نیز دیگر پارامترهای مرسوم در هر روش (مانند: افت خاک، گب، محل نقطه‌ی عطف و ...) است. این مقادیر در جدول ۲ با بهره‌گیری از مشاهدات و اندازه‌گیری‌های محلی و مطابق با آنچه که در متون علمی در تعریف آنها آمده است، گزارش شده‌اند. [۶] در شکل ۷، نشست قائم سطح زمین در جهت طولی به دست آمده و در شکل ۸، نشست قائم سطح زمین در جهت عرضی به دست آمده از پژوهش حاضر با نتایج مانیورینگ و نتایج به دست آمده از مطالعات عددی انجام شده توسط میگلایازا و همکاران، مقایسه شده‌اند. [۶]

مطابق شکل‌های ۷ و ۸، نتایج به دست آمده از پژوهش حاضر با نتایج مانیورینگ و نتایج عددی میگلایازا و همکاران، [۶] تطابق داشته و مقدار ریشه‌ی عددی میانگین مربع خطا (RMSE) محاسبه شده بین نتایج پژوهش حاضر با نتایج مانیورینگ در دو شکل ۶ و ۷ به ترتیب مساوی با 1.24 و 0.58 به دست آمده است.

در ادامه، جهت بررسی تأثیر مشخصات هندسی به ازاء ۳ مقدار متفاوت ضخامت (ضخامت‌های 0.15 ، 0.45 و 0.60 متری) و ۳ طول مختلف (0.7 ، 2.8 ، و 4.2 متری) از سگمنت بررسی شده است. در شکل ۹، نتایج تحلیل در مراحل مختلف حفاری برای مدل با گام حفاری (طول سگمنت) برابر 0.7 متر

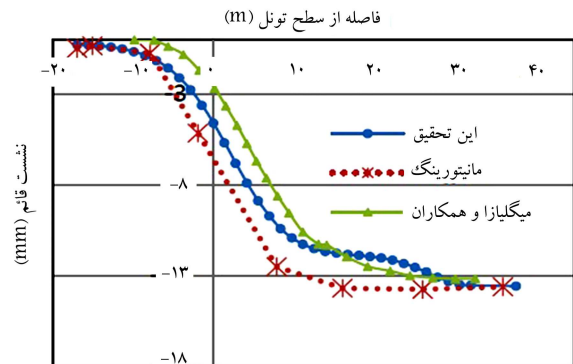
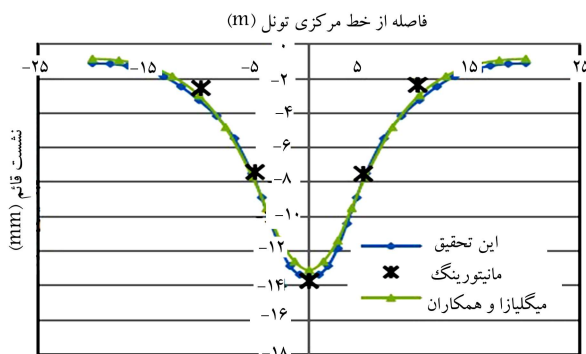
• گام اول (اعمال بار ژئواستاتیکی برای بیان وضعیت اولیه‌ی تنش‌ها): این بار، اثر قائم وزن خاک را با در نظر گرفتن ضریبی ثابت و مساوی با 0.46 در هر دو جهت افقی شبیه‌سازی می‌کند.



شکل ۶. مراحل مختلف حفاری.

جدول ۲. مقادیر پارامترهای مورد استفاده در روش‌های تحلیلی.

Oteo		Laganathan-Poulos			Verruijt-Booker		Gonzales-Sagasetta		Peck					
Ψ	i (m)	η	g (m)	W (mm)	G_p (mm)	δ (%)	ϵ (%)	α	ρ	ϵ (%)	i (m)	W_{max} (mm)	V_s (m^3)	عمق تونل Z_0 (m)
۰٫۴	۵٫۰۳	۱٫۰۷	۲٫۱۸	۱۸	۳۸	۰٫۵۸	۰٫۱۹۵	۱٫۲۱	۳٫۰۳	۰٫۱۹۵	۵٫۲	۱۳٫۶	۰٫۱۷۸	۱۱٫۲۵

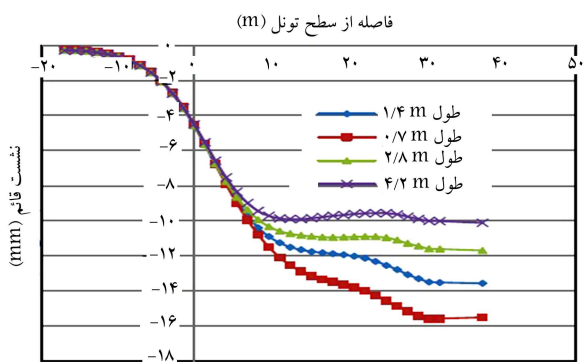


شکل ۸. مقایسه‌ی نشست قائم به‌دست آمده در جهت عرضی از نتایج عددی با نتایج مانیتورینگ.

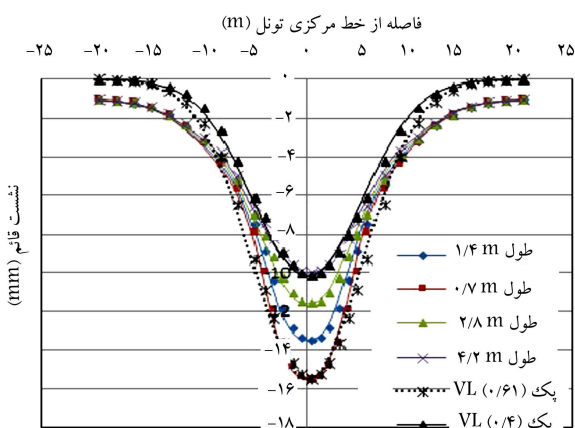
شکل ۷. مقایسه‌ی نشست قائم به‌دست آمده در جهت طولی از نتایج عددی با نتایج مانیتورینگ.

کمتر می‌شود که نشان دهنده‌ی آن است که با افزایش ضخامت سگمنت، تا حدودی می‌توان از نشست قائم سطح زمین جلوگیری کرد. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت سگمنت، افت حجمی (VL) کاهش می‌یابد، به طوری که افت حجمی به‌دست آمده از روابط برای ضخامت‌های ۰٫۱۵ و ۰٫۰۶ متر به ترتیب برابر ۰٫۵۸٪ و ۰٫۴۵٪ به‌دست آمده است. همچنین مقادیر افت حجمی به‌دست آمده برای مدل‌ها با ضخامت ۰٫۰۳ و ۰٫۰۴۵ متر به ترتیب برابر ۰٫۵۳٪ و ۰٫۴۷٪ بوده است. در شکل ۱۲، نشست قائم سطح زمین از آنالیزهای عددی برای حالت‌های مختلف طول سگمنت (گام حفاری) نشان داده شده است.

نشان داده شده است. در شکل ۱۰، نشست قائم در جهت طولی از آنالیزهای عددی برای ضخامت‌های مختلف سگمنت نشان داده شده است که مطابق آن با افزایش ضخامت سگمنت، نشست قائم طولی در سطح زمین کاهش یافته است. در شکل ۱۱، نیز نشست قائم سطح زمین در جهت عرضی از آنالیزهای عددی و روش تجربی پک، [۷] برای ضخامت‌های مختلف سگمنت مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست آمده در اثر افزایش ضخامت سگمنت، نشست قائم سطح زمین کاهش می‌یابد؛ به طوری که میزان این کاهش تا ضخامت ۰٫۴۵ متر زیاد بوده است و با افزایش ضخامت سگمنت (ضخامت ۰٫۰۶ متر) نشست قائم



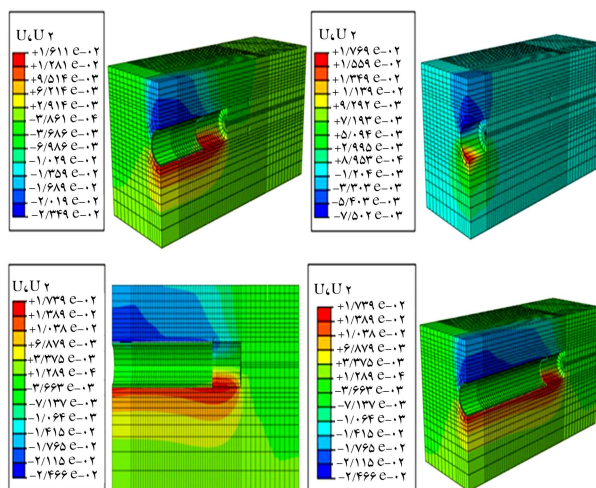
شکل ۱۲. نشست قائم سطح زمین در جهت طولی به دست آمده از آنالیزهای عددی با طول‌های مختلف سگمنت.



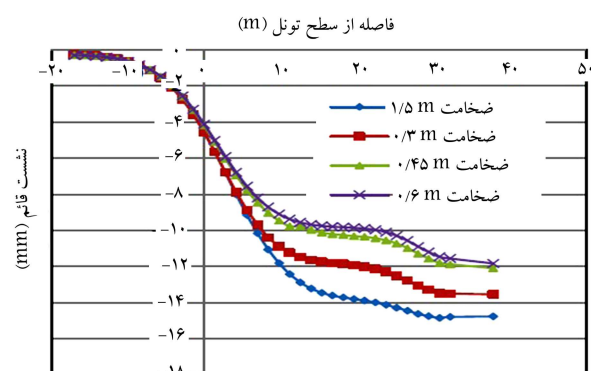
شکل ۱۳. نشست قائم سطح زمین در جهت عرضی به دست آمده از آنالیزهای عددی با طول‌های مختلف سگمنت.

۶. نتیجه‌گیری

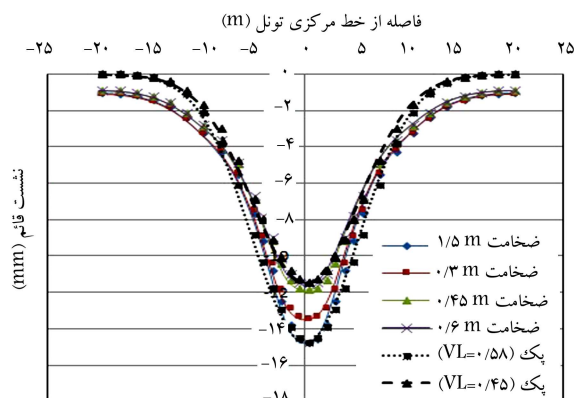
به کمک تحلیل‌های سه بعدی صورت گرفته برای تونل سطحی که در خاک ماسه‌ای و به روش تونل‌زنی مکانیزه حفر شده است، اثر ضخامت و طول قطعات بتنی لاینینگ بررسی شده است. مطابق شکل‌های ۱۰ الی ۱۳ مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت و نیز افزایش طول قطعات و به تبع آن افزایش طول گام‌های حفاری در این روش از تونل‌زنی، هم در راستای طولی و هم راستای عرضی تونل، مقدار نشست‌ها کاهش می‌یابند و این به معنای بهبود وضعیت نشست به دلیل افزایش در دو پارامتر هندسی قطعات بتنی که در سختی لاینینگ و سختی محیط اطراف موثر هستند، است. همچنین با افزایش ضخامت و افزایش طول سگمنت، میزان افت حجمی نیز کاهش می‌یابد. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته می‌توان نتیجه گرفت که برای کاهش نشست سطح زمین ناشی از حفر تونل، که با کمک لاینینگ نگهداری می‌شود، دو راهکار وجود دارد: ۱. افزایش ضخامت لاینینگ و ۲. افزایش طول حفاری در هر گام. در روش اول، به علت کم شدن سطح مقطع نهایی برای احداث تونل با قطر معین، نیاز به حفاری بیشتر پیش می‌آید و موجب افزایش هزینه‌های مربوط به ساخت تونل می‌شود. اما با افزایش طول قطعات لاینینگ در هر گام، ضمن صرفه‌جویی در هزینه‌های مربوط به حفاری و نگهداری تونل، نشست رخ داده در سطح نیز کاهش می‌یابد.



شکل ۹. نشست قائم به دست آمده از مدل‌سازی عددی بعد از حفاری.



شکل ۱۰. نشست قائم سطح زمین در جهت طولی.



شکل ۱۱. نشست قائم سطح زمین در جهت عرضی.

مطابق شکل ۱۲، با افزایش طول سگمنت، نشست قائم سطح زمین چه در جهت طولی (شکل ۱۲) و چه در جهت عرضی (شکل ۱۳) کاهش یافته است. علت کاهش نشست قائم سطح زمین در اثر افزایش طول سگمنت (گام حفاری) به این دلیل است که در اثر افزایش طول سگمنت، سختی محیط اطراف افزایش می‌یابد. با افزایش طول سگمنت نیز افت حجمی کاهش می‌یابد. به طوری که برای مدل‌ها با طول سگمنت ۰٫۷، ۱٫۴، ۲٫۸، ۴٫۲ افت حجمی محاسبه شده به ترتیب برابر ۰٫۶۱٪، ۰٫۵۳٪، ۰٫۴۶٪ و ۰٫۴٪ بوده است.

1. Peck
2. Sagaseta
3. Verrvijt & Booker
4. Loganathan & Poulos
5. Oteo
6. Romo MP. & Diaz CM.

منابع (References)

1. Abdi cherlo, M., Hashemolhosseini, H., Cheraghi, M. and Mahdevari, S. "Feasibility evaluation for excavation of Naghshe Jahan square subway station by underground methods", *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **5**(6), pp. 452-459 (2013).
2. Hosseini S.A.A., Mohammadnejad, M., Hoseini, S.M., Mikaeili, R. and Tolooiyan, A. "Numerical and analytical investigation of ground surface settlement due to subway excavation", *Geosciences*, **2**(6), pp. 185-191 (2012).
3. Sellner, P. and Grossaurer, K., *How to Predict Surface Movement & Prevent Damages of Surface Structures*, EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium, Schubert(ed.) VGE (2004).
4. Fattah, M.Y., Shlash, K.T. and Salim, N.M. "Prediction of settlement trough induced by tunneling in cohesive ground", *Acta Geotechnica*, **8**(2), pp. 167-179 (2012).
5. Toan, N.D. "TBM and lining essential interface", M.Sc.Thesis, Politecnico di Torino, Italy (2006).
6. Migliazza, M., Chiorboli, M. and Giani, G.P. "Comparison of analytical method, 3D finite element method model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground", *Computers and Geo Technics*, **36**(1-2), pp. 113-124 (2009).
7. Peck, R.B. "Deep excavation and tunneling in soft ground", *State-of-The-Art Report, In Proc 7th int. Conf. Soil Mechanics and Found. Engineering*, Mexico, pp. 225-290 (1969).
8. Atkinson, J.H. and Potts, D.M. "Subsidence above shallow tunnels in soft ground", *J. Geotech. Eng. Div.*, ASCE, **103**(GT4), pp. 307-325 (1977).
9. Attewell, P.B. and Woodman, J.P. "Predicting the dynamics of ground settlements and its derivatives by tunneling in soil", *Ground Eng.*, **15**(8), pp. 13-22 (1982).
10. Mair, R.J. and Gunn, M.J. "O'Reilly MP. ground movements around shallow tunnel in soft clay", *10th int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, pp. 323-328 (1983).
11. New, B.M. and O'Reilly, M.P. "Tunneling induced ground movements, predicting their magnitude and effects", *Proc. 4th Conf. on Ground Movements and Structure*, Cardiff, pp. 671-697 (1991).
12. Einstein, Z., El-Nahhas, F. and Thomson, S. "Strain field around a tunnel in stiff soil", *Proc. 10th int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering, I, Balkema*, pp. 283-288 (1981).
13. Oteo, C. and Moya, J.F. "Estimation of the soil parameters of Madrid in relation to the tunnel construction", *Proc. 7th Euro Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 3, Brighton, pp. 239-247 (1979).
14. Sagaseta, C. "Analysis of undrained soil deformation due to ground loss", *Geotechnique*, **37**(3), pp. 301-320 (1987).
15. Sagaseta, C. "Discussion: Analysis of undrained soil deformation due to ground loss", Author's replay to Schemidt, B., *Geotechnique*, **38**(4), pp. 647-649 (1988).
16. Verruijt, A. and Booker, J.R. "Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane", *Geotechnique*, **46**(4), pp. 753-736 (1996).
17. Loganathan, N. and Poulos, H.G. "Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, **124**(9), pp. 846-856 (1998).
18. Robet, A. "Analytical solutions for shallow tunnels in saturated ground", *J. Eng. Mech.*, ASCE, **127**(12), pp. 1258-1266 (2001).
19. Chou, W.I. and Bobet, A. "Prediction of round deformations in shallow tunnels in clay", *Tunnelling Underground Space Technol.*, **17**, pp. 3-19 (2002).
20. Park, K.H. "Analytical solution for tunneling-induced ground movements in clays", *Tunnelling Underground Space Technol.*, **20**(3), pp. 249-261 (2005).
21. Suwansawat, S. and Einstein, H.H. "Artificial neural network for predicting the maximum surface settlements caused by EPB shield tunneling", *Tunnelling Underground Space Technol.*, **21**(2), pp. 133-155 (2006).
22. Mroueh, H. and Shahrour, I. "A simplified 3D model for tunnel construction using tunnel boring machines", *Tunnelling Underground Space Technol.*, **23**, pp. 38-45 (2008).
23. Melis, M., Medina, L. and Rodriguez, J.M. "Prediction and analysis of subsidence induced by shield tunneling in the Madrid Metro extension", *Can. Geotech. J.*, **39**(6), pp. 1273-1287 (2002).
24. Schmidt, B. "Prediction of settlements due to tunneling in soil: three case histories", *In: Proc 2nd Rapid Excavation Tunneling Conference*, San Francisco, CA, pp. 801-812 (1969).
25. Uriel, A.O. and Sagaseta, C. "Selection on design parameters for underground construction", *Proc. Of the 12th International Congress on Soil Mechanics*, Rio de Janeiro, 9, Rotterdam: A.A. Balkema, pp. 2521-2551 (1989).
26. Gonzales, C. and Sagaseta, C. "Patterns of soil deformations around tunnels", Application to the extension of Madrid Metro. *Comput. Geotech.*, **28**(6-7), pp. 445-468 (2001).

27. Lo, K.Y., Ng, R.M.C. and Rowe, R.K. "Predicting settlement due to tunnelling in clays", *In: Proc Tunnelling in Soil and Rock, Geotech. III Conference, ASCE, Reston, Va*, pp. 48-76 (1984).
28. Sagaseta, C., Moya, J.F. and Oteo, C. "Estimation of ground subsidence over urban tunnels", *In: Proc 2nd Conference on Ground Movement and Structure, Cardiff*, pp. 331-344 (1980).
29. Romo, M.P. and Diaz, C.M. "Face stability and ground settlements in shield tunneling", *In: Proc 10th int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1*, Stockholm, pp. 357-360 (1981).