

نشست زمین در اثر حفر تونل های خاکی و تاثیر عوامل زمین شناسی مهندسی بر آن

محمدرضا باغبان گل پسند*، محمدرضا نیکودل، علی ارومیه ای

گروه زمین شناسی مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

mr.baghangolpasand@modares.ac.ir

چکیده

مصالص خاکی در اثر حفر تونل و گودبرداری عمیق، مقداری جابجائی از خود نشان می دهند که در مورد حفر تونل بیشتر به شکل نشست زمین نمود پیدا می کند و با عنوان نشست زمین در اثر حفر تونل نامگذاری می شود. این نوع نشست زمین در محیط های شهری تاثیرات زیست محیطی عمده ای داشته و بدین لحاظ بررسی و مطالعه آن از اهمیت فوق العاده ای برخوردار است. عوامل مختلفی بر میزان نشست زمین ناشی از حفر تونل تاثیر دارند که یکی از مهمترین آنها خصوصیات زمین شناسی مهندسی اطراف تونل است. در تحقیق حاضر تاثیر خصوصیات زمین شناسی مهندسی مصالح و محیط میزبان تونل بر میزان و نوع نشست زمین، رخ داده در اثر حفر تونل، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. یافته ها نشان دهنده این است که در زمینهای رسی (در مقایسه با مصالح ماسه ای) گودی نشست زمین، توسعه بیشتری به جوانب و کناره ها داشته و نشست حداکثر کمتری اتفاق می افتد.

کلمات کلیدی: نشست زمین، حفر تونلهای خاکی، خصوصیات زمین شناسی مهندسی، K_0

۱- مقدمه

افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی از یکطرف و بالا رفتن استاندارد های زندگی از سوی دیگر باعث بروز معضلی به نام ترافیک شده و لزوم ایجاد و توسعه شبکه های قطار شهری را باعث شده است. بنابراین ناچار به حفر تونل در مناطق شهری، که عمدتاً دربرگیرنده مصالح خاکی هستند، و نیز احداث سازه های زیرزمینی مربوط به ایستگاههای مترو هستیم که طبیعتاً این کار در مجاورت و زیر ابنیه و تاسیسات شهری صورت خواهد گرفت. بدیهی است که بدلیل نوع مصالح و همچنین به خاطر اینکه تونلهای مترو اکثراً کم عمق هستند، ابنیه و تاسیسات شهری مذکور تاثیر پذیری بالائی از حفر تونل و ایستگاههای وابسته خواهند داشت که حتی می تواند خسارات جبران ناپذیری را در پی داشته باشد. یکی از مسائل بسیار رایج و مورد بحث در این زمینه، نشست زمین در اثر حفر تونلهای مترو می باشد.

۲- نشست زمین ناشی از حفر تونل

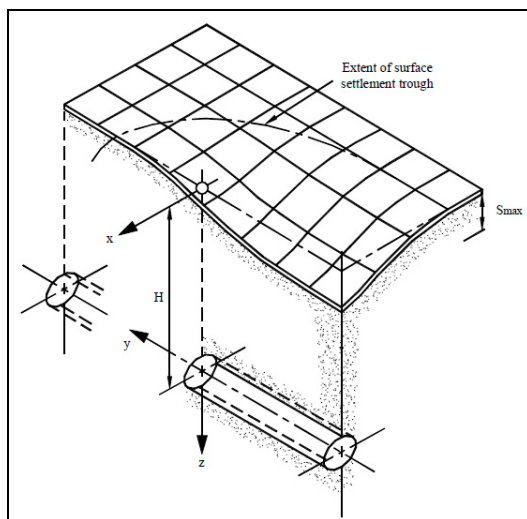
حفر تونل در اعماق کم و در زمین های خاکی منجر به ایجاد جابجائی های افقی و عمودی در اطراف تونل می گردد. تحقیقات نسبتاً وسیعی در ارتباط با این مسئله صورت گرفته است. اولین مطالعه جامع در این خصوص توسط Peck در سال (1969) انجام گرفته است. او در مقاله خود که در هفتمین کنفرانس بین المللی مکانیک خاک و مهندسی پی در شهر مکزیکوسیته ارائه شده است، یک گزارش مدون حاوی جمع آوری کلی اطلاعات اجرائی تونل در زمینهای نرم تا آن زمان را ارائه نموده و به تحلیل خصوصیات نشست زمین به ویژه از نظر هندسی پرداخته است. مقاله Peck در حقیقت زیر بنای تمام

مطالعات بعدی در زمینه نشست در اثر حفر تونل در زمینهای نرم بوده و تقریباً در همه مطالعات و مقالات ارائه شده در این زمینه به مقاله مذکور استناد شده است.

بطور کلی حفر تونل در هر عمق از خاک منجر به تغییر سیستم توزیع تنش ها و همگرایی دهانه تونل و بوجود آمدن تغییر شکل هایی در سطح زمین می شود که به عنوان نشست و یا جابجایی زمین گفته می شود. جابجایی مذکور به صورت یک فرورفتگی (گود نشست) مشاهده می شود. خصوصیات هندسی گودی مذکور در حقیقت تعیین کننده میزان و نوع نشست زمین بوده و به عوامل زیر بستگی دارد (Leca & New 2007):

- ۱) شرایط زمین شناسی، ژئوتکنیکی و آب زمین شناسی
- ۲) عمق و هندسه تونل
- ۳) روش احداث تونل
- ۴) کیفیت محیط کار و مدیریت

در شکل (۱) نشست زمین در اثر حفر تونل به صورت سه بعدی نشان داده شده است.



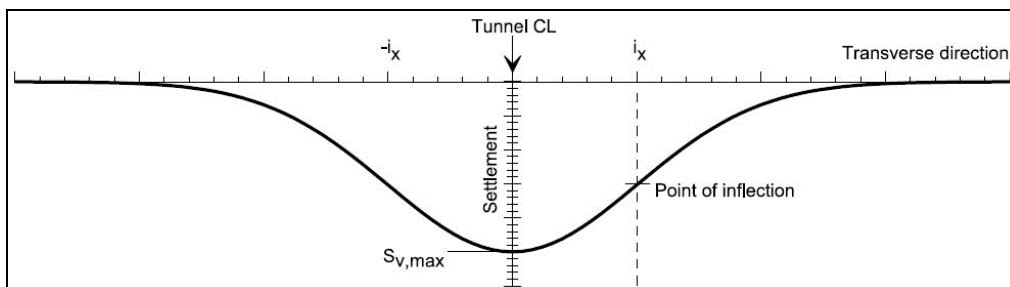
شکل ۱ - نشست زمین در اثر حفر تونل، دید سه بعدی (Franzius, J. N. 2003)

۳- ارزیابی نشست زمین

از نظر Peck گود نشست عرضی را می توان بوسیله تابع احتمال گوسی نشان داد. بر اساس این روش، نشست قائم در جهت عرضی بوسیله رابطه (۱) بدست می آید:

$$S = S_{v,max} \exp(-x^2 / 2i_x^2) \quad (1)$$

که در این رابطه حداکثر نشست اندازه گیری شده در بالای محور تونل می باشد. پارامتر i_x پارامتر عرض گود نشست بوده و نشان دهنده انحراف معیار در معادله گاوس می باشد. پارامترهای مذکور به صورت شماتیک در شکل (۲) نشان داده شده است. چنانچه در این شکل نیز مشخص است، در مقطع عرضی نمای عمومی گود نشست زمین در اثر حفر تونل به شکل منحنی احتمالاتی توزیع نرمال قابل مشاهده است.



شکل ۲- گود نشست عرضی (Franzius, J. N. 2003)

جهت ارزیابی نشست حداکثر رابطه زیر توسط O'Reilly & New (1982) و Mair et al (1993) ارائه شده است:

$$S_{max} = 0.313V_L D^2 / i \quad (2)$$

که در این رابطه D عبارتست از قطر تونل. همچنین در رابطه فوق V_L حجم از دست رفته زمین می باشد که به نوع خاک بستگی داشته و به شکل درصدی از حجم حفاری بیان می شود. در ادامه توضیحات کاملتری در ارتباط با این پارامتر ارائه خواهد شد. همچنین روابط مختلفی جهت تعیین و محاسبه i پیشنهاد شده است که از آن جمله O'Reilly & New (1982) رابطه زیر را ارائه کرده اند:

$$i = kz_0 \quad (3)$$

که در آن:

k : پارامتر بی بعد وابسته به نوع خاک (پارامتر هندسی گودی نشست)

Z_0 : عمق محور تونل نسبت به سطح زمین

چنانچه از تعاریف و روابط فوق نیز مشخص است، پارامترهای V_L و k از جمله عوامل تعیین کننده میزان نشست زمین در اثر حفر تونل می باشند که در ارتباط مستقیم با خصوصیات زمین شناسی مهندسی خاک بوده و به پارامترهای ژئوتکنیکی آن بستگی دارند. بنابراین به عنوان نخستین قدم در مطالعه ارتباط بین خصوصیات زمین شناسی مهندسی مصالح و نشست زمین در اثر حفر تونل، ضروری است تا پارامترهای فوق مورد مطالعه بیشتری قرار گیرند.

۳-۱- مقادیر پیشنهادی برای پارامترهای V_L و k

الف) V_L

احداث یک تونل ناچاراً باعث می شود که مقدار خاکی که حفاری می شود از مقداری خاکی که معرف حجم تئوریک تونل است، زیادتر باشد. این مقدار اضافی حفاری بوسیله حجم از دست رفته V_L نشان داده می شود که نسبت مقدار اختلاف حجم خاک حفاری شده و حجم تونل (که بوسیله قطر بیرونی تونل تعریف می شود) به حجم تونل می باشد. حجم از دست رفته معیاری از به هم خوردگی کلی وضعیت زمین می باشد. این پارامتر باعث ایجاد گود نشست در سطح زمین می گردد؛ به طوری که در شرایط زهکشی نشده زمین، حجم این گود برابر با حجم از دست رفته می باشد.

مطالعات زیادی جهت تعیین V_L انجام گرفته است. (Guglielmetti, et al 2008) براساس شرایط متفاوت زمین شناسی و ژئوتکنیکی حاکم بر جبهه کار و روبراه تونل حالات مختلفی را فرض کرده و برای هر کدام از این حالات مقادیر معینی را برای

پارامترهای V_L ذکر کرده است. در تقسیم بندی فوق برای حالتی که مصالح جبهه کار و روباره تونل مصالح خاکی باشند، بر حسب شرایط ژئوتکنیکی خاک، مقدار V_L بین ۰/۸ تا ۱/۰ (بطور متوسط ۰/۹) پیشنهاد شده است.

ب) k

تعیین مقدار عددی k جهت تخمین میزان نشست زمین در اثر حفر تونل بسیار مهم بوده و با توجه به تحقیقات بعمل آمده مقدار عددی این پارامتر ارتباط تنگاتنگ و بسیار پیچیده ای با خصوصیات زمین شناسی و ژئوتکنیک مصالح سینه کار و روباره دارد. O'Reilly & New (1982) بر اساس داده‌هایی که در دست داشتند مقدار k را برای رس برابر با ۰/۵ بدست آوردند که برای اکثر اهداف عملی مقدار مناسبی می باشد. با این حال آنها اظهار کردند که این مقدار می تواند بین ۰/۴ تا ۰/۷ تغییر نماید. برای ماسه ها نیز مقدار k را ۰/۲۵ اعلام نمودند. در منابع دیگر مقدار k برای خاک‌های چسبنده در دامنه ۰/۶ ~ ۰/۴ و برای خاک‌های غیر چسبنده در دامنه ۰/۳۵ ~ ۰/۲۵ پیشنهاد شده است (Guglielmetti, et al 2008).

بنابراین مشاهده می شود که مقادیر عددی پارامترهای V_L و k بر حسب نوع مصالح زمین شناسی (اعم از ریز دانه و درشت دانه) قابل تعیین بوده و عبارت دیگر پارامترهای زمین شناسی مهندسی دخیل در نشست زمین می باشند. در جدول (۱) مقادیر تقریبی پارامترهای V_L و k بر حسب نوع مصالح و شرایط زمین شناسی تعیین شده است.

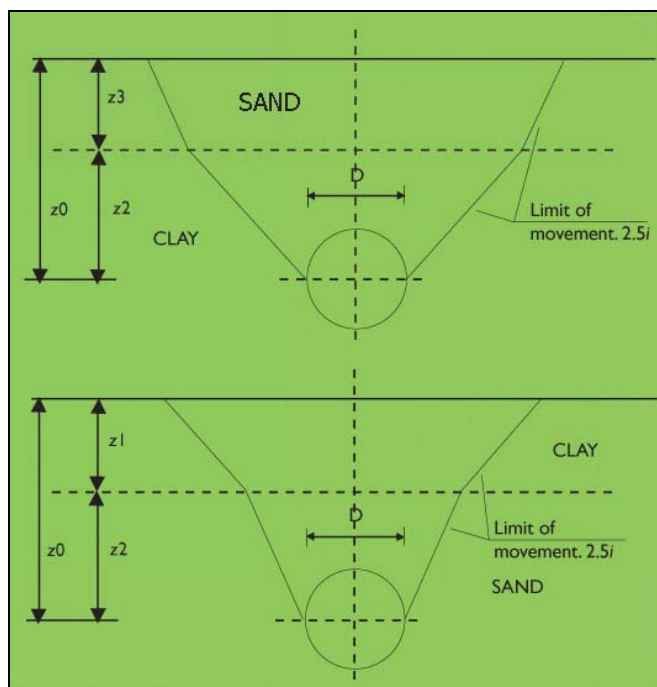
جدول ۱- مقادیر تقریبی V_L و k (Guglielmetti, et al 2008)

	GEOLOGICAL CONDITION OF THE TUNNEL FACE			
	1) Soil-like material	2) Mixed condition (soil and rock mass)	3) Faults and/or weathered bands	4) Discontinuous rock mass and weak rock
OVERBURDEN CONDITION				
A) Soil-like material	Cohesion around the tunnel: $c = 0 \rightarrow V_L = 1.0\%, k = 0.3$ $c > 0 \rightarrow V_L = 0.8\%, k = 0.5$	Cohesion around the tunnel: $c = 0 \rightarrow V_L = 1.2\%, k = 0.3$ $c > 0 \rightarrow V_L = 1.0\%, k = 0.5$	Cohesion around the tunnel: $c = 0 \rightarrow V_L = 1.0\%, k = 0.3$ $c > 0 \rightarrow V_L = 0.8\%, k = 0.5$	Cohesion around the tunnel: $c = 0 \rightarrow V_L = 0.8\%, k = 0.3$ $c > 0 \rightarrow V_L = 0.5\%, k = 0.5$
B) Mixed condition (soil and rock mass)	$V_L = 0.5-0.7\%$ (*) Cohesion around the tunnel: $c = 0 \rightarrow k = 0.3$ $c > 0 \rightarrow k = 0.5$	$V_L = 0.6-0.8\%$ (*) Cohesion around the tunnel: $c = 0 \rightarrow k = 0.3$ $c > 0 \rightarrow k = 0.5$	$V_L = 0.5-0.8\%$ (*) $k = 0.5-0.7$	$V_L < 0.5\%$ $k = 0.5-0.7$
C) Faults and/or weathered bands	$V_L = 0.4-0.8\%$ (**) Cohesion (***): $c = 0 \rightarrow k = 0.3$ $c > 0 \rightarrow k = 0.5$	$V_L = 0.5-0.9\%$ (**) Cohesion (***): $c = 0 \rightarrow k = 0.3$ $c > 0 \rightarrow k = 0.5$	$V_L = 0.6-1.2\%$ (**) Cohesion (***): $c = 0 \rightarrow k = 0.3$ $c > 0 \rightarrow k = 0.5$	$V_L = 0.4-0.9\%$ (**) $k = 0.5-0.7$
D) Discontinuous rock mass and weak rock	$V_L = 0.3-0.5\%$ $k = 0.5-0.7$	$V_L = 0.4-0.6\%$ $k = 0.5-0.7$	$V_L < 0.4\%$ $k > 0.7$	$V_L < 0.2\%$ $k > 0.7$

(*) Potential for progressive failure (see Table 5.1).
 (**) Due to the inclined weak zones the tunnelling-induced effects can be transmitted in directions different from the vertical one.
 (***) The cohesion is referred to the material within the singularities.

۲-۳- تاثیر لایه بندی خاک

در طرحهای حفر تونل در زمین های خاکی اغلب با لایه بندی در خاک مواجه هستیم. بنابراین لازم است تا طبیعت گودی نشست در لایه های مختلف مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به تحقیقات انجام شده، ثابت شده است که در خاکهای چسبنده رسی گودی نشست عریضتر (بازتر) و در خاکهای دانه ای و ماسه ای گودی مذکور باریکتر (بسته تر) دیده می شود. در زمینهای حاوی مصالح لایه لایه مانند توالی لایه های رسی و ماسه ای، شیب یالهای گودی نشست با عوض شدن نوع خاک تغییر یافته و اشکالی شبیه شکست نور در مرز محیط های مختلف ایجاد می شود. این پدیده در شکل (۳) نشان داده شده است. همانگونه که در این اشکال مشاهده می شود، منحنی گودی نشست از نظر شکل ظاهری و در مقطع عرضی در لایه های رسی بیشتر به حالت باز و کشیده و در لایه های ماسه ای حالت بسته و باریک دیده می شود.



شکل ۳- تغییرات شیب گودی نشست با عمق و همچنین با تغییر لایه بندی (Guglielmetti, et al 2008)

برای تونل هایی که در زمین های لایه ای (رسی و ماسه ای) حفر می شوند، (O'Reilly & New (1982) رابطه زیر را برای پارامتر i پیشنهاد دادند:

$$i = k_1 \cdot z_1 + k_2 \cdot z_2 \quad (4)$$

که در آن k_1 پارامتر عرض گود نشست برای لایه ۱ با ضخامت Z_1 و k_2 پارامتر عرض گود نشست برای لایه ۲ با ضخامت Z_2 می باشد.

حجم گود نشست به طور تئوری تقریباً برابر با حجم از دست رفته زمین می باشد. بنابراین در تخمین میزان ماکزیمم نشست سطح و یا عمق گود نشست، از میزان حجم از دست رفته زمین استفاده می شود. مقدار حجم از دست رفته زمین تابع عوامل مختلفی می باشد که روش احداث تونل، تجهیزات مورد استفاده، میزان تجربه کارکنان و پرسنل و... از جمله این عوامل می باشد.

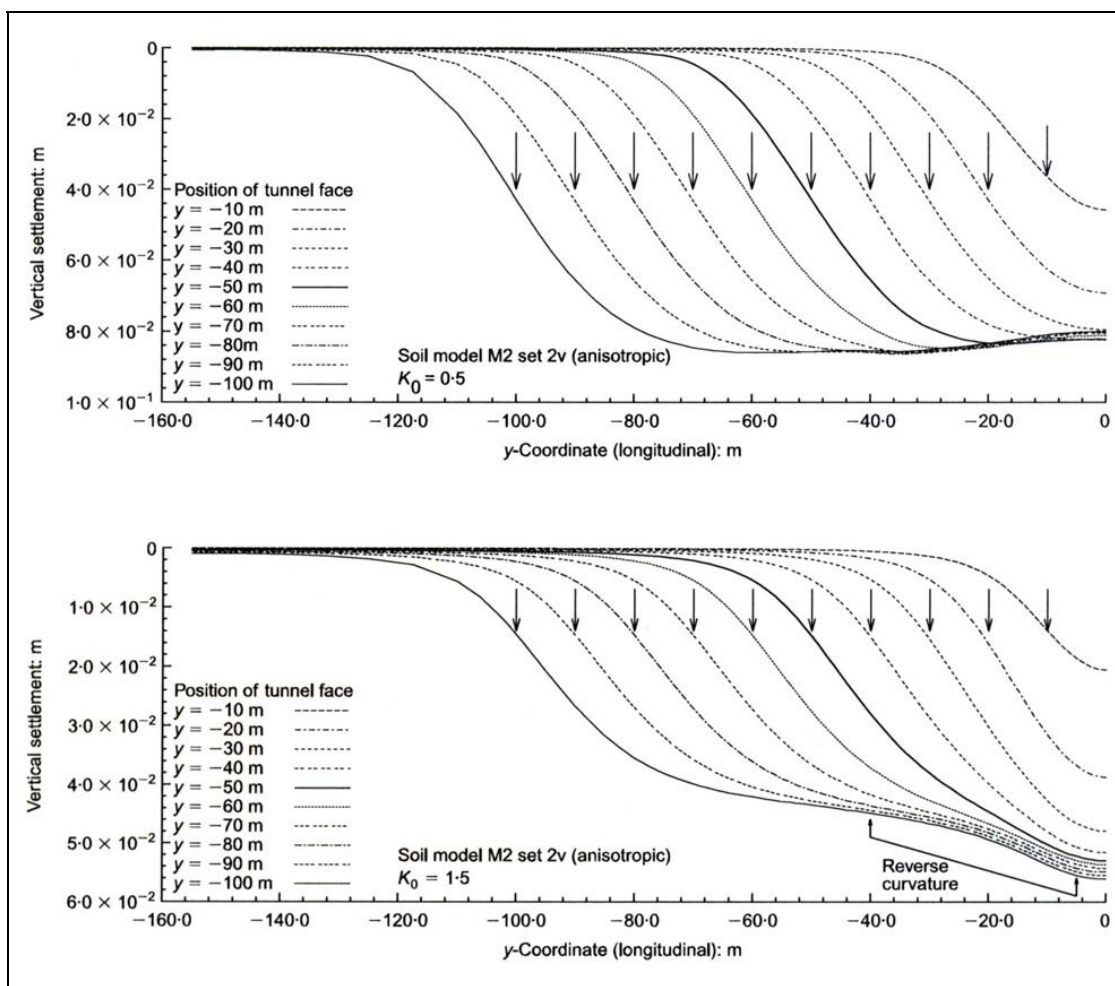
۴- تاثیر خصوصیات زمین شناسی مهندسی بر میزان نشست

در بخشهای قبلی عوامل موثر بر نشست زمین در اثر حفر تونل توضیح داده و ذکر شد که یکی از مهمترین این عوامل عبارتست از خصوصیات زمین شناسی و ژئوتکنیکی مصالح. پارامترهای ژئوتکنیکی متعددی می توانند در مسئله نشست زمین در اثر حفر تونل تاثیر گذار باشند که از آن جمله می توان به زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ)، چسبندگی خاک (C)، ضریب فشار جانبی خاک (K_0) و . . . اشاره کرد. تاثیر پارامترهای V_L و K بر نشست زمین در بخشهای قبلی نوشتار حاضر مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش اشاره مختصری به مطالعات انجام گرفته در ارتباط با تاثیر ضریب فشار جانبی خاک (K_0) بر نشست زمین خواهد شد.

برخی از دلایل اهمیت مطالعه بر روی این پارامتر را می توان بشرح زیر بیان کرد:

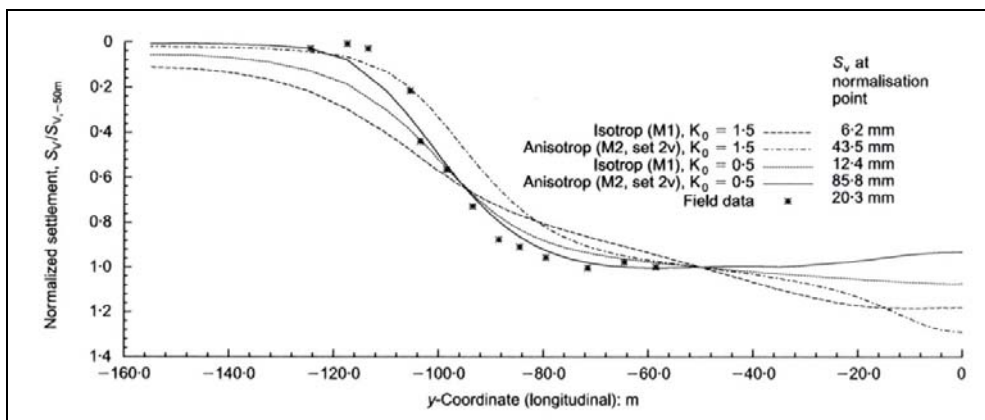
- ۱- پارامتر K_0 از مشخصه های ژئوتکنیکی اساسی خاک بوده و به ویژه از نظر بار اعمالی به لایننگ و نیز تعبیر شکل های ایجاد شده در آن نهایتا به تعبیر شکل خاک و نشست زمین منتهی خواهد شد، از اهمیت بسزایی برخوردار است. موضوع جالب اینکه این مسئله در مقاله Peck نیز مورد توجه قرار گرفته است.
 - ۲- پارامتر K_0 ارتباط بسیار تنگاتنگی با زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) خاک داشته و با توجه به اینکه این پارامتر یکی از مولفه های مقاومت برشی خاک می باشد (که تاثیر اصلی در پایداری تونل دارد) بنابراین اهمیت K_0 بار دیگر مورد تاکید قرار می گیرد.
 - ۳- این پارامتر اهمیت بسزائی در تعیین فشار سینه کار و پایداری آن دارد. با توجه به ارتباط بسیار نزدیک فشار سینه کار با میزان نشست زمین بررسی این پارامتر اهمیت مضاعفی پیدا می کند.
 - ۴- ارتباط مقدار K_0 با پارامترهای هندسی نشست زمین توسط محققین مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است که در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت بنظر می رسد مطالعات مذکور میتوانند راهگشای مطالعات جدید باشند.
- در حالت کلی نتیجه تحقیقات بعمل آمده نشان می دهد که با افزایش مقدار K_0 ، گودی نشست دارای عرض بیشتر و عمق کمتری خواهد شد، به عبارت دیگر با توجه به تحقیقات بعمل آمده، گودی نشست پیش بینی شده با استفاده از مقادیر K_0 بالا، دارای عرض بیشتر و عمق کمتر (حالت کشیده و مسطح) خواهد بود. برعکس در حالتی که از مقادیر K_0 پائین در تحلیل ها استفاده شود گودی نشست دارای عرض کمتر و عمق بیشتر (حالت بسته و باریک) خواهد بود (Muller, M., 2006).
- Addenbrooke et al. (1997) در تحلیل دوبعدی خود بر روی مصالح ریزدانه با استفاده از مقادیر $K_0=1.5$ مقدار گودی عریضی را حاصل کردند که قدری با شرایط طبیعی مغایرت نشان می داد. از جمله نتایج دیگر مطالعات وی این بود که در حالت کلی تحلیل تونل یک پدیده سه بعدی می باشد و با استفاده از تحلیل های سه بعدی مقادیر واقعی تری بدست می آید [۱۲].
- Dolezalova (2002) نتایج تحلیل عددی را با مقادیر اندازه گیری شده از نشست واقعی زمین در اثر حفاری تونل در شهر براگ را مقایسه نموده و با لحاظ کردن مقادیر متفاوت K_0 از 0.5 تا 1.5 چنین نتیجه گیری کرد مقادیر $K_0=0.5$ نتایج رضایت بخشی را در خصوص شکل گودی نشست اندازه گیری شده ارائه می کنند و در ضمن تحلیل های 2D و 3D اختلاف چندانی را نشان نمی دهند.
- Franzius et al. (2005) در تحقیقات خود تاثیرات آنیزوتروپی و همچنین پارامتر K_0 را بر میزان نشست زمین در اثر حفر تونل به صورت توام مورد مطالعه قرار داده اند. در این مطالعه از نرم افزار (برنامه کامپیوتری) (ICFEP) استفاده شده است که

مبتنی بر روش اجرای (FE) بوده و قابلیت تحلیل به صورت دو بعدی و سه بعدی را دارا می باشد. در این تحلیل حفاری گام به گام توسط نرم افزار مدل شده و نصب Lining توسط برنامه فوق لحاظ شده است. مسئله مهم در ارتباط با مطالعه فوق استفاده از مقادیر متفاوت K_0 و اجرای برنامه با این مقادیر و نتیجه گیری مقادیر مختلف از آن می باشد. در نمودار های ارائه شده در شکل (۴) نتایج حاصل از اجرای برنامه با مقادیر متفاوت K_0 نشان داده شده است.



شکل ۴ - تاثیر پارامتر K_0 بر میزان و نحوه نشست زمین (Franzius et al. 2005)

نتایج مطالعه فوق با مقادیر نشست واقعی رخ داده در سطح زمین در اثر حفر تونل مقایسه شده و نتایج این مقایسه ها در شکل (۵) نشان داده شده است. آنچه از این مقایسه ها نتیجه می شود این است که مقدار نشست واقعی ایجاد شده در زمین با مقادیر نشست پیش بینی شده با فرض $K_0=0.5$ هماهنگی بیشتری داشته و از نظر شکل ظاهری نیز دو منحنی مذکور شباهت نسبتا زیادی به هم دارند. نتایج تحقیقات نشان می دهد که با کاهش مقدار K_0 مقدار تنش موثر (متوسط یا σ_2) در اطراف تونل کاهش یافته که این پدیده با کاهش سفتی خاک در نهایت باعث افزایش پارامتر V_L (حجم از دست رفته) می شود. در مورد شکل مقطع عرضی گودی نشست، مقادیر پایین K_0 گودی نشست باریکتر (کم عرض تر) و مقادیر بالای K_0 گودی نشست پهن تر (بازتر یا عریض تر) را ایجاد می نمایند که در بخشهای قبلی مطالعه حاضر نیز مورد تائید قرار گرفته است.



شکل ۵- مقایسه نشست واقعی رخ داده در در زمین با پیش بینی های انجام شده (Franzius et al. 2005)

در بخشهای قبلی اشاره شد که یکی از عوامل تعیین کننده شکل گودی نشست مقدار پارامتر بدون بعد K می باشد که در محاسبات نشست زمین در اثر حفر تونل به روش تجربی و تحلیلی مورد استفاده قرار می گیرد. در بخش حاضر نیز با مرور مطالعات قبلی انجام شده در مورد تاثیر پارامتر K_0 و میزان و نحوه نشست زمین، مشخص شد که تفاوت اشکال گودی نشست در انواع مصالح با مقدار K_0 در ارتباط است. بنابراین بنظر می رسد که ارتباط مستدل و قابل قبولی بین این پارامترها می تواند وجود داشته باشد

۵- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر خصوصیات گودی نشست زمین (ایجاد شده در اثر حفر تونلهای کم عمق در مصالح خاکی) مطالعه و تاثیر عوامل زمین شناسی مهندسی بر آن مورد بررسی قرار گرفت. با انجام این تحقیق نتایجی شرح زیر حاصل شد:
 الف) پارامترهای V_L و K که جهت ارزیابی نشست به روش تجربی مورد استفاده قرار می گیرند، به نوع خاک و خصوصیات مهندسی آن وابسته هستند بگونه ای که مقدار V_L در خاکهای ماسه ای بیشتر از خاکهای رسی بوده ولی پارامتر K در خاکهای رسی بیشتر از خاکهای ماسه ای است.

ب) در حالت کلی با افزایش مقدار K منحنی گودی نشست بازتر و با کاهش آن منحنی بسته تر خواهد بود. این پدیده باعث ایجاد شکست در منحنی گودی نشست (در مقطع عرضی) خواهد شد.

ج) نتایج بررسی های بعمل آمده نشان می دهد که با افزایش مقدار K_0 (که در نتیجه کاهش زاویه اصطکاک درونی خاک رخ می دهد)، منحنی گودی نشست بازتر و با کاهش آن منحنی مذکور بسته تر خواهد شد. با توجه به اینکه پارامتر هندسی گودی نشست (K) نیز چنین طبیعتی را دارا می باشد، می توان گفت احتمالاً دو پارامتر مذکور (K_0 و K) در برخی جهات هماهنگی نزدیکی با هم نشان می دهند (به عنوان مثال می توان به باز یا بسته بودن هماهنگ منحنی گودی نشست در نتیجه تغییرات پارامترهای K_0 و K اشاره کرد) و مطالعه ارتباط بین این دو پارامتر می تواند توسط محققین مورد توجه قرار گیرد.



منابع

- Addenbrooke, T. I. D. M. Potts, and A. M. Puzrin, 1997. "The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction," *Geotechnique*, vol. 47, no. 3, pp. 693–712
- Dolezalova, M. 2002. "Approaches to numerical modeling of ground movements due to shallow tunneling," *Soil Interaction in Urban Civil Engineering*, vol. 2, pp. 365–373
- Franzius, J. N. 2003. "Behavior of buildings due to tunnel induced subsidence" Department of Civil and Environmental Engineering. Imperial College of Science, Technology and Medicine. London, SW7 2BU.
- Franzius, J. N., Potts, D. M. & Burland, J. B. (2005) "The influence of soil anisotropy and K_0 on ground surface movement resulting from tunnel excavation" *Geotechnique* vol:55 no.3 pp. 189-199
- Guglielmetti V., Grasso P., Mahtab A., Xu S., (2008) "Mechanized Tunnelling in Urban Areas – Design methodology and construction control" Geodata S.p.A., Turin, Italy, CRC Press.
- Leca, E., & New, B. 2007. "Settlements induced by tunneling in Soft Ground", *Tunnelling and Underground Space Technology*, vs.22, 119–149. (ITA/AITES Report 2006)
- Mair, R.J., Taylor, R.N., Bracegirdle, A., 1993, *Surface Settlement Profile Above Tunnels in Clays*, *Geotechnique*, 43. No. 2, pp. 315-320.
- Muller, M., 2006. "Tunnel induced settlement and structural forces in lining". Doctoral Thesis. Stuttgart university.
- O'Reilly, M. P., & New, B. M. 1982. "Settlements above tunnel in the united kingdom- their magnitude and prediction". *Tunnelling 82*. The Institution of Mining and Metallurgy, London.
- Peck, R. B. 1969. "Deep excavation and tunneling in soft ground", *Proc. Of the 7th int. Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering*. State of the art Volume. Societed Mexicnan de Mecanica de Suelos, A. C.