

الگوی دگرشکلیهای خاک بر اثر احداث تونل دایره‌ای در آن

محمود وفائیان*

عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۱/۲/۷ - دریافت نسخه نهایی: ۸۲/۶/۱۵)

چکیده - در این مقاله، با اشاره به بعضی از رابطه‌های اخیر در مورد نشست زمین حاصل از حفر تونلهای کم عمق و با استفاده از نتایج حاصل از اندازه‌گیریهای واقعی در تونلهای اجرایی، رابطه‌های موجود در این زمینه با هم مقایسه و ارزیابی می‌شود. همچنین نتایج محاسبات مبتنی بر اجزای محدود در شرایط فرض الاستیک ارائه شده و با رابطه‌های تحلیلی مقایسه می‌شود. از طرفی تأثیر تغییر متغیرهای مؤثر بر رفتار خاک و نیز اثر پلاستیک شدن دهانه تونل مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد. از این تحقیق می‌توان نتیجه‌گیری کرد که در بسیاری از موارد، می‌توان با کاربرد یک نرم‌افزار اجزای محدود مبتنی بر حل "الاستیک - پلاستیک کامل با معیار موهر کولمب" وضعیت رفتاری (مخصوصاً جابه‌جاییها) محیط اطراف و بالای تونل در زمینهای خاکی را پیش‌بینی کرد. همچنین رابطه‌های ساده پیشنهادی نگارنده، الگوی رفتاری قابل قبول (و در بیشتر موارد دقیق) را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: تونل، زمینهای سست، دگر شکلی و نشست، حل الاستیک، اجزای محدود

The Pattern of Ground Deformations due to Circular Tunneling

M. Vafaeian

Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Abstract: This paper presents the results of a recent study about the following aspects relevant to tunneling in soft grounds:

- 1) The domain of deformations due to tunneling in soft ground can be specified within a boundary of a parabolic shape. This boundary is defined by a parabolic formula as a function of a central angle (η) which depends on the soil type; i.e., either cohesive or cohesionless. This parabolic shape can also be verified by a finite element computation.
- 2) A finite element program has been applied to investigate the deformation characteristics around and above circular tunnels and to find the settlement ratio (λ) as a function of known variables such as, depth ratio, modulus of elasticity, and the thickness of soil layer beneath the tunnel. The finite element computations were carried out by assuming a given distribution of displacements around the tunnel perimeter, for which reason the method may be called "compulsory displacements". It was found that although all the variables mentioned affect both the settlement ratio and the type of soil deformations, changing the values of modulus of elasticity affects only on the amount of deformation components, but not the settlement ratio.
- 3) The results of finite element computations for the settlement ratio have been compared to other analytical curves and empirical data from some available case studies; from which excellent agreements were found. Also the contours of

* - دانشیار

Equal deformation components from the finite element program and from the simple formulae proposed by the author were found to be quite similar and in acceptable agreement.

- 4) *Because the results obtained from the proposed formulae for the distribution of settlement at the ground surface are in excellent agreement with the relationships recently proposed by Loganathan & Poulos and the empirical data available, it is concluded that the simple analysis proposed here and the finite element computations based on the elasticity assumption can both be used to predict the deformation pattern around excavations in soft ground.*

Keywords: *Soft ground, Tunneling, Deformations*

۱- مقدمه و سوابق پژوهشی

رابطه‌های تحلیلی متعددی در مورد محاسبه یا تخمین نشست زمینهای خاکی در اثر حفر تونل و چگونگی توزیع این نشست، تاکنون پیشنهاد شده است که برخی از آنها مبتنی بر اصول محاسباتی و بر اساس خواص خاک است و تعدادی مبتنی بر مشاهدات تجربی است. به علاوه بعضی از این رابطه‌ها فقط برای سطح خاک در نظر گرفته شده است، در صورتی که در رابطه‌های پیشرفته‌تر و جدیدتر، دگرشکل‌های عمق خاک و نیز جابه‌جایی‌ها افقی خاک نیز مورد ارزیابی واقع شده است.

بنابر مشهور، اولین رابطه ریاضی در مورد توزیع نشست سطح زمین در اثر حفر تونل، توسط "پک" (۱۹۶۹) ارائه شده است که در آن، مطابق شکل (۱)، چگونگی توزیع نشست سطح زمین نسبت به مقدار بیشینه آن (s_{max}) به صورت معادله زیر است [۱].

$$s = s_{max} \cdot \exp(-x^2 \cdot 2i^2) \quad (1)$$

در این معادله، s نشست سطح زمین در هر نقطه به فاصله x از امتداد محور تونل و i طول نقطه عطف منحنی است. از آن پس کوشش‌های بسیاری برای ارزیابی و تعیین مقدار i صورت گرفت و نیز برای ارتباط دادن تغییر شکل دهانه تونل با مقدار حجم گود نشست (در سطح زمین) تعدادی رابطه‌های ریاضی و تجربی پیشنهاد شده است که به بعضی از آنها اشاره خواهد شد.

بعد از این آغاز و تکمیل‌های بعدی، تشریح مفصلی توسط مطالعات و نظریه‌های "ات‌کینس" و همکاران [۲] و "ات‌ول" و همکاران [۳ و ۴]. صورت گرفت و معادله‌های مفصل متعددی

توسط این پژوهشگران ارائه شد. همچنین معادله (۱) که برای سطح خاک مطرح شده بود بعداً تعمیم داده شد و کاربرد آن توسط "مایر" و همکاران [۵] برای عمق z نیز، با تغییر طول نقطه عطف، به صورت زیر مطرح شد:

$$i = [0.175 + 0.325(1 - zz_0)]z_0 \quad (2-الف)$$

در معادله بالا، z عمق هر نقطه و z_0 عمق مرکز تونل از سطح زمین است. همان‌طور که اشاره شد در طول چند دهه گذشته، معادله‌های متنوعی پیرامون ارزیابی مقدار i ارائه شده است که بعضی از آنها عبارت است از:

$$i = a(z_0 2a)^{0.8}, \text{ (Peck, 1969)} \quad [6] \quad (2-ب)$$

در معادله بالا a شعاع تونل دایره‌ای است.

$$i = kz_0, \text{ (O'Reilly \& New, 1982)} \quad [6] \quad (2-ج)$$

در این معادله، مقدار k از $1/4$ (برای رس‌های سفت) تا $1/7$ (برای رس‌های سیلتی نرم) متغیر است و عموماً می‌توان $1/5$ گرفت.

$$i = \xi(2a)(0.52z_0 2a \quad 0.21) \quad [7] \quad (2-د)$$

از طرفی کوشش شده است که ارتباط نشست سطح زمین با نشست دهانه تونل مشخص شود. مثلاً معادله زیر توسط "رانکین" پیشنهاد شده است. [۸]

$$S_{max} = 0.0126V_1 a^2 / i \quad (3-الف)$$

در این معادله V_1 درصد افت مقطع تونل (یعنی نسبت کاهش سطح مقطع به سطح مقطع اسمی تونل) است.

در صورتی که در معادله بالا مقدار i از معادله (۲-ب) جایگزین شود، معادله زیر حاصل می‌شود:

$$S_{max} = 0.0126V(a)(z_0/2a)^{0.8} \quad (3-ب)$$

در این رابطه، a شعاع تونل، Z_0 عمق مرکز تونل از سطح زمین، Z عمق هر نقطه مشخص و b نیم عرض گود نشست است. فاصله کانونی این سهمی از معادله $f = b^2/[4(a+z_0)]$ تعیین می‌شود.

از طرفی مبتنی بر یک تحلیل ساده [۱۱] معادله نشست نسبی زمین در هر تراز از زمین بالای تونل (و مخصوصاً در سطح زمین) را می‌توان با معادله زیر بیان کرد:

$$S = S_{\max} \cdot \cos 2\beta \cdot \cos(90\beta / \eta) \quad (5)$$

در معادله بالا مقدار داخل پرانتز بر حسب درجه است. به طوری که در شکل (۱) مشخص شده است برای هر تراز در عمق، β زاویه مرکزی بین راستای گذرا بر یک نقطه مشخص با خط قائم گذرا بر مرکز تونل است و η مقدار نهایی این زاویه (مربوط به نشست صفر) است که از معادله زیر قابل محاسبه است:

$$\eta = \arctan[x / (z_0 - z)] \quad (6)$$

معادله (۵) با معادله "پک" (معادله ۱) قابل انطباق است و منحنیهای مربوط به هر یک از مقادیر η با یکی از منحنیهای مربوط به یک مقدار معین i (از معادله "پک") تطبیق می‌کند [۱۱]. مزیت معادله (۵) در این است که اولاً صفر آن در فاصله محدود b از محور قرار دارد (در مقایسه با معادله (۱) که صفر آن در بی‌نهایت است) و ثانیاً در هر عمقی از سطح زمین کاربرد آن تعمیم داده می‌شود و نیز مبتنی بر رفتار فیزیکی خاک به دست آمده است.

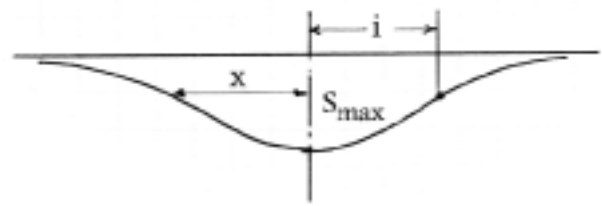
همچنین معادله بین نشست بیشینه سطح زمین و بیشینه نشست تاج تونل بر اساس یک تحلیل ساده در فاصله دو حد بالایی و پایینی به شرح زیر به دست آمده است [۱۱].

$$\lambda = \frac{2}{\sqrt{2[1+(z_0-z)/a]}} \quad (\text{در عمق}) \quad (7)$$

$$\text{و (در سطح)} \quad \lambda = \frac{S_{\max}}{S_c} = \frac{2}{\sqrt{2(1+z_0/a)}} \quad \text{حد بالایی}$$

$$\lambda = \frac{2}{\sqrt{1+(z_0-z)/a}} \quad (\text{در عمق}) \quad (8)$$

$$\text{و (در سطح)} \quad \lambda = \frac{2}{(1+z_0/a)} \quad \text{حد پایینی}$$



شکل ۱- نمایش توزع نشست در سطح زمین براساس منحنی آماری گوس ("پک"، ۱۹۶۹)

این معادله معمولی‌ترین معادله برای محاسبه نشست ماکزیمم در سطح زمین است ولی اثر نوع خاک در آن منظور نشده است. بعداً بر اساس مطالعه مجموعه‌ای از ۱۲۷ مورد اجرایی (۱۱۹ تونل منفرد و ۸ مورد تونل دوقلو)، "ونگ" و همکاران تغییراتی را در معادله فوق اعمال کردند [۹].

از معادله (۳-ب) می‌توان نسبت نشست در سطح زمین به نشست در تاج تونل را محاسبه کرد، زیرا ارتباط نشست در تاج تونل و حجم افت دهانه تونل، از معادله زیر قابل محاسبه است:

$$V_\ell = \Delta A / A_0 \times 100 = \left[1 - (1 - S_c/D)^2 \right] \times 100 = \left[2S_c/D - (S_c/D)^2 \right] \times 100$$

در معادله بالا، S_c نشست در سقف تونل، D قطر تونل، A سطح مقطع و ΔA کاهش سطح مقطع است.

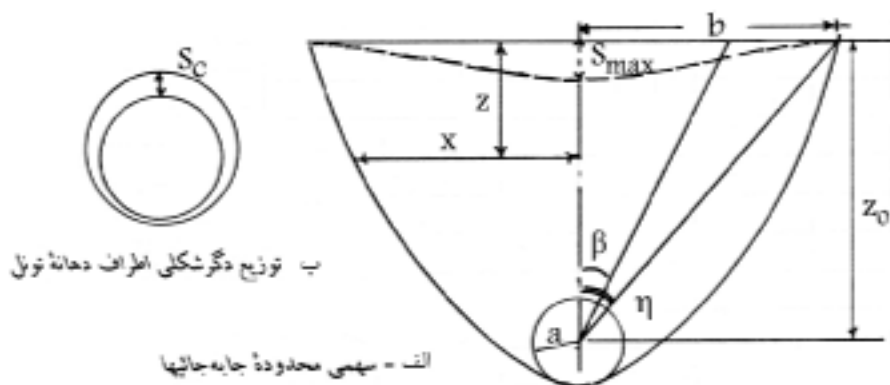
اگر از جمله درجه دوم صرف‌نظر شود، از معادله بالا

$$V_\ell = 100 \cdot S_c / a \quad \text{به دست می‌آید و آن‌گاه:}$$

$$S_{\max} = 1.26(S_c)(z_0/2a)^{-0.8} \Rightarrow \lambda = S_{\max}/S_c \quad (3\text{-ج}) \\ = 1.26(z_0/2a)^{-0.8}$$

با توجه به اینکه مشاهدات تجربی (اندازه‌گیریهای آزمایشگاهی و در مقیاس اجرایی) و نیز تحلیلهای مبتنی بر اجزای محدود (مثلاً مأخذ ۱۰) نشان می‌دهد که جابه‌جایی خاک در اطراف و بالای تونل در یک محدوده سهمی شکل رخ می‌دهد، از این رو در صورتی که عرض سهمی در سطح زمین معلوم باشد محدوده نشست خاک در هر تراز قابل پیش‌بینی است. بر اساس ابعاد نشان داده شده در شکل (۲)، معادله این سهمی مفروض عبارت است از:

$$x = b\sqrt{1-z/(z_0+a)} \quad (4)$$



شکل ۲- محدوده سهمی حابجاییها

در راستای افقی و قائم برای نقطه‌ای به مختصات z, x است و g پارامتر افت زمین است که بر حسب شرایط مختلف قابل محاسبه است [۱۳ و ۱۴].

از سوی دیگر، ارتباط نشست بیشینه سطح زمین با مشخصات فیزیکی- مکانیکی خاک کمتر مورد بحث تحلیلی قرار گرفته است و به علت پیچیدگی ارتباط این کمیتها با رفتار تنش- کرنش خاک، تعداد تحلیلها در این زمینه معدود است. به این علت نوعی جمع‌آوری و دسته بندی این ویژگیها توسط نگارنده صورت گرفت و نتیجه آن بررسی به صورت نمودارهایی ارائه شد [۱۵].

این نمودارها نشان‌دهنده حد بالایی مقادیر بیشینه نشستهای نسبی، یعنی نشست سطح زمین نسبت به قطر تونل (S_{max}/D) و نسبت نشست سطح زمین به نشست در دهانه تونل (λ) به صورت تابعی از کمیتهای فیزیکی مکانیکی خاک (E ، مدول دگر شکلی؛ c ، چسبندگی؛ γ ، وزن واحد؛ D ، قطر تونل و z_0 ، عمق مرکز تونل) است.

معادله‌های به دست آمده مناسب این نمودارها در مأخذ شماره (۵) ارائه گردیده و بر اساس مشخصات تجربی موجود از بعضی تونلهای مترو مورد ارزیابی قرار گرفته است. نمونه‌ای از این رابطه‌ها عبارت است از:

$$K = 100S_{max}/D = \frac{1.25}{0.25 + x^2} \quad \text{و} \quad x = \log(S_u \cdot z_0 / \gamma D) \quad (11)$$

کارایی معادله‌های (۵) تا (۸) بر اساس تطابق آنها با مقادیر اندازه‌گیری شده و بعضی تئوریهای دیگر در مرجع [۱۱] نشان داده شده است.

از طرفی تعدادی معادله‌های تحلیلی مفصل برای محاسبه نشستها و جابه‌جاییها افقی خاک در دهه اخیر توسط پژوهشگران مختلفی بسط داده شده است. نمونه‌ای از این معادله‌ها، معادله‌های ارائه شده توسط "وررویوت" و "بوکر" [۱۲] است که بعداً توسط "لگاناتان" و "پولس" (۱۹۹۸ و ۱۹۹۹) تکامل یافته و به صورت اصلاح شده زیر بیان شده است:

$$u_z = R^2 \left[-\frac{z-z_0}{x^2 + (z-z_0)^2} + (3-4\nu) \frac{z+z_0}{x^2 + (z-z_0)^2} - \frac{2z \left[x^2 - (z+z_0)^2 \right]}{\left[x^2 + (z+z_0)^2 \right]^2} \right] \times \frac{4Rg + g^2}{4R^2} \quad (9)$$

$$\exp \left\{ - \left[\frac{1.38x^2}{(z_0 + R)^2} + \frac{0.69z^2}{z_0^2} \right] \right\}$$

$$u_x = -R^2 X \left[\frac{1}{x^2 + (z_0 - z)^2} + \frac{3-4\nu}{x^2 + (z_0 + z)^2} - \frac{4z(z+z_0)}{\left[x^2 + (z_0 + z)^2 \right]^2} \right] \cdot \frac{4Rg + g^2}{4R^2} \times$$

$$\exp \left\{ - \left[\frac{1.38x^2}{(z_0 + R)^2} + \frac{0.69z^2}{z_0^2} \right] \right\} \quad (10)$$

در معادله‌های بالا، u_x و u_z به ترتیب دگر شکلی خاک

یکی از اهداف این مقاله، ارزیابی معادله‌های (۵)، (۷)، (۸) و (۱۱) بر اساس اطلاعات جدید تجربی و محاسباتی، است. لازم به یادآوری است که گرچه نقش مؤثر پارامترهایی چون E ، D ، v و z_0 در وضعیت و کمیت جابه‌جایی نقاط مختلف خاک اطراف تونل ضرورتاً قابل تشخیص و قابل پذیرفتن است ولی به دشواری می‌توان پذیرفت که عوامل مقاومتی خاک چون ϕ و c در مقدار جابه‌جاییها یا توزیع آنها مؤثر باشند، زیرا این دو کمیت از عوامل مقاومت خاک‌اند و هنگامی می‌توان اثر آنها را مشاهده کرد که جابه‌جاییهای در حد دگرشکلیهای برشی اتفاق افتد. ولی از آنجا که دگرشکلیهای اطراف تونل به صورت پیوسته و تقریباً تماماً در محدوده الاستیک است، نباید انتظار داشت که مقادیر ϕ و c به طور مستقیم در مقدار یا چگونگی توزیع جابه‌جاییها تأثیر داشته باشند. البته علاوه بر این توضیح استدلالی، جمع‌آوری نتایج تجربی متعدد نیز نشان داد که هیچ‌گونه ارتباط نموداری بین مقاومت خاک و نشستهای اندازه‌گیری شده مشاهده نمی‌شود [۱۵]. مشاهدات و اندازه‌گیریهای اخیر نیز این عدم ارتباط را تأیید می‌کند [۹]. با وجود این به این نکته باید توجه داشت که از آنجا که هر چه ϕ و c بزرگتر باشد بی‌تردید مقدار E نیز بزرگتر است، می‌توان پذیرفت که در خاکهای مقاومتر، نشستها کم‌ترند و در خاکهای سست‌تر، نشستهای بزرگتر ظاهر می‌شوند.

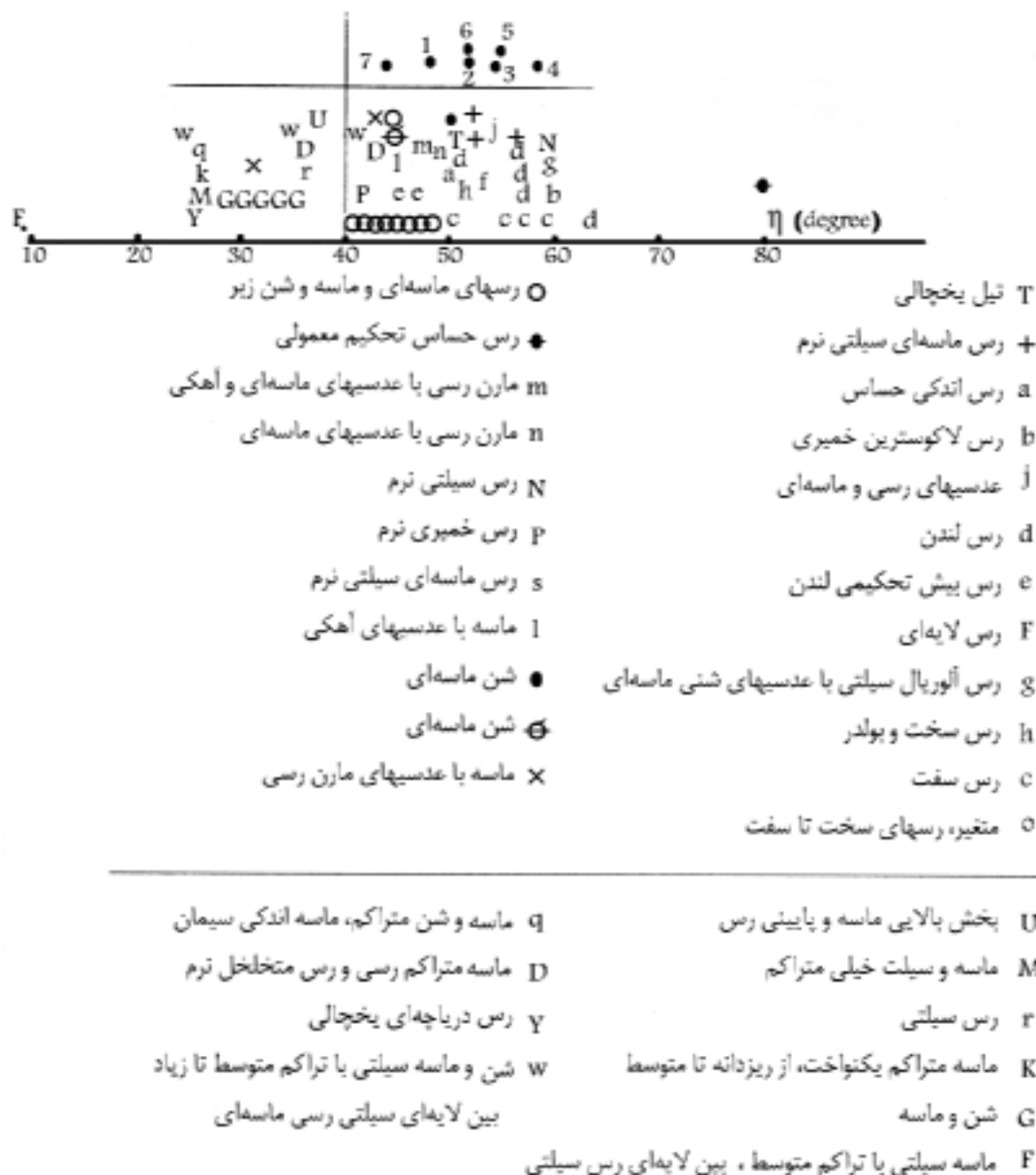
۲- تخمین محدوده نشست در خاکهای چسبنده و فاقد چسبندگی

به‌طوری که از معادله (۵) و شکل (۲) دیده می‌شود، محدوده سهمی نشست خاک، تابع زاویه η (یعنی زاویه حد نهایی گود نشست) است، اما مقدار این زاویه برای خاکهای مختلف مشخص نیست.

بر اساس پاره‌ای آزمایشهای آزمایشگاهی و مشاهدات آزمایشها در دستگاه "سانتریفوژ" و نیز اندازه‌گیریهای در مقیاس اجرایی مشخص شده است که نشست خاکهای ماسه‌ای بالای تونل در محدوده‌ای با عرض کوچکتر از محدوده نشست در

خاکهای چسبنده است. از این رو قاعدتاً زاویه η که در شکل (۲) نشان داده شده است به‌طور نسبی برای خاکها متفاوت است. بر پایه این تصور، اطلاعات مربوط به گزارشهای اندازه‌گیریهای در تونلهای حفر شده در خاکها جمع‌آوری شد و با فرض اینکه فاصله افقی انتهای گود نشست در سطح زمین به فاصله $2/5 i$ (که در مآخذ مربوط به آن ذکر شده است) از محور تونل است، زاویه مربوط به آن (در حقیقت $\tan \eta = 2.5i/z_0$) برای موارد موجود محاسبه شد.

در این بررسی حدود ۵۰ مورد از ۶۸ مورد که در کتاب "اتول" و همکاران وی [۴] گزارش شده است و ۷ مورد از مقالات دیگر [۱۳، ۱۴، ۱۶] مورد ارزیابی قرار گرفت. زاویه تعیین شده برای این موارد همراه با نوع خاک آنها در شکل (۳) نشان داده شده است. بطوری که از این نمودار می‌توان پذیرفت، اکثریت (حدود ۹۰ درصد) موارد دارای زاویه بین ۲۵ درجه تا ۶۰ درجه اند و استثنائاً مقادیر بسیار کوچک (تا ۷ درجه) و بسیار بزرگ (تا ۸۰ درجه) دیده می‌شود و می‌توان یک مرز تقریبی ۴۵° تا ۴۰° را حد فاصل خاکهای فاقد چسبندگی و خاکهای چسبنده در نظر گرفت زیرا تقریباً تمامی علامتهای مشخص شده در سمت $\eta = ۴۰^\circ$ مربوط به خاکهای رسی یا چسبنده است و علامتهای مشخص شده در سمت چپ این مقدار مربوط به خاکهای ماسه‌ای، سیلتی یا شنی است. حتی اگر در سمت $\eta = ۴۰^\circ$ ، نوع خاک از نوع شنی یا ماسه‌ای گزارش شده است، باید پذیرفت که از نوع ماسه‌ای است که به علت رسوب مواد دیگر بین دانه‌های آن نوعی چسبندگی بین آنها ایجاد شده است. بنابراین احتمالاً این فرض قابل قبول است که در مورد کاربرد معادله (۵)، برای خاکهای رسی محدوده $۴۰^\circ < \eta < ۶۰^\circ$ و برای خاکهای غیرچسبنده $۲۵^\circ < \eta < ۴۵^\circ$ است. همچنین باید توجه داشت که ممکن است به علت خزش یا به علت حرکت زه به درون تونل، دگرشکلیهای خاک اطراف تونل در درازمدت افزایش یابد (در صورتی که تونل فاقد پوشش داخلی باشد یا پوشش داخلی آن تا حدی انعطاف‌پذیر باشد)، در این صورت η نیز افزایش



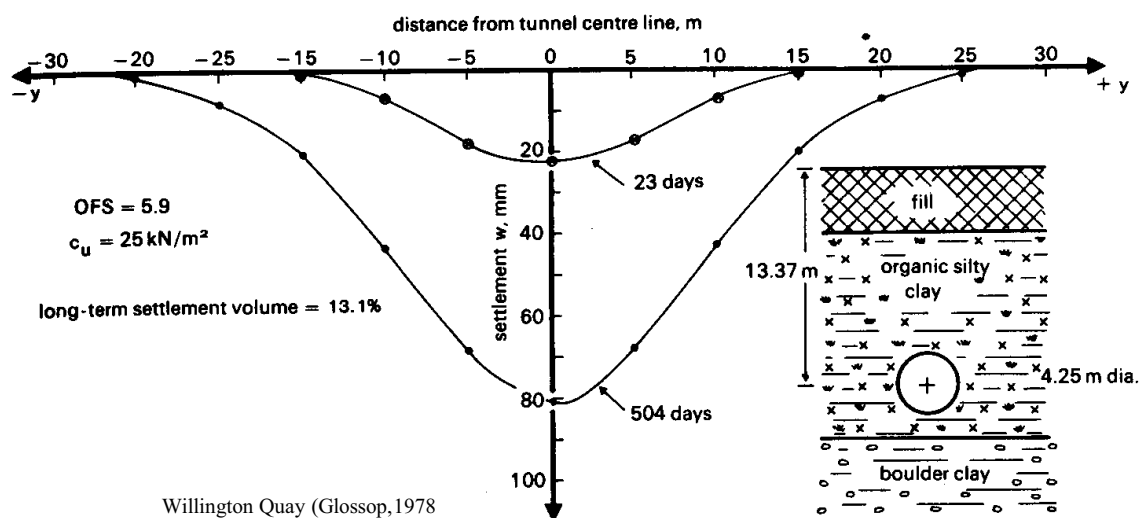
شکل ۳- تخمین زاویه گسترده‌گی نشست سطح زمین در انواع خاکها مبتنی بر اندازه‌گیریهای واقعی

۳- ارزیابی معادله‌های (۵) تا (۸) بر اساس اطلاعات

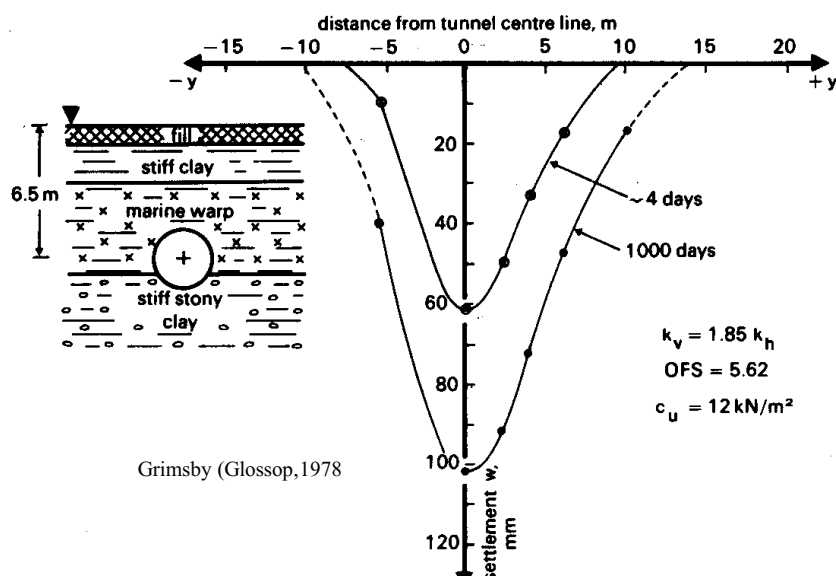
تجربی اخیر

در مقاله حاضر، معادله‌های ساده (۵)، (۷) و (۸) با نتایج اندازه‌گیریهای در تونلهای واقعی (اقتباس از مأخذ مربوط به آنها) مقایسه شده است. برای این مقایسه‌ها، نشست دهانه تونل در تاج آن (S_0) از معلومات مسئله است و سایر اطلاعات

می‌یابد. دو نمونه از چگونگی افزایش نشست سطح زمین در زمانهای طولانی در شکل (۴) مشاهده می‌شود [۱۷]. در این شکل افزایش مقدار نشست و گسترده شدن آن برای تونل؛ ویلینگتون؛ (زمانهای ۲۲ روز و ۵۰۴ روز) و تونل؛ گرینسبی؛ (زمانهای ۴ روز و ۱۰۰۰ روز) و مشخصات خاک در هر کدام نشان داده شده است.



Willington Quay (Glossop, 1978)



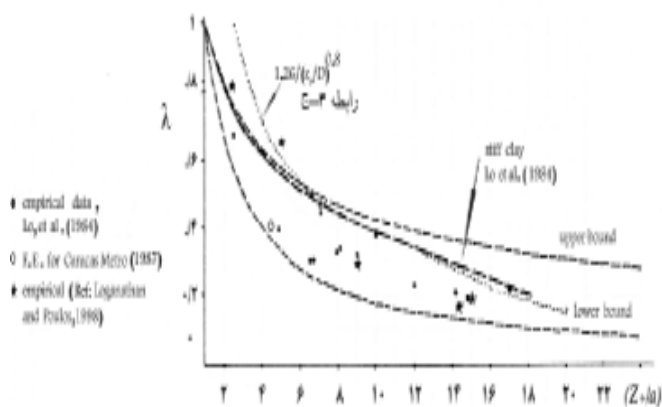
Grimsby (Glossop, 1978)

شکل ۴- نمونه‌هایی از افزایش نشست زمین بعد از گذشت زمان [۱۷]

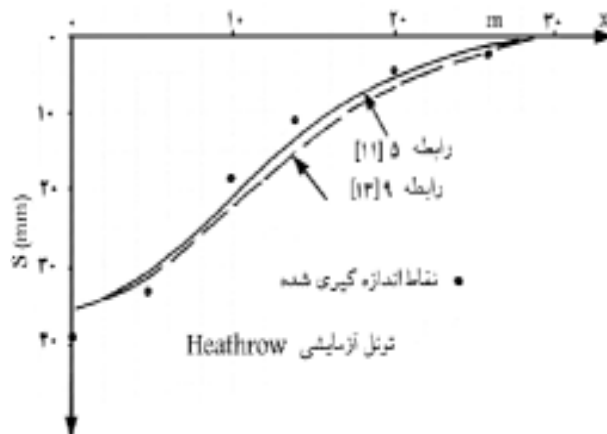
است و در بعضی موارد نقطه مناسب دیگری که منحنی را در وضعیت میانگین نقاط تجربی قرار دهد انتخاب شده است. در عین حال در این مقایسه‌ها همان مقدار انتخاب شده در مراجع [۱۳، ۱۴ و ۱۶] مربوط به آن گرفته شده است.

در شکل (۵) نصف مقطع نشستهای محاسبه شده و نقاط تجربی نشان داده شده است. این شکل مربوط به تونل "هیت‌رو" در انگلستان می‌باشد. در این شکل، نمودار نشست حاصل از محاسبات "لگاناتان" و "پولس"، (معادله ۹) ترسیم شده و با نقاط مربوط به اندازه‌گیریها مقایسه گردیده است و

نیز از مقالات مربوط به آنها اتخاذ شده است، گرچه اصل اطلاعات از مآخذ دیگری است. با استفاده از معلومات مسئله در مورد قطر تونل و عمق آن و مشاهده وضعیت توزیع نشست مقطع خاک بر اساس نقاط تجربی نشان داده شده، به سهولت نقطه صفر نشست قابل پیش‌بینی است که فاصله‌اش تا امتداد محور تونل b نامیده می‌شود، شکل (۲)، و نسبت این فاصله به عمق تونل، همان $\tan \eta$ است، آنگاه از معادله (۵) منحنی توزیع نشست در سطح زمین مشخص شده است. مقدار S_{max} مورد نیاز در معادله، معمولاً همان مقدار اندازه‌گیری شده



شکل ۶- ارتباط مقادیر نسبت نشست (λ) با عمق نسبی تونل (z_0/a)، رابطه‌ها و نقاط تجربی



شکل ۵- مقایسه معادله (۵) و معادله (۹) با مقادیر اندازه‌گیری شده در تونل "هیترو" (اطلاعات از مرجع [۱۳])

مربوط به مواردی از گزارشهای قبلی است که منجر به مشخص شدن این منحنیها شده است [۱۸].

در مواردی که نشست سقف تونل معلوم نیست ولی میزان کاهش مساحت سطح مقطع تونل مشخص است (افت مقطع)، می‌توان نشست بیشینه در تاج تونل را با توجه به شکل (۲-ب) محاسبه کرد (با اندکی تقریب):

$$S_c = D_0 - \sqrt{(A_0 - V_1 \times A_0) / \pi} = D_0 (1 - \sqrt{1 - V_1}) \quad (12)$$

در این محاسبه، D_0 قطر حفاری تونل و A_0 مساحت اولیه مقطع تونل است.

همچنین مقایسه معادله (۱۱) با اطلاعات تجربی به عنوان نمونه، در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که از این شکل دیده می‌شود، مقادیر مربوط به نقاط تجربی در محدوده نمودار پیشنهاد شده در این شکل قرار می‌گیرد جز مقدار مربوط به تونل "تاندربی" که مشخصه آن در شکل (۷) بالای محدوده معادله (۱۱) قرار گرفته است. علت این پدیده قابل پیش‌بینی است زیرا اطلاعات متعدد پیشین هم نشان داده بود که خاکهای بسیار نرم سیلتی و مخصوصاً زیر سطح آب زیرزمینی، فاصله قابل توجهی نسبت به این منحنی دارند. اتفاقاً در مورد این تونل نیز از کل

نمودار حاصل از محاسبه معادله (۵) نیز در کنار این نتایج نشان داده شده است. به طوری که ملاحظه می‌شود منحنی حاصل از معادله (۵) در مورد این تونل تا حدی مناسبتر است. محاسبات و نمودارهای مشابهی برای تونلهای "تاندربی"، "گرین پارک"، "بارسلونا" و "بانکوک" نیز در مرجع شماره (۱۵) ارائه شده است که از تکرار آنها در مقاله حاضر صرف نظر می‌گردد. مشخصات کامل این تونلها در جدول شماره (۱) ملاحظه می‌شود. از طرفی در این محاسبات، نشست بیشینه نسبی سطح زمین ($\lambda = S_{max}/S_c$) بر اساس معادله‌های دو حد بالایی و پایینی برای هر کدام از موارد محاسبه شده و با مقدار اندازه‌گیری شده مقایسه شده است. نتیجه این محاسبه و مشخصات دیگر تونلها در جدول (۱) ملاحظه می‌شود.

از این جدول نتیجه می‌شود که مقادیر نسبت نشست بیشینه (λ) که بر اساس اندازه‌گیری به دست آمده است، عموماً در محدوده پیش‌بینی شده در معادله‌های (۷) و (۸) (حد بالایی و حد پایینی) قرار می‌گیرند. علاوه بر این دیده می‌شود که برای مقادیر کوچکتر نسبت z_0/a مقدار مبتنی بر اندازه‌گیری به مقدار حاصل از حد بالایی نزدیکتر است و بالعکس. این نقاط در نمودار (۶) مشخص شده‌اند. نقاط فاقد شماره در این نمودار،

جدول ۱- محاسبه مشخصات نشست زمین و مشخصات تونلها [۱۸]

محاسبه شده در مطالعه حاضر				اطلاعات از مرجع [۱۳] و [۱۴]					
$\eta_{(o)}$	$\lambda_{(d)}$	$\lambda_{(u)}$	λ	$S_{max}(mm)$	$S_c(mm)$	z_0/a	عمق (m)	قطر (m)	نام تونل
۵۸	۰/۳۶	۰/۶	۰/۶۷	۳۹	۵۸	۴/۴۷	۱۹	۸/۵	"هیترو"
۵۳	۰/۲۱	۰/۴۵	۰/۳	۵۰	۱۶۴	۸/۶۷	۱۰/۷	۲/۴۷	"تاندربی"
۴۷	۰/۱۳	۰/۳۶	۰/۱۷۶	۶	۳۴	۱۴/۲	۲۹/۴	۴/۱۴	"گرین پارک"
۶۰	۰/۵۷	۰/۷۵۶	۰/۷۷۵	۲۴	۳۱	۲/۵	۱۰	۸	"بارسلونا"
۵۸	۰/۱۳۳	۰/۳۶۵	۰/۱۴۸	۱۲	۸۱	۱۴	۱۸/۵	۲/۶۶	"بانکوک"
۵۱	۰/۲۸	۰/۵۲۸	۰/۶۵	۲۶	۴۰	۶/۱۷	۱۸/۵	۶	"تایپه" [۱۴]

در جدول بالا $\lambda = S_{max} / S_c$ (بر مبنای اطلاعات تجربی)، λ (u) (حد بالایی، معادله ۷) و λ (d) (حد پایینی، معادله ۸) است.

$$d_h = S_{max} \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta \cdot \cos(90\beta / \eta) \quad (13)$$

$$= \frac{1}{2} S_{max} \sin 2\beta \cdot \cos(90\beta / \eta)$$

این معادله، مانند معادله (۵)، برای هر ترازى (از سطح زمین تا سقف تونل) قابل استفاده است و S_{max} حداکثر نشست خاک در همان تراز معین است، مقدار η نیز در هر ترازى از معادله (۶) محاسبه می‌شود.

۵- توسعه جابه‌جاییها به کف تونل

به منظور تعمیم این بحث و توسعه محدوده جابه‌جاییها در شکل (۱) برای حالتی که جابه‌جایی خاک به درون تونل از طرفین و از کف تونل نیز انجام می‌شود، می‌توان محدوده سهمی نشان داده شده در شکل (۲) را به نفاذ عمیقتر و زیر تونل گسترش داد.

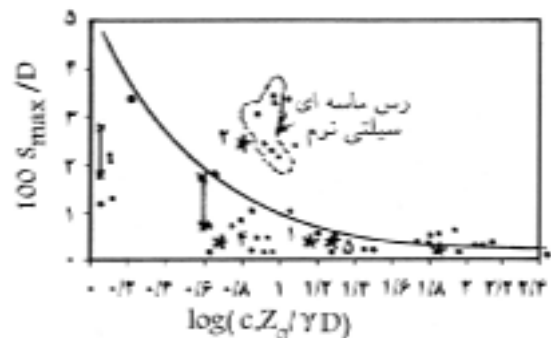
نمونه‌ای از این وضعیت در شکل (۸- الف) نشان داده شده است. رأس سهمی محدوده جابه‌جاییها در عمق $Z_B = ma$ زیر کف تونل قرار دارد و معادله این سهمی به طور عمومی بر حسب مقدار انتخابی m (یا بر اساس تجربه)، چنین است:

$$x = b \sqrt{1 - \frac{z}{z_0 + a(1+m)}} \quad (14)$$

فاصله کانونی این سهمی از معادله زیر قابل محاسبه است:

$$f = b^2 / \{4[z_0 + a(1+m)]\} \quad (15)$$

فاصله Z_B ممکن است از صفر تا مثلاً ۲ تا ۳ برابر a متغیر باشد.



شکل ۷- ارتباط مقادیر نشست نسبی (S_{max} / D) با نسبت $(cz_0 / \gamma D)$ (شماره‌ها، شماره ردیف تونلها در جدول شماره ۱ می‌باشد)

ضخامت ۸/۲۳ متر روبار بالای این تونل، ۸ متر آن ماسه سیلتی است.

۴- پیش‌بینی توزیع جابه‌جاییهای افقی

گرچه محاسبه جابه‌جاییهای افقی با استفاده از معادله "پک" میسر نیست ولی بعضی از پژوهشگران درباره این موضوع معادله‌هایی را ارائه داده‌اند که محاسبه جابه‌جایی افقی نیز قابل پیش‌بینی است. از جمله این معادله می‌توان به معادله (۱۰) اشاره کرد. اکنون با توجه به اینکه معادله (۵) که برای نشست خاک (جابه‌جایی قائم) به دست آمده است حاصل تحلیل ساده‌ای است [۱۱] که از آن تحلیل می‌توان جابه‌جایی افقی را نیز محاسبه کرد، از این رو مبتنی بر آن تحلیل، معادله مؤلفه افقی جابه‌جایی عبارت است از:

نمودار توزیع جابه‌جاییهای قائم و افقی در شکل (۸-ب) نشان داده شده است. برای مقایسه مقادیر جابه‌جاییها در هر نقطه، کافی است توجه شود که S_{max} در هر تراز، مربوط به همان افق و عبارت است از حداکثر نشست خاک در آن تراز در محدوده ۲b و مقدار این نشستهای حداکثر، نسبت به نشست دهانه تونل در تاج آن بر اساس معادله‌های (۷) و (۸) پیش‌بینی می‌شود. در این نمودار، بر اساس فرض حد بالایی، معادله (۷)، نسبت S_{max}/S_c برای $z_0/a \cong 6$ برابر ۰/۵ گرفته شده است و تمام نشستها و جابه‌جاییهای افقی بر اساس $S_c = 1$ محاسبه شده است.

منحنیهای توزیع جابه‌جاییهای قائم و افقی در شکل بر اساس معادله‌های (۵) و (۱۳) محاسبه شده و نشان داده شده است. وضعیت تغییرات جابه‌جاییهای قائم و افقی در امتدادهای قائم، در شکل (۸-ج)، و خطوط تراز جابه‌جاییهای قائم در شکل (۹) مشاهده می‌شود.

لازم به یادآوری است که هر چند کارآیی معادله‌های (۵) و (۱۳) برای بخشهای بالای تراز سقف تونل مناسب و قابل انطباق با الگوی مقادیر اندازه‌گیری است ولی برای افقهای زیر سقف تونل به تدریج از کارایی معادله‌ها کاسته می‌شود و این نتیجه‌گیری کاملاً طبیعی است، زیرا در بخشهای بالایی خاک، وضعیت خاک حالت عامل دارد و در بخشهای پایینی، وضعیت مقاوم می‌یابد و در حقیقت مرکز تونل که به عنوان محور حرکت خاک به آن سمت در نظر گرفته شده است، برای افقهای بالای مرکز تونل، حرکت خاک که به سمت تونل است در جهت عامل اصلی حرکت (که ثقل است می‌باشد ولی برای افقهای زیر مرکز تونل، گرچه جهت حرکت به سمت تونل (یا مرکز آن) است ولی امتداد نیروی ثقل که بر خلاف آن است جهتی متفاوت دارد. از این رو نباید انتظار داشت که فرض رفتاری تحلیلی که به معادله‌های (۵) و (۱۳) منجر شده است در افقهای پایینی‌تر از مرکز تونل کارایی داشته باشد.

در عین حال، در حوالی دهانه تونل، با توجه به جابه‌جایی دهانه تونل که معلوم فرض می‌شود یا نسبت به جابه‌جایی تاج

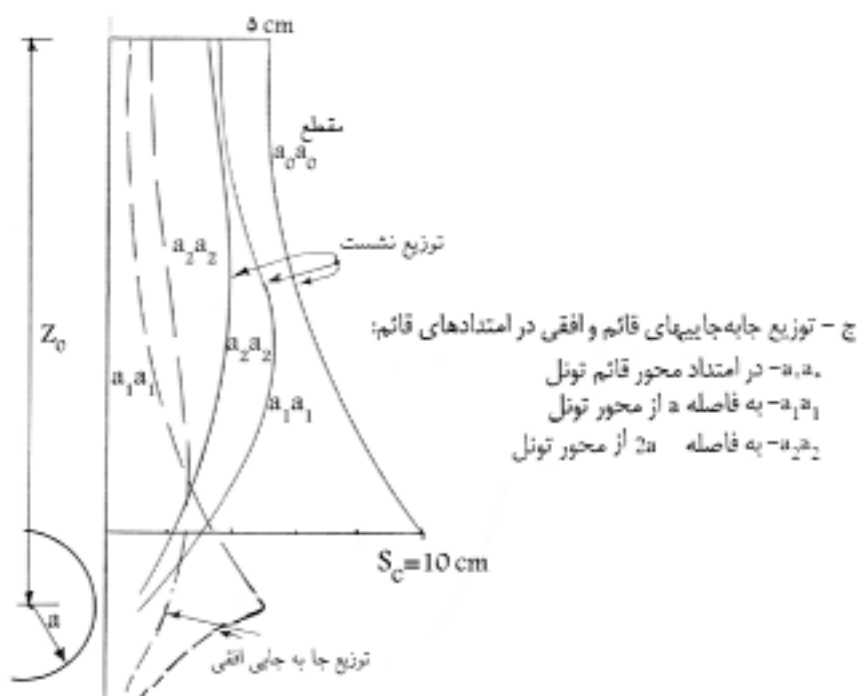
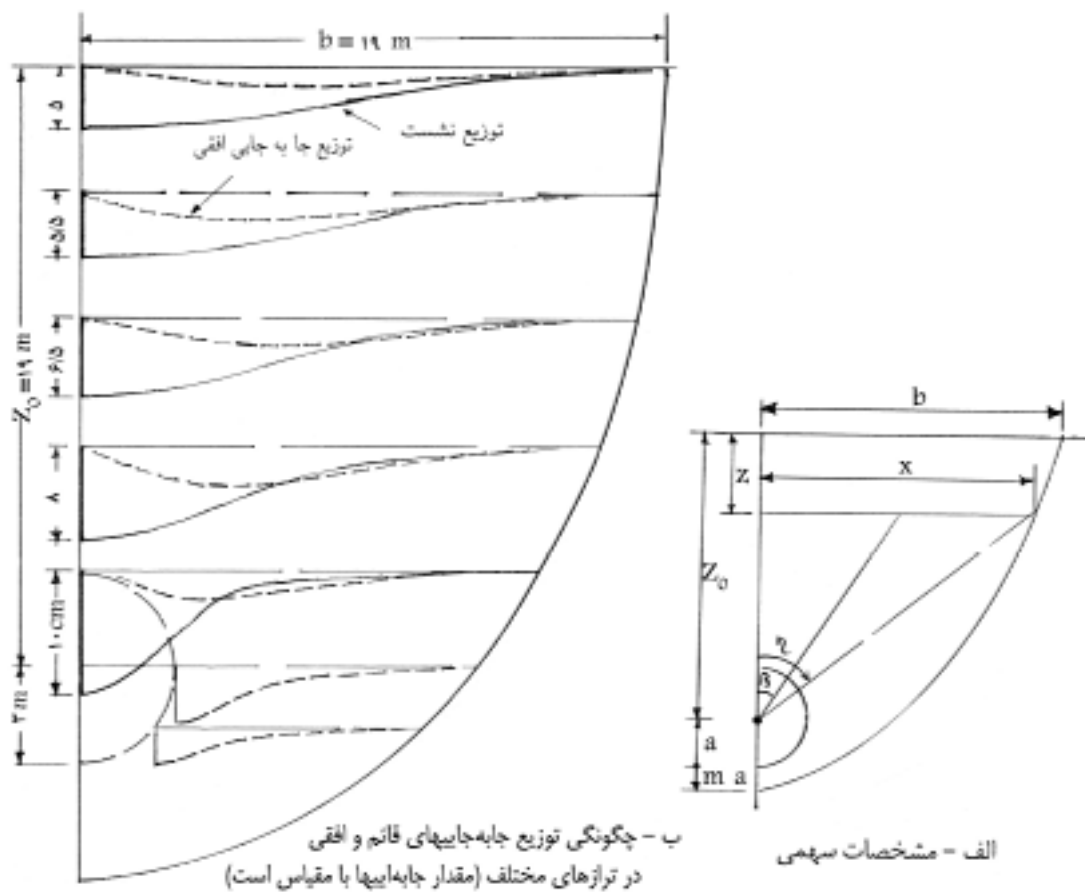
تونل (S_c) تخمین زده می‌شود، می‌توان توزیع جابه‌جاییها را در بخشهای زیرین هم در محدوده سهمی نشان داد. در شکل (۸-ب)، جابه‌جاییها پایین تراز سقف تونل بر اساس اینکه $S_c = 10\text{cm}$ و $d_h = 5\text{cm}$ و $d_b = 1\text{cm}$ است ترسیم شده است. از طرفی الگوی خطوط تراز توزیع جابه‌جاییها قائم مربوط به همین مقادیر مذکور در شکل (۹) ارائه شده است.

۶- استفاده از کاربرد اجزای محدود

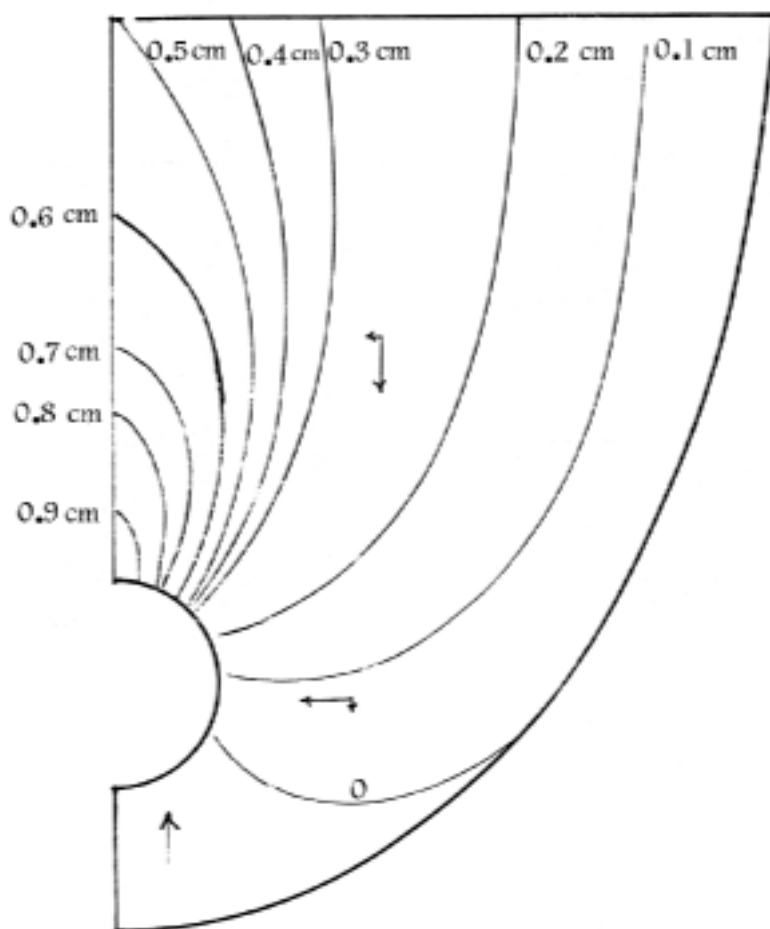
به منظور بررسی رفتار خاک اطراف تونل به کمک نرم‌افزار اجزای محدود، مطابق شکل (۱۰) نیم‌فضایی با ارتفاع H ، نیم‌عرض ۱۲۰ متر و تونلی با قطر $D = 2a = 6\text{m}$ در نظر گرفته شد. با انتخاب مقادیر مختلف d_h ، Z_0 و Z_B (ضخامت لایه زیرین تونل) می‌توان تأثیر تغییر کمیت‌های Z_0/a و Z_B/H را بر وضعیت توزیع نشستها به دست آورد. از آنجا که در این برنامه، شبکه‌بندی به صورت چهار ضلعیهای ۸ گرهی است مدل کردن محیط تونل روی گره‌هایی انجام شد که مجموعه آنها بتواند با تقریب اندکی، وضعیت دایره را مجسم کند. نرم‌افزار مورد استفاده به نام Afen32 است که یکی از مدل‌های رفتاری موجود در آن مدل "الاستیک-پلاستیک کامل با معیار موهرکولمب" است [۱۹].

با استفاده از این نرم‌افزار و با کاربرد روش جابه‌جاییهای اجباری در دهانه تونل، دگرشکلیهای به وجود آمده در نقاط مختلف مقطع قائم خاک تعیین شده و از نتایج آنها نمودارها و شکل‌های مناسب ترسیم شد.

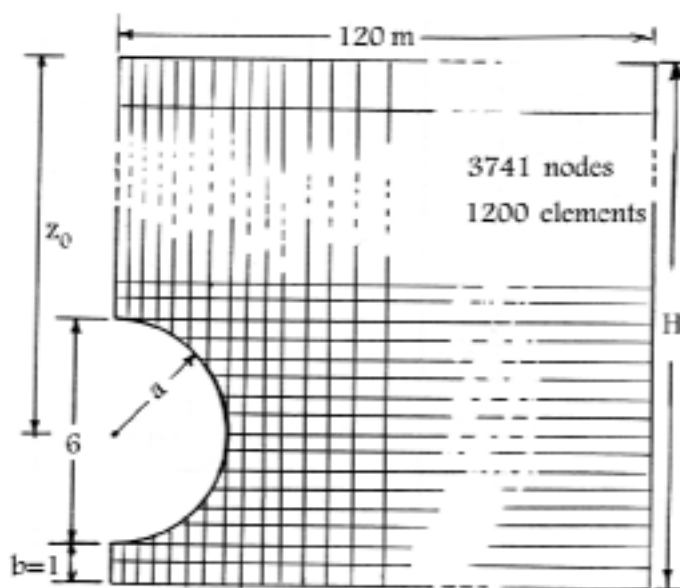
در شکل (۱۱-الف)، موقعیت و شماره گره‌های انتخاب شده به عنوان محیط دهانه تونل دایره‌ای مشخص شده است ضمن اینکه در جدول کنار همین شکل، مقادیر دگرشکلیهای فرضی اجباری نشان داده شده است. این نوع توزیع دگرشکلیهای با مقیاس نسبی مناسب دیده می‌شود. شکل (۱۱-ب و ج)، وضعیت جمع شدگی دهانه تونل را در دو حالت معمول نشان می‌دهد.



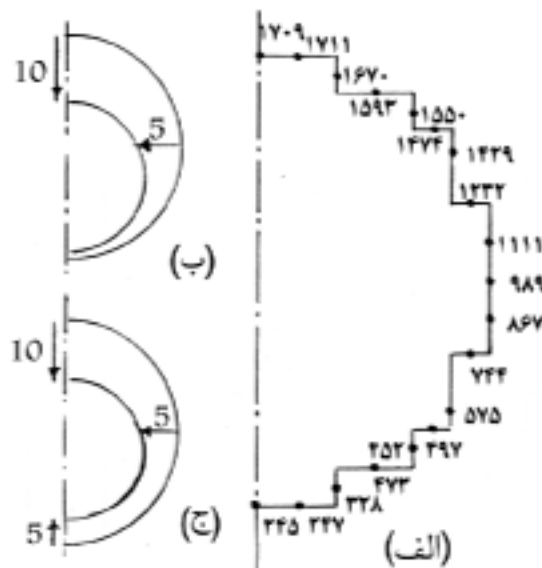
شکل ۸- الگوی جابه‌جاییهای قائم و افقی اطراف و بالای تونل (نصف مقطع) بر اساس رابطه‌ای ۵ و ۱۳



شکل ۹- خطوط تراز جابه‌جاییهای قائم حاصل از حفر تونل (نصف مقطع قائم)



شکل ۱۰- ابعاد و شبکه اجزای محدود برای محاسبه جابه‌جاییها (نصف مقطع)



شکل ۱۱- الف) موقعیت و شماره گره های در دهانه تونل، ب) الگوی توزیع جابه جاییهای دهانه تونل بدون تورم کف، ج) مشابه وضعیت ب ولی با تورم کف تونل

$K_0 = 0.5$, $E = 5-100\text{MPa}$, $\phi = 30^0 - 45^0$, $\nu = 0.49$

$\gamma = 18\text{kN/m}^3$, $c = 100-200\text{kPa}$

Z_0 , $H = 10, 16, 22, 40, 60, 76, 99\text{m}$, $D = 2a = 6\text{m}$

بررسیهای محاسباتی نشان می دهد که برای محیط همگن و همسان فرضی، تغییر مدول الاستیسیته E ، چه به صورت یکنواخت یا متغیر در راستای قائم، روی مقدار نسبت نشست پواسون، نه تنها بر مقادیر به دست آمده دگر شکلیهای افقی تأثیرگذار است بلکه بر مقدار نسبی نشست نیز مؤثر است. چگونگی تأثیر این کمیتها در نمودارهای مربوط به آنها ارائه شده است.

نتایج به دست آمده از این محاسبات را می توان در چند کمیت مطلق یا نسبی در مقطع قائم خاک به شرح زیر مورد بررسی و مقایسه با سایر تحلیلها و نتایج تجربی قرار داد:

- ۱- خطوط تراز دگر شکلیهای قائم، ۲- خطوط تراز دگر شکلیهای افقی، ۳- بردارهای جابه جایی دانه های خاک به سمت تونل، ۴- فرم منحنی توزیع نشست در سطح زمین، ۵- فرم منحنی تغییرات نشست از تاج تونل تا سطح زمین و محاسبه نسبت نشست (λ) ، ۶- چگونگی تغییرات (λ) بر حسب

با توجه به اینکه کمیتهای هندسی و فیزیکی متعددی در رفتار خاک مؤثر است در ابتدا لازم بود که تأثیر تغییر کمیتهای هندسی و فیزیکی مورد نظر در محدوده معمول و منطقی مورد بررسی قرار گیرند و بر این اساس محاسبات متعددی صورت گرفت. همچنین با توجه به اینکه این کمیتها ممکن است شرایط رفتاری را از حالت الاستیک به پلاستیک تبدیل کنند انتخاب مقادیر فرضی آنها نسبت به یکدیگر از این دیدگاه نیز اهمیت می یابد. بدیهی است در صورتی که مقادیر مقاومتی خاک نسبتاً زیاد انتخاب شود و مقدار مدول دگر شکلی نسبتاً کم انتخاب شود وضعیت خاک به صورت الاستیک باقی می ماند و در صورتی که مقادیر مقاومتی خاک نسبتاً کم یا متوسط و مدول الاستیسیته نسبتاً در حد زیاد در نظر گرفته شود، تغییر شکلیهای اجباری منظور شده در دهانه تونل موجب پلاستیک شدن دهانه تونل می شود، مثلاً چنانچه $\phi = 45^0$ ، $c = 200\text{kPa}$ ، $E = 5\text{MPa}$ در نظر گرفته شود، وضعیت دهانه تونل در اثر مقادیر نشان داده شده دگر شکلیهای اجباری همچنان الاستیک باقی می ماند و به وضعیت پلاستیک منجر نمی شود. در این محاسبات حدود کمیتهای به کار برده شده معمولاً به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

عمق نسبی تونل در شرایط مختلف الاستیک و پلاستیک، ۷-
تأثیر ضخامت لایه خاکی زیر کف تونل تا سنگ بستر بر مقادیر
جابه‌جاییها و بر مقدار نسبت نشست، و ۸- تأثیر برآمدگی کف
تونل بر کلیه مقادیر ذکر شده در بالا.

در گروهی از محاسبات، با فرض ثابت بودن ضخامت لایه
زیر کف تونل و بر اساس توزیع دگرشکلیهای نشان داده شده
در شکل (۱۱-ب)، در شرایط الاستیک، کمیت‌های مورد نظر
محاسبه شده و نمودارهای مربوط به آنها به دست آمد و ترسیم
شد. در گروه دیگری از محاسبات، تأثیر افزایش ضخامت لایه
زیرین تونل مورد محاسبه قرار گرفت و در بخش دیگری از
مطالعه، تأثیر برآمدگی کف تونل بررسی شد.

در جدول شماره (۲)، وضعیت‌های مختلف فرض شده برای
ابعاد مدل و تونل و نیز نتایج به دست آمده در حالت‌های محاسبه
شده، نشان داده شده است.

در شکل (۱۱-الف) وضعیت گره‌های دهانه تونل نشان داده
شده و در شکل‌های (۱۲) تا (۱۴) شکل‌های نمونه‌ای از وضعیت
دگرشکلیها در بعضی از حالت‌های در نظر گرفته شده ارائه شده
است.

از آنجا که یکی از کمیت‌های مورد بحث در این گونه
مطالعات، مقدار نسبت نشست (λ) است، از این رو برای
حالت‌های مختلف مورد مطالعه، مقدار این کمیت محاسبه شده و
نمودار مناسب آن که مقدار آن را تابعی از z_0/a نشان می‌دهد
ترسیم شده است. در شکل (۱۵-الف) نمودار تغییرات λ بر
حسب z_0/a برای شرایط 2m و $z_B = 1$ و برای وضعیت
 $v = 0$ دیده می‌شود. می‌توان پذیرفت که گرچه ضخامت لایه
زیرین کف تونل بر مقدار λ مؤثر است ولی به نظر می‌رسد که
این تأثیر به یک مقدار حدی آن محدود می‌شود.

به منظور مقایسه نتایج به دست آمده در مورد λ با نتایج
تجربی یا پیشنهادی قبلی، منحنی پیشنهادی "لو" و همکاران
[۲۰] و منحنیهای "دلافونته" و "اته"، اقتباس از مرجع [۷] و نیز
معادله‌های حد بالایی و پایینی مقدار λ (معادله‌های (۷) و (۸)،
از مرجع [۱۱] مجدداً در نمودار شکل (۱۶) نشان داده شده است.

لازم به تذکر است که منحنی "لو" و همکاران برای رس‌های
سفت و منحنیهای "دلافونته" و "اته" برای حل الاستیک برای
دو حالت $v = 0.2$ و $v = 0.3$ به دست آمده است و شکل
اصلی آنها به صورت نموداری از مقدار نسبی S_c/S_{max}
(یعنی عکس λ) است و از روی آن نمودار مقادیر عکس
این نسبت اقتباس شده و در نمودار شکل (۱۶) منتقل
شده است. در نمودار شکل (۱۶) نقاط مربوط به
اندازه‌گیریها نیز دیده می‌شوند که این نقاط مربوط به
اندازه‌گیریهای مستند به اطلاعاتی است که از مقالات متعدد
به دست آمده‌اند و در مرجع [۱۱] به گزارش آنها ارجاع داده شده
است.

برای بررسی اثر برآمدگی کف تونل نیز تعدادی از حالت‌های
محاسبه شده مجدداً بر اساس توزیع تغییر شکل‌های نشان داده
شده در شکل (۱۱-ج) محاسبه شد و تأثیر این شرایط بر کمیت‌ها
و نمودارهای مورد مطالعه مشخص شد. از جمله مشاهده شد
که در صورتی که کف تونل دارای برآمدگی باشد مقدار λ
برای شرایط $v = 0$ اندکی کاهش می‌یابد، در حالی که برای
مقادیر بزرگتر ضریب پواسون این تأثیر ناچیز می‌شود. همچنین
ضخامت لایه زیرین تونل بر مقدار محاسبه شده λ تأثیرگذار
است. نتایج عددی این محاسبات در جدول (۳) دیده می‌شود.

این مقایسه‌ها نشان می‌دهد که مجموعه متغیرهایی که در
حل الاستیک مؤثرند می‌توانند نتایج رفتاری را در محدوده قابل
قبولی گسترش دهند به طوری که می‌توان اطمینان نمود که اکثر
موارد اجرایی را می‌توان به کمک حل الاستیک مورد بررسی
قرار داد.

به منظور بررسی تأثیر پلاستیک شدن خاک، مقادیر c و
 ϕ در برنامه‌های محاسباتی کاهش داده شد و مشاهده گردید که
پدیده پلاستیک شدن خاک از دهانه تونل شروع می‌شود و در
دو سمت بالای تونل گسترش می‌یابد. نمونه‌ای از این شرایط در
شکل ۱۷ نشان داده شده است. شرایط مفروض برای این
وضعیت همان شرایط برنامه tune5 در جدول ۲ می‌باشد جز
اینکه مقادیر پارامترهای مقاومت در این برنامه $\phi = 20$ و

جدول ۲- مشخصات ابعادی تونلهای محاسبه شده و تعیین λ در دو حالت $\nu = 0$ و $\nu = 0.49$
 توزیع جابه‌جایی بر اساس شکل (۱۱-ب) توزیع جابه‌جایی بر اساس شکل (۱۱-ج)

نام برنامه	λ		λ		Z_B (m)	Z_0/a	Z_0 (m)	H (m)	نام برنامه
	$\nu = 0$	$\nu = 0.49$	$\nu = 0$	$\nu = 0.49$					
			0.136	0.1	1	24	72	76	Tune8
			0.173	0.27	1	19	56	60	Tune4
			0.26	0.195	1	12	36	40	tune2
			0.457	0.37	1	6	18	22	tune5
			0.61	0.51	1	4	12	16	tune6
tnl7	0.9	0.78	0.91	0.79	1	2	6	10	tune7
tnl10	0.161	0.123	0.188	0.122	14	24	72	89	tune10
			0.212	0.136	24	24	72	99	tune11
			0.323	0.24	14	12	36	53	tune12
tnl9	0.26	0.21	0.281	0.205	4	12	36	43	tune9
			0.505	0.42	11	6	18	33	tune13
			0.905	0.79	11	2	6	20	Tune14

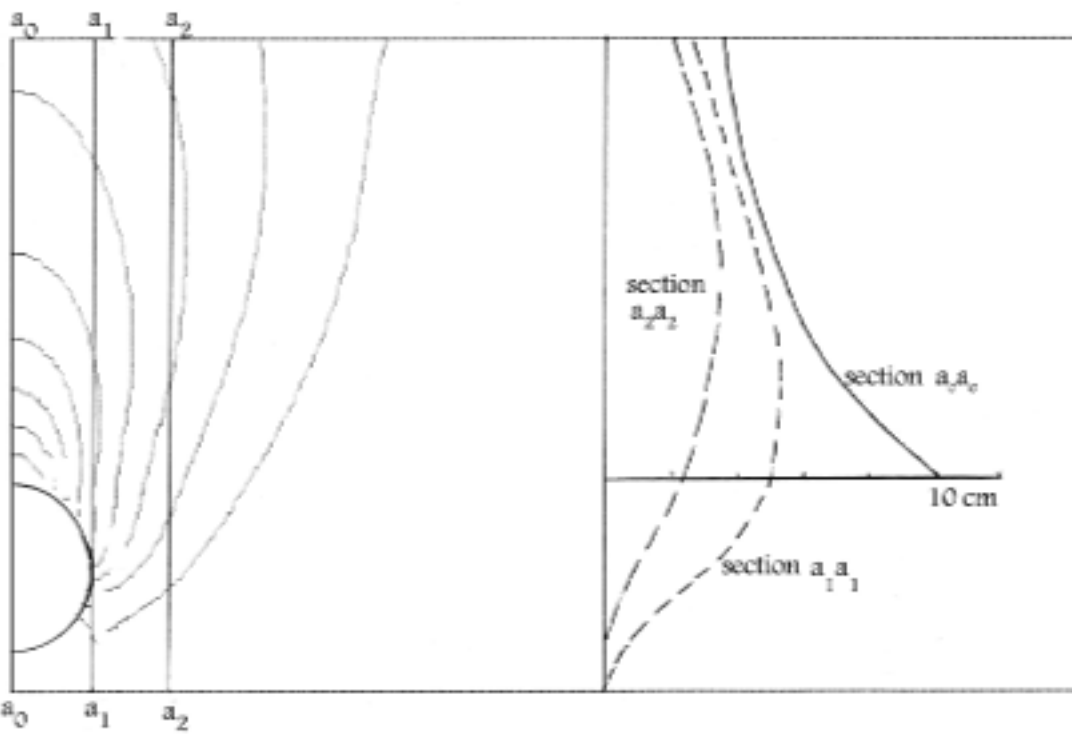
در تمام موارد، قطر تونل ۶ متر و نشست تاج تونل ۱۰ سانتیمتر بوده است.

برنامه اجزای محدود قادر به نشان دادن منطقه پلاستیک شدگی و گسترش آن در خاکهای سست می‌باشد ولی می‌توان پذیرفت که در موارد معمولی عملاً شرایط زمین در محدوده الاستیک باقی می‌ماند. به هر حال چنانچه به لحاظ رفتاری پدیده پلاستیک شدگی رخ دهد تأثیر محاسباتی آن مشابه تأثیر افزایش قطر تونل است (زیرا بخش پلاستیک شده دیگر باربر نیست)، از این رو تأثیر پلاستیک شدگی دهانه تونل مشابه کاهش مقدار Z_0/a می‌باشد که نتیجه آن افزایش در مقدار λ می‌باشد ولی مقدار این تغییر چندان قابل توجه نیست. با وجود این اظهار نظر در مورد وضعیت پلاستیک شدگی خاک و تأثیر آن در شرایط حفر تونلها نیاز به بررسیهای مفصلتر و بسیار حساستر دارد زیرا در میان انواع مدل‌های رفتاری خاکها در شرایط پلاستیسیته ممکن است بعضاً تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی داشته باشند. همچنین در شرایط پلاستیک شدگی عمق تونل (جدا از عمق نسبی) تأثیرگذار است.

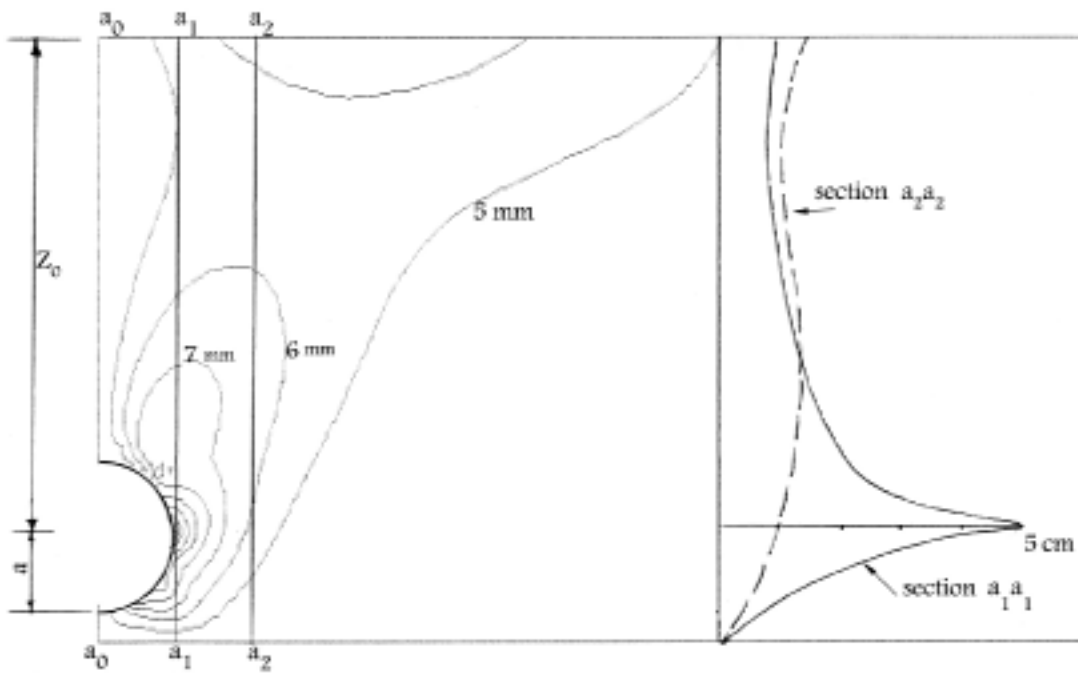
برنامه اجزای محدود قادر به نشان دادن منطقه پلاستیک شدگی و گسترش آن در خاکهای سست می‌باشد ولی می‌توان پذیرفت که در موارد معمولی عملاً شرایط زمین در محدوده الاستیک باقی می‌ماند. به هر حال چنانچه به لحاظ رفتاری پدیده پلاستیک شدگی رخ دهد تأثیر محاسباتی آن مشابه تأثیر افزایش قطر تونل است (زیرا بخش پلاستیک شده دیگر باربر نیست)، از این رو تأثیر پلاستیک شدگی دهانه تونل مشابه کاهش مقدار Z_0/a می‌باشد که نتیجه آن افزایش در مقدار λ می‌باشد ولی مقدار این تغییر چندان قابل توجه نیست. با وجود این اظهار نظر در مورد وضعیت پلاستیک شدگی خاک و تأثیر آن در شرایط حفر تونلها نیاز به بررسیهای مفصلتر و بسیار حساستر دارد زیرا در میان انواع مدل‌های رفتاری خاکها در شرایط پلاستیسیته ممکن است بعضاً تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی داشته باشند. همچنین در شرایط پلاستیک شدگی عمق تونل (جدا از عمق نسبی) تأثیرگذار است.

این شکل نشان می‌دهد بر اساس محاسبه مبتنی بر تغییر شکل اجباری در دهانه تونل (مقادیر در شکل ۱۱-ب) پلاستیک شدگی اطراف تونل با افزایش تغییر شکل افزایش یافته و در دو طرف و به سمت بالا گسترش می‌یابد. در شکل ۱۷، وضعیتهای نشان داده شده تونل از ۲ سانتیمتر تا ۱۰ سانتیمتر و دگرشکلی افقی دیوار از ۱ سانتیمتر تا ۵ سانتیمتر است. محاسبات نشان داد که مقدار λ ، از 0.38 تا 0.43 به تدریج افزایش می‌یابد و این ارقام متناظر با $\lambda = 0.37$ (جدول ۲) مربوط به شرایط معمولی غیرپلاستیک شدگی است.

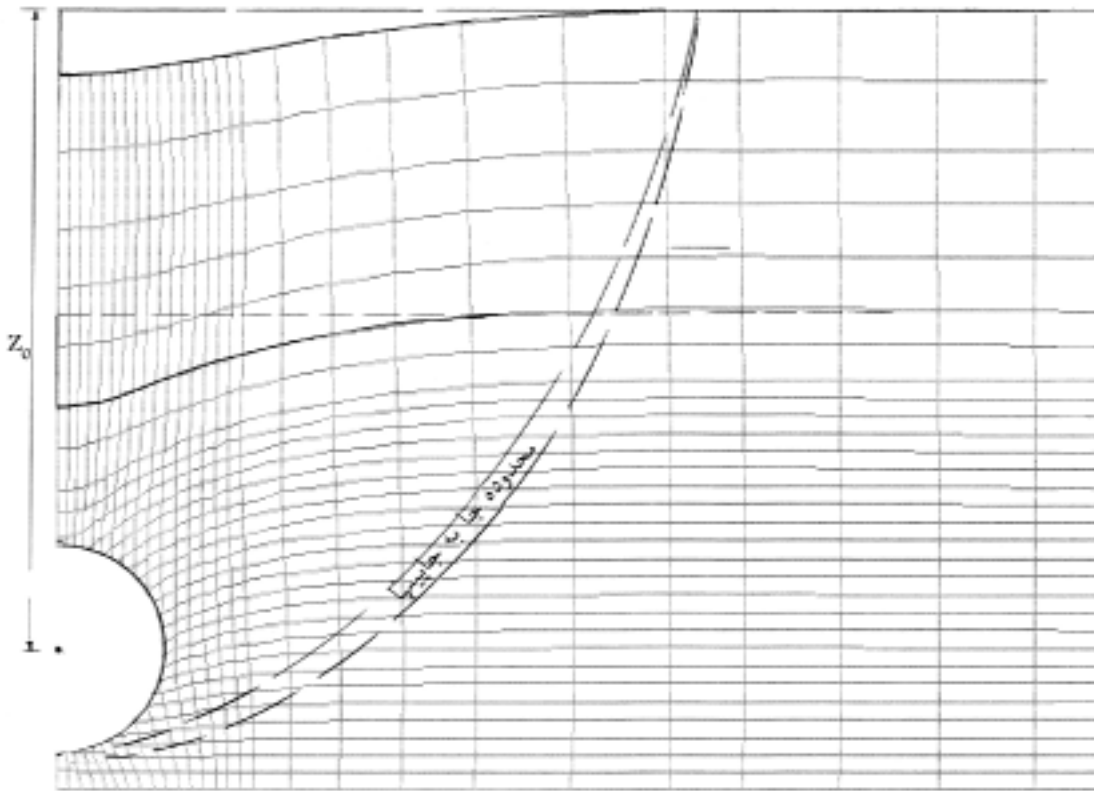
از آنجا که پلاستیک شدن خاک به معنای زایل شدن مقاومت برشی است و این پدیده باید همراه با جابه‌جاییهای برشی موضعی قابل توجه باشد ولی عملاً جابه‌جاییهای درون خاک در اثر حفر تونل در خاکهای معمولی (و نه شرایط خاص ریزشی) به حد جابه‌جاییهای برشی نمی‌رسد، از این رو گرچه



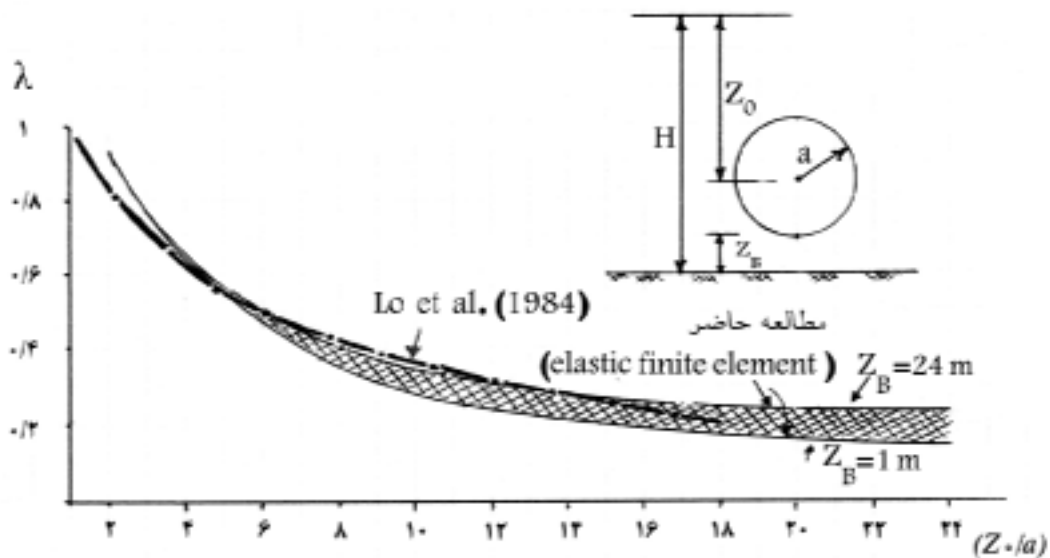
شکل ۱۲- نمونه‌ای از خطوط هم‌تراز جابه‌جاییهای قائم در مقطع قائم اطراف و بالای تونل (محاسبات حاضر)



شکل ۱۳- نمونه‌ای از خطوط هم‌تراز جابه‌جاییهای افقی در مقطع قائم اطراف و بالای تونل (محاسبات حاضر)



شکل ۱۴- وضعیت شبکه اجزای محدود تغییر شکل یافته و مرز دگر شکلیها (نصف مقطع قائم)

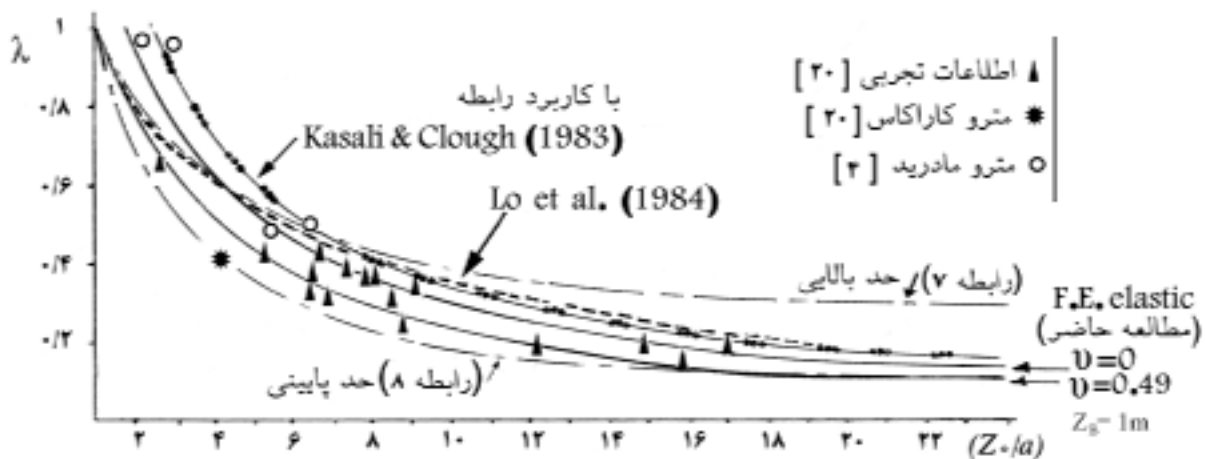


شکل ۱۵- تغییرات (λ) بر حسب z_0/a برای شرایط $z_0/a = 1$ m و 24 m در محاسبات حاضر ($\nu = 0$)

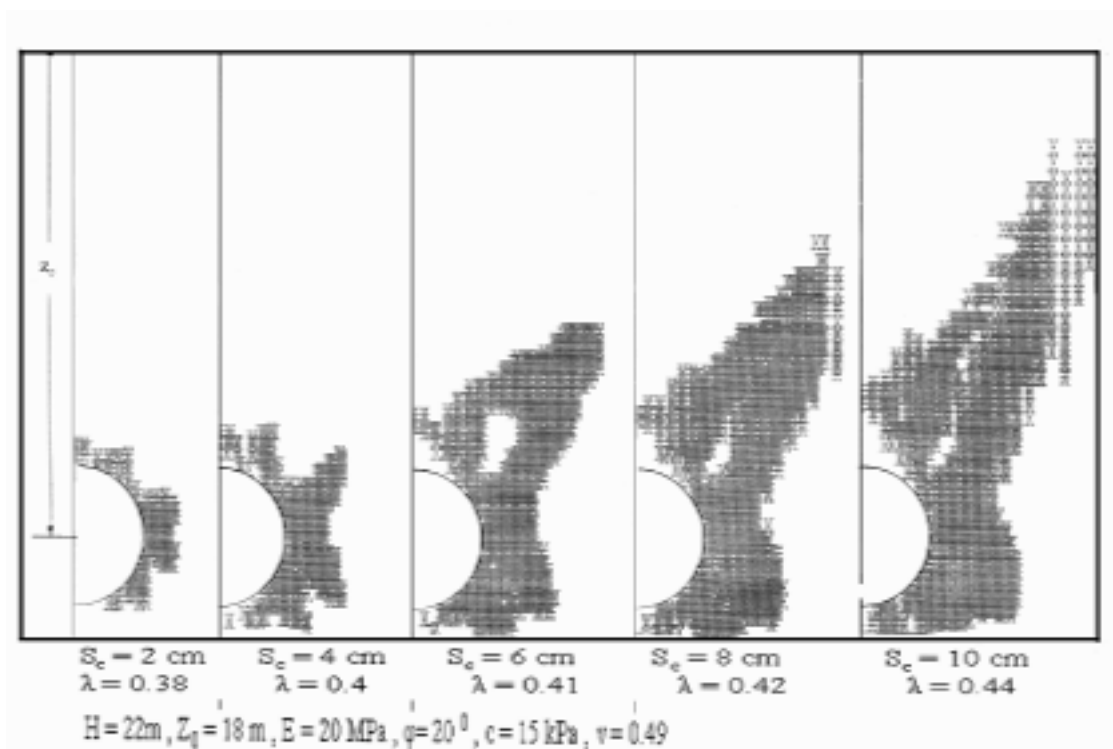
۷- نتیجه گیری

فرض اینکه منطقه تأثیر حفر تونل در زمینهای خاکی را می توان در یک سهمی مشخص در نظر گرفت، مجدداً مورد ارزیابی قرار گرفت و زاویه بازشدگی دهانه این سهمی مبتنی بر

بر اساس آنچه در این مقاله مورد بحث قرار گرفت نتایج زیر را می توان پذیرفت:



شکل ۱۶- مقایسه نمودار تغییرات (λ) از روش اجزای محدود الاستیک با مقادیر حاصل از رابطه‌های ۷ و ۸ و با رابطه‌های سایر پژوهشگران



شکل ۱۷- چگونگی گسترش ناحیه پلاستیک مرتبط با مراحل تغییر شکل دهانه تونل (شرایط ردیف ۴ در جدول ۲)

دیگر از دقت و کارایی کمتری برخوردار نیست. هر چند در تحلیل اولیه که منجر به این معادله شده است دگرشکلیهای افقی مورد بحث قرار نگرفته است ولی در مقاله حاضر جابه‌جاییهای افقی نیز بررسی شد و معادله آن که مبتنی بر همان تحلیل قبلی است ارائه شد.

اندازه‌گیریهای تجربی مشخص شد. مقدار این زاویه در هر طرف برای خاکهای چسبنده در محدوده 40° تا 60° و برای خاکهای غیر چسبنده در محدوده 25° تا 45° برآورد شد. معادله ساده توزیع نشست در خاک بالای تونل، معادله (۵)، معادله مناسبی برای این منظور است و نسبت به معادله‌های

می‌توان پارامترهای مؤثر بر رفتار خاک را در سمت هماهنگ با نتایج تجربی (البته در محدوده پذیرفتنی) انتخاب کرد.

وضعیت پلاستیک شدگی خاک و گسترش آن از دهانه تونل به اطراف آن مبتنی بر فرض پلاستیسته "موهر - کولمب" در یک حالت خاص مورد بررسی قرار گرفت و نتیجه‌گیری شد که گرچه پلاستیک شدگی معمولاً محتمل نیست ولی تأثیر آن در بعضی شرایط مثل تأثیر افزایش قطر تونل و یا افزایش اندکی در مقدار μ است. ضمن اینکه باید توجه داشت که بررسی وضعیت رفتاری خاک مبتنی بر شرایط فراتر از الاستیک، نیاز به تحلیل‌های مفصل‌تر دارد.

قدردانی

این مقاله بخشی از گزارش نتایج طرح تحقیقاتی مصوب دانشگاه صنعتی اصفهان (کد ۷۹۲ ICID) است، از این رو شایسته است از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی اصفهان که انجام این طرح را تصویب کردند سپاسگزاری شود.

معادله‌های نشان دهنده ارتباط نشست‌های نسبی با مشخصات هندسی، معادله‌های (۸ و ۷)، و با مشخصات فیزیکی مکانیکی خاک، مثل معادله (۱۱) کارآیی مناسب دارند.

معادله‌های بسیار مفصل تحلیلی، گرچه ارتباط کمیته‌ها را به طور دقیق و مستدل ارائه می‌دهند ولی به این علت که وضعیت زمین در شرایط اجرایی به آن صورت مفروض در تحلیل، یکنواخت، همگن و همسان نیست لذا دقت‌های موجود در معادله‌های دقیق تحلیلی عملاً نمی‌توانند ظرافت اینگونه معادله‌ها را در شرایط اجرایی نشان دهند، به همین علت معادله‌های ساده‌تر نیز معمولاً در حد معادله‌های دقیق با نتایج تجربی انطباق نسبی نشان می‌دهند.

الگوی مناسبی برای نشان دادن وضعیت جابه‌جایی‌های تمام نقاط خاک ارائه شد.

با کاربرد برنامه اجزای محدود مبتنی بر رفتار الاستیک، کلیه مشخصات مربوط به زمینه دگرشکل‌های خاک اطراف تونل مورد مطالعه و محاسبه قرار گرفت و نتیجه‌گیری شد که فرض الاستیک می‌تواند در اکثر موارد وضعیت جابه‌جایی‌ها را نشان دهد. مخصوصاً به این علت که در یک برنامه اجزای محدود

مراجع

1. Peck, R., "Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground," *Proc. 7th ICSMFE*, pp.225-290, 1969.
2. Atkinson, J. H. and Potts, D. M., "Subsidence above Shallow Tunnels in Soft Ground," *ASCE*, Vol.103, GT4, pp. 307-375, 1977.
3. Attewell, P. B., "Ground Movements Caused by Tunnelling in Soil," *Int. Conf. On Large Ground Movement and Structures*; pp. 812-848, 1977.
4. Attewell, P. B, Yeates, J., and Selby, A. R., "Soil Movements Induced by Tunnelling and their Effects on Pipelines and Structures, 1986., Chapamn and Hal.1 5)
5. Mair, R. J., Taylor, R. N., and Bracegirdle, A. "Subsidence Settlement Profiles above Tunnels in Clay," *Geotechnique*, 43, No.2, pp. 315-320, 1993.
6. O Reilly, M. P., and New, B. M., "Settlement above Tunnel in the United Kingdom, their Magnitude and Prediction," *In: Proc. Tunnelling*: 82, Brighton, 173-181, 1982.
7. Oteo, C., Amaiz, M., Trabada, J., and Melis, M., *The Madrid Model: A Semi- Empirical Method for Subsidence Estimating*. Challenges for the 21st century, Alten et.al. (eds), pp. 163-169, 1999.
8. Rankin, W. J., *Ground Movements Resulting from Urban Tunnelling: Predictions and Effects*, From Bell, F. G., Culshaw, M. G. Cripps, J. c and Lovell, M. A. (eds), *Engineering Geology for Underground Movements*, Geological Society Eng. Geo. Special Publication, No. 5, pp. 79-92, 1998.
9. Wang, Z. W., Sampaco, K, L., Fischer, G. R., Kuker, M. S., Codlewski, P.M., and Robinson, R. A., "Models for Predicting Surface Settlements due to Soil Ground Tunnelling," *Proceedings of North American Tunnelling*, O. O Ozdmir, pp.645-652, 2000.
10. Selby, A. R. "Tunnelling in Soils- Ground Movements and Damage to Building in Workington, U. K.," *Geotechnical and Geological Engineering*, No. 17., pp. 351-371, 1999.
11. Vafaeian, M., "Analysis of Soil Behaviour during Excavation of Shallow Tunnels," *Geotechnical Engineering (South East Asian J.)*, Vol. 22, pp. 257-267, 1991.
12. Verruijt, A., and Booker, J. R. "Surface Settlements due to Deformation of a Tunnel in an

- Elastic Half Plan, "Geotechnique, 46 (4), pp:753-756, 1996.
13. Loganathan, N., andoulos, H.G., "Analytical Prediction for Tunnelling Induced Ground Movements in Clays," *ASCE*, Vol. 124, Geotech., No.9, pp. 846-855, 1998.
 14. Loganathan, N., and Poulos, H. G., "Tunneling Induced Ground Deformations and their Effects on Adjacent Piles," 10th Australian Tunnelling Conference, 1999.
 15. Vafaeian, M., "Relationship between Ground Settlement due to Tunnelling and Ground Physico-Mechanical Properties," *Int. Journal of Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 45-49, 1996.
 16. El-Nahhas, F. M., Ahmed, A. A., and Esmail, K. A., "Prediction of Ground Subsidence above Tunnels in Cairo," 14th ICSMFE, Vol. III, pp. 1453-1456, 1998.
 17. Attewell P.B. , "An Overview of Site Investigation and Long- Term Tunnelling – Induced Settlement in Soil, Engineering Geology of Underground Movements" *GSEG Special Publication*, No. 5, pp. 55-61, 1988.
۱۸. وفائیان، م.، ویژگیهای نشست سطح زمین در اثر حفر تونلهای کم عمق، مجموعه مقالات پنجمین کنفرانس تونل ایران، دانشکده فنی دانشگاه تهران، ص ۳۱۳ تا ۳۲۱، آبان ۸۰
19. Carter J. P. and Balaam, N. P., *AFENA Users' Manual*, Version 5.0, Center for Geotechnical Research, University of Sydney, Australia, 1995.
 20. Lo K. y. ,Ng M. C. and Rowe R.K. , *Predicting Settlement due to Tunneling in Clays "Tunneling in Soil and Rock, " Proce. Of Sessions at Geotechnique ,ASCE*, 1984..