

### بهبود روابط نظری برای رسم منحنی مشخصه زمین در تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن شرایط زهکشی شده

سعید امیری<sup>۱\*</sup>؛ وحید محمدی قلعه عزیز<sup>۲</sup>؛ رضا صباغ کرمانی<sup>۱</sup>؛ احمد فهیمی فر<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران، خاک و پی، دانشگاه تفرش

۲- کارشناسی ارشد؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران، خاک و پی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- استاد؛ دانشکده‌ی مهندسی عمران، خاک و پی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۲/۰۷/۰۹؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۱۰

#### چکیده

در تونل‌های حفر شده در زیر سطح آب زیر زمینی، وضعیت تونل با شرایط مشابه اما در حالت خشک متفاوت بوده و فشار آب حفره‌ای و وضعیت تراوش به داخل تونل مطرح است که سبب تغییر شرایط جابجایی‌ها و تنش‌های وارده خواهد شد، لذا در این مقاله سعی شده تا با در نظرگیری وضعیت قرارگیری تونل در زیر سطح آب زیرزمینی در شرایط زهکشی شده و رخداد وضعیت الاستو پلاستیک و با بهره‌گیری از معیار شکست موهر-کلومب روابطی در حالت کلی و به دور از روش‌های نیمه نرم‌افزاری و یا سعی و خطایی جهت رسم منحنی مشخصه زمین ارایه و به محاسبه‌ی دقیق محدوده پلاستیک در اطراف تونل حفر شده پرداخته شود و با رسم منحنی مشخصه زمین به ازای تغییر در پارامترهای دخیل در روابط تحلیلی ارایه شده، به بررسی و حساسیت‌سنجی تاثیر این تغییرات بر روی منحنی و رفتار آن در شرایط ذکر شده پرداخته شود.

#### واژگان کلیدی

منحنی مشخصه  
تونل‌های زیر سطح آب  
زهکشی شده  
منطقه پلاستیک  
فشار آب حفره‌ای

#### ۱- مقدمه

مطالعات در مورد منحنی مشخصه به وسیله بردی (Brady) و براون (Brown) [1]، استیل (Stille) و همکاران [2]، وانگ (Wang) [3]، کارنسا-تورس (Carranza-Torres) [4] و شارن (Sharan) [5] در وضعیت بدون وجود آب زیرزمینی یعنی در شرایط خشک آغاز شد و در جهت بررسی شرایط تونل و محاسبه‌ی مقادیر تنش‌ها و تاثیرات وجود فشار آب حفره‌ای توسط میور وود (Muir Wood) [6]، کرتیس (Curtis) و همکاران [7]، اتکینسون (Atkinson) و مایر (Mair) [8]، فرناندز (Fernandez) و آلوارز (Alvarez) [9]، بوبت (Bobet) [10]، شین (Shin) و همکاران [11] و فهیمی فر و زارعی فرد [12] ادامه پیدا کرده و توسط لی (Lee) و همکاران [13] و شین (Shin) و همکاران [14]

منحنی مشخصه‌ی زمین در واقع بررسی افزایش میزان جابجایی‌ها به ازای کاهش در میزان فشار حایل مورد استفاده برای پوشش تونل است تا با رسم این منحنی یک طرح بهینه بر اساس اندرکنش ما بین سیستم نگهدارنده و توده در نظر گرفته شود، منحنی مشخصه شامل دو محدوده الاستیک و پلاستیک است که در صورتی که میزان فشار حایل در حد بالایی انتخاب شود، منطقه پلاستیک تشکیل نمی‌گردد و رفتار منحنی به صورت یکنواخت خواهد بود؛ ولی در صورتی که این فشار پایین در نظر گرفته شود، محدوده پلاستیک نیز تشکیل شده که این وضعیت، حالت مناسب برای طراحی سیستم نگهدارنده تونل با در نظرگیری شرایط بهینه از لحاظ اقتصادی است.

\*آذربایجان شرقی، تبریز، خیابان پاستور جدید، مابین طالقانی و حاج جبارنایب، ساختمان پرستو، طبقه اول، شرکت طرح تحلیل آزما؛ کدپستی:

۵۱۳۸۷۶۶۵۴۸؛ شماره‌ی تلفن: ۰۹۱۴۴۰۱۲۷۵۰؛ نامبر: ۰۴۱۳-۵۴۲۸۰۲۳؛ رایانامه: [Saeed\\_amiri64@yahoo.com](mailto:Saeed_amiri64@yahoo.com)

تراوش آب است. در شرایط تقارن محوری برای تونل حفر شده به صورت دایره‌ای رابطه زیر برقرار است:

$$\frac{dQ'}{dr} = 0 \rightarrow \frac{dP_w^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dP_w}{dr} = 0 \quad (2)$$

از معادله دیفرانسیلی به دست آمده در بالا معادله فشار آب به صورت لگاریتمی زیر حاصل می‌شود:

$$P_w = C_1' + C_2' \ln r \quad (3)$$

فشار آب حفره‌ای است که نشان دهنده پارامتر تراوش در شرایط تقارن محوری است. جهت محاسبه‌ی مقادیر ثابت‌ها اعمال شرایط مرزی به فرم زیر لازم است:

$$\begin{cases} r = r_0 \rightarrow P_w = P_w^f \\ r = R \rightarrow P_w = P_w^0 \end{cases} \quad (4)$$

که در این شرایط  $P_w^0$  فشار هیدرواستاتیکی آب در محل حفر تونل (قبل از حفر تونل) و  $P_w^f$  فشار آب در پوشش تونل (در وضعیت به هم خورده توده به سبب حفر تونل) و  $R$  شعاع تاثیر تراوش و  $r_0$  شعاع مربوط به تونل است.

با اعمال شرایط مرزی مقادیر ثوابت به این صورت به دست می‌آیند:

$$C_2' = \frac{P_w^0 - P_w^f}{\ln \frac{R}{r_0}} \quad (5)$$

$$C_1' = P_w^f - \frac{P_w^0 - P_w^f}{\ln \frac{R}{r_0}} \ln r_0 \quad (6)$$

که با جای‌گذاری این ثوابت در معادله فشار آب، معادله حاکم بر فشار آب در وضعیت کلی به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$P_w = P_w^f - \frac{P_w^0 - P_w^f}{\ln \frac{R}{r_0}} \ln r + \frac{P_w^0 - P_w^f}{\ln \frac{R}{r_0}} \ln r_0 \quad (7)$$

با توجه به این نکته که در روابط مورد استفاده در ادامه معادله مربوط به گرادیان فشار آب حفره‌ای مورد نیاز خواهد بود لذا با دیفرانسیل‌گیری از معادله (7):

$$\frac{dP_w}{dr} = \frac{P_w^0 - P_w^f}{\ln \frac{R}{r_0}} \cdot \frac{1}{r} \quad (8)$$

و با توجه به اعمال شرایط زهکشی شده، فشار آب در

به صورت مشخص به بررسی منحنی مشخصه زمین در تونل‌های قرار گرفته در زیر سطح آب زیر زمینی در شرایط الاستوپلاستیک پرداخته شده است که در مورد اول، روابط نیمه تحلیلی بوده و در دیگری روابط تحلیلی اما با ریاضیات پیچیده است. در تحقیقات زارعی فرد و فهیمی فر [15] و همچنین تحقیقات فهیمی فر و همکاران [16] با استفاده از معیار هوک و براون به بررسی مساله پرداخته شده است.

در مورد روش ارایه شده توسط بوبت (Bobet) [17] روش در عین این که از دیگر روش‌های ارایه شده ساده‌تر است و به دور از محاسبات نرم‌افزاری است اما در محاسبه‌ی شعاع منطقه پلاستیک از روش پیچیده و وابسته به روش سعی و خطایی استفاده شده که در این مقاله این مشکل به طور کامل مرتفع شده و این شعاع به صورت کاملاً دقیق و از روشی مستقیم محاسبه شده است.

در روش ارایه شده در این مقاله ضمن در نظر گرفتن کارهای پیشین انجام شده، سعی شده تا روابطی کاملاً تحلیلی، ساده و روان، دور از پیچیدگی‌های موجود در روابط گذشته و نیز پرهیز از بهره‌گیری از نرم‌افزارهای مختلف، در شرایط زهکشی شده و وضعیت ثابت سطح آب زیرزمینی برای تونل‌های دایروی ارایه شود. در این روش با فرض رخداد وضعیت پلاستیک در توده اطراف تونل با ارایه روابطی تحلیلی در شرایط الاستوپلاستیک و با بهره‌گیری از معیار شکست موهر-کولمب به بررسی تحلیلی تونل پرداخته شده و رابطه‌ای ساده برای محاسبه‌ی شعاع منطقه پلاستیک ارایه شده است. در ضمن رفتار منحنی مشخصه‌ی زمین به ازای تغییر در پارامترهای دخیل مورد ارزیابی قرار گرفته و تاثیر اکثر پارامترهای موثر بررسی شده است.

## ۲- آنالیز هیدرولیکی

برای تونل دایروی حفر شده در زمین در شرایط سطح ثابت آب زیرزمینی و محیط همگن برای دست‌یابی به روابط ساده، معادله‌ی زیر برای دبی آب جریان یافته به داخل تونل در نظر گرفته شده است:

$$Q' = \frac{2\pi k'}{\gamma_w} \cdot \frac{dP_w}{dr} \quad (1)$$

که در این رابطه  $k'$  نفوذپذیری در وضعیت کلی توده اطراف تونل و  $\gamma_w$  وزن مخصوص آب و  $P_w$  فشار ناشی از

که در آن  $u_r$  جابجایی شعاعی و  $\varepsilon_r$  کرنش شعاعی و  $\varepsilon_\theta$  کرنش مماسی است.

حال با قرار دادن این معادلات تنش (۱۰) و (۱۱) در معادلات تعادل (۱۲) و (۱۳) و (۱۴) معادله دیفرانسیل زیر جهت نیل به نتیجه نهایی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\frac{dU_r^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_r}{dr} - \frac{U_r}{r^2} = \frac{(1+\nu_r)(1-2\nu_r)}{rE_r(1-\nu_r)} \cdot \frac{P_w^0}{Ln \frac{R}{r_0}} \quad (۱۵)$$

که با حل این معادله‌ی دیفرانسیلی معادله جابجایی شعاعی ناشی از آب به صورت معادله (۱۶) به دست می‌آید:

$$f = \frac{1}{4} \cdot \frac{(1+\nu_r)(1-2\nu_r)}{E_r(1-\nu_r)} \cdot \frac{P_w^0}{Ln \frac{R}{r_0}} \quad (۱۶)$$

که در آن:

$$U_r = C_1 r + \frac{C_2}{r} + f \cdot r [2Ln r - 1] \quad (۱۷)$$

بعد از محاسبه مقدار جابجایی ناشی از آب در اطراف تونل در محدوده الاستیک به محاسبه‌ی مقادیر کرنش‌ها و تنش‌ها پرداخته می‌شود. معادلات تنش و کرنش طبق معادلات هوک بدین صورت تعریف می‌شوند:

$$\varepsilon_\theta = -\frac{U_r}{r} = -C_1 - \frac{C_2}{r^2} - f [2Ln r - 1] \quad (۱۸)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{dU_r}{dr} = -C_1 + \frac{C_2}{r^2} - f [2Ln r - 1] \quad (۱۹)$$

که با جای‌گذاری کرنش‌ها در معادلات تنش‌ها، معادله تنش‌ها ناشی از آب به صورت زیر به دست می‌آیند:

$$\sigma'_{ri} = S [(1-\nu_r)\varepsilon_r + \nu_r\varepsilon_\theta] = S \left[ -C_1 + \frac{C_2}{r^2} (1-2\nu_r) - f [2Ln r + 1 - 2\nu_r] \right] \quad (۲۰)$$

$$\sigma'_{\theta} = S [(1-\nu_r)\varepsilon_\theta + \nu_r\varepsilon_r] = S \left[ -C_1 + \frac{C_2}{r^2} (2\nu_r - 1) - f [2Ln r - 1 + 2\nu_r] \right] \quad (۲۱)$$

$$S = \frac{E_r}{(1+\nu_r)(1-2\nu_r)} \quad (۲۲)$$

که  $\sigma'_{\theta}$  و  $\sigma'_{ri}$  مقادیر تنش‌های شعاعی و مماسی ناشی از آب در محدوده الاستیک و  $C_1^i, C_2^i$  ثابت‌های مربوط به وضعیت الاستیک ناشی از آب است. برای به دست آوردن

محل پوشش (جداره تونل به سبب فرض شرایط کامل زهکشی) را برابر با صفر قرار داده و حاصل می‌شود:

$$\frac{dP_w}{dr} = \frac{P_w^0}{Ln \frac{R}{r_0}} \cdot \frac{1}{r} \quad (۹)$$

### ۳- تحلیل تنش در توده اطراف

تنش در منطقه الاستیک و پلاستیک در ادامه مورد تحلیل قرار گرفته است.

#### ۳-۱- تحلیل تنش در منطقه الاستیک

معادلات تنش در شرایط تقارن محوری برای تونل با شعاع داخلی  $r_0$  و مرز بیرونی  $r \rightarrow \infty$  با استفاده از قانون هوک به این صورت ارائه شده است [18]:

$$\sigma'_\theta = \frac{E_r}{(1+\nu_r)(1-2\nu_r)} [(1-\nu_r)\varepsilon_\theta + \nu_r\varepsilon_r] \quad (۱۰)$$

$$\sigma'_r = \frac{E_r}{(1+\nu_r)(1-2\nu_r)} [(1-\nu_r)\varepsilon_r + \nu_r\varepsilon_\theta] \quad (۱۱)$$

که در آن  $\nu_r, E_r$  مدول الاستیک و ضریب پواسون توده سنگ است.

در تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی در ضمن حفاری یک جریان آب به داخل تونل برقرار می‌شود که وضعیت تنش‌ها و نیروها در توده سنگ اطراف تغییر می‌کند و شرایط جدیدی را به وجود می‌آورد. تحلیل شرایط تراوش به داخل تونل به صورت کاملاً تحلیلی در هر شرایطی به صورت واقعی پیچیده است و بایستی از حل معادلات به دست بیاید، عبارت  $\frac{d}{dr}$  برای دیفرانسیل‌گیری نسبت به مختصات فضایی  $r$  به کار می‌رود، معادله حاکم بر تنش در شرایط تعادل به صورت زیر به دست می‌آید [19]:

$$\frac{d\sigma'_r}{dr} - \frac{\sigma'_\theta - \sigma'_r}{r} + \frac{dP_w}{dr} = 0 \quad (۱۲)$$

که  $\sigma'_r$  تنش موثر شعاعی بوده و  $\sigma'_\theta$  تنش موثر مماسی در شرایط تقارن محوری است. در شرایط تقارن محوری رابطه کرنش‌های مماسی و شعاعی و جابجایی بدین صورت است:

$$\varepsilon_\theta = -\frac{u_r}{r} \quad (۱۳)$$

$$\varepsilon_r = -\frac{du_r}{dr} \quad (۱۴)$$

$$\sigma_{re} = I + III \quad (30)$$

$$\sigma_{\theta e} = II + IV \quad (31)$$

با توجه به محاسبه‌ی تنش در محدوده الاستیک اقدام به محاسبه‌ی تنش در شعاع الاستوپلاستیک بر اساس معیار شکست موهر-کولمب می‌شود، برای محاسبه تنش شعاعی در شعاع الاستوپلاستیک وضعیت به این صورت در نظر گرفته می‌شود، که محدوده اطراف تونل در وضعیت الاستیک قرار داشته و  $r_0 = r_e$  است و به جای محدوده پلاستیک تنشی شعاعی که در واقع همان تنش در مرز الاستوپلاستیک ناشی از محدوده پلاستیک است جای‌گزین شده است.

تنش در مرز الاستوپلاستیک، در مرز

$$r = r_e \text{ الاستوپلاستیک:}$$

$$\sigma'_{re(d)} = \sigma'_0 - (\sigma'_0 - \sigma'_{rec}) \left(\frac{r_0}{r_e}\right)^2 \quad (32)$$

$$\sigma'_{\theta e(d)} = \sigma'_0 + (\sigma'_0 - \sigma'_{rec}) \left(\frac{r_0}{r_e}\right)^2 \quad (33)$$

که در آن برای  $r_0 = r_e$  داریم:

$$\sigma_{re}|_{r=r_e} = I_{r=r_e} + \sigma'_{rec} \quad (34)$$

$$\sigma_{\theta e}|_{r=r_e} = II_{r=r_e} + 2\sigma'_0 - \sigma'_{rec} \quad (35)$$

حال با جای‌گذاری در معیار شکست موهر-کولمب به دست می‌آید:

$$\sigma_{\theta} = k \sigma_r + (k-1)\alpha \quad (36)$$

$$\Rightarrow II_{r=r_e} + 2\sigma'_0 - \sigma'_{rec} = k(I_{r=r_e} + \sigma'_{rec}) + (k-1)\alpha$$

که در آن  $k, a$  پارامترهای مربوط به معیار موهر-کولمب است و در توده به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$k = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (37)$$

$$\alpha = \frac{c}{\tan \phi} \quad (38)$$

و  $\phi, c$  به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک مربوط به توده است.

با جای‌گذاری تنش به دست آمده در مرز در رابطه‌ی:

$$\sigma_{re}|_{r=r_e} = I_{r=r_e} + \sigma'_{rec}$$

الستوپلاستیک ناشی از قسمت الاستیک به فرم زیر به دست می‌آید:

ثوابت، شرایط مرزی به صورت زیر مورد نظر است:

$$\begin{cases} r = R \rightarrow \sigma'_{ri} = 0 \\ r = R \rightarrow \sigma'_{\theta i} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

با اعمال شرایط مرزی ثوابت  $C_1^i, C_2^i$  بدین صورت محاسبه می‌شوند:

$$C_1^i = -2fLn(R) \quad (24)$$

$$C_2^i = fR^2 \quad (25)$$

با جای‌گذاری ثابت‌های به دست آمده معادلات تنش به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$\sigma'_{ri} = S[(1-\nu_r)\epsilon_r + \nu_r\epsilon_{\theta}] = S \left[ 2fLn(R) + \frac{fR^2}{r^2}(1-2\nu_r) \right] \quad (I) \quad (26)$$

$$\left[ -f[2Lnr + 1 - 2\nu_r] \right]$$

$$\sigma'_{\theta i} = S[(1-\nu_r)\epsilon_{\theta} + \nu_r\epsilon_r] = S \left[ 2fLn(R) + \frac{fR^2}{r^2}(2\nu_r - 1) \right] \quad (II) \quad (27)$$

$$\left[ -f[2Lnr - 1 + 2\nu_r] \right]$$

در محاسبات مربوط به محدوده الاستیک مقادیر تنش‌ها در این محدوده از اطراف تونل به دو صورت جداگانه ناشی از آب و ناشی از خاک محاسبه و تنش در این قسمت، مجموع این دو مقدار است. با توجه به محاسبه‌ی تنش‌های ناشی از آب در قسمت پیشین در این قسمت ضمن محاسبه‌ی تنش‌های ناشی از توده به محاسبه‌ی تنش شعاعی در مرز الاستوپلاستیک ناشی از محدوده الاستیک پرداخته می‌شود.

تنش‌های الاستیک تحت شرایط خشک با در نظر گرفتن شرایط مرزی طبق رابطه‌ی شین (*Shin*) و همکاران [14] ارایه می‌شود [18]:

$$\sigma'_{re(d)} = \sigma'_0 - \sigma'_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \quad (III) \quad (28)$$

$$\sigma'_{\theta e(d)} = \sigma'_0 + \sigma'_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \quad (IV) \quad (29)$$

طبق محاسبات در نواحی الاستیک تنش ناشی از آب به صورت روابط (۲۶) و (۲۷) ارایه شد، بنابراین طبق این فرض که تنش در ناحیه الاستیک برابر با مجموع تنش‌های ناشی از تراوش و توده سنگ خشک است، تنش در ناحیه الاستیک به دست می‌آید:

(۴۱) و جای‌گذاری معادله گرادیان فشار آب، معادله (۴۱) به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1}{r}[(1-k_r)\sigma_r + (1-k_r)\alpha_r] + \frac{1}{r} \frac{P_w^0}{Ln \frac{R}{r_0}} = 0 \quad (45)$$

با حل معادله دیفرانسیلی تنش شعاعی منطقه پلاستیک به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\sigma_{rp} = -\alpha_r + \frac{P_w^0}{(k_r - 1)Ln \frac{R}{r_0}} C_1^P r^{(k_r - 1)} \quad (46)$$

جهت محاسبه ثابت مورد نظر شرایط مرزی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$r = r_0 \Rightarrow \sigma_{rp} = P_i \quad (47)$$

که  $\sigma_{rp}, P_i$  به ترتیب فشار وارده از طرف پوشش در نظر گرفته شده برای تونل (این فشار، فشار ناشی از سیستم نگهدارنده در پوشش تونل است) و تنش شعاعی ناشی از محدوده پلاستیک است.

با اعمال شرایط مرزی ثابت  $C_1^P$  بدین صورت به دست می‌آیند:

$$C_1^P = \frac{\left[ P_i + \alpha_r - \frac{P_w^0}{(k_r - 1)Ln \frac{R}{r_0}} \right]}{r_0^{(k_r - 1)}} \quad (48)$$

با جای‌گذاری ثابت به دست آمده، معادله‌ی تنش شعاعی به این صورت بازنویسی می‌شود:

$$\rightarrow \sigma_{rp} = -\alpha_r + \frac{P_w^0}{(k_r - 1)Ln \frac{R}{r_0}} + \left[ \frac{r}{r_0} \right]^{(k_r - 1)} \left[ P_i + \alpha_r - \frac{P_w^0}{(k_r - 1)Ln \frac{R}{r_0}} \right] \quad (49)$$

در هر دو حالت، وضعیت واقعی تونل یعنی الاستوپلاستیک مد نظر بوده و تنها کاری که انجام شده است، یافتن تنش در مرز پلاستیک به الاستیک است که در محاسبات یک بار از سمت الاستیک به محاسبه این مقدار پرداخته شده تا شعاع محدوده پلاستیک وارده محاسبات شود. سپس محاسبات مربوط از سوی محدوده پلاستیک پرداخته شده تا فشار مربوط به سیستم نگهدارنده وارد محاسبات شود، تا با برابر قرار دادن این تنش‌ها در این نقطه که انتهای منطقه پلاستیک و شروع منطقه الاستیک است، ارتباط مابین این شعاع و فشار ناشی از سیستم نگهدارنده به دست آید.

$$\sigma_{re} \Big|_{(r=r_e)} = \frac{S}{(1+k)} [-2C_1^i - 4fLn(r_e)] + \frac{2\sigma'_0}{(1+k)} + \frac{(1-k)}{(1+k)} \alpha \quad (39)$$

### ۳-۲- تحلیل تنش در منطقه پلاستیک

در شرایط تقارن محوری در تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی معادله تعادل توزیع تنش طبق رابطه زیر ارائه می‌شود [14]:

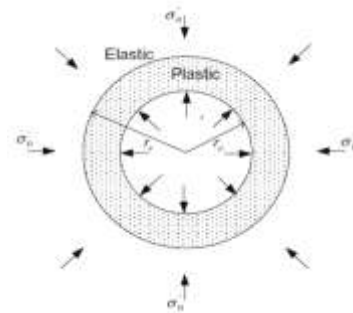
$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} + i_r \gamma_w = 0 \quad (40)$$

که در اینجا پارامتر  $i_r \gamma_w$  نشان دهنده نیروی تراوش است، لذا بدین صورت قابل بازنویسی است [۱۹]:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} + \frac{dP_w}{dr} = 0 \quad (41)$$

برای یک تونل با مقطع دایروی مطابق شکل زیر، رابطه زیر در ناحیه پلاستیک بر اساس معیار موهر کولمب برقرار است:

$$\sigma_\theta = k_r \sigma_r + (k_r - 1) \alpha_r \quad (42)$$



شکل ۱- حفره دایروی نشان دهنده وضعیت الاستوپلاستیک تونل

که در آن  $k_r, a_r$  پارامترهای مربوط به معیار موهر-کولمب در منطقه‌ی پلاستیک اطراف تونل و به فرم زیر قابل تعریف است:

$$k_r = \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi_r}{2} \right) \quad (43)$$

$$\alpha_r = \frac{c_r}{\tan \phi_r} \quad (44)$$

و  $\phi_r, c_r$  به ترتیب چسبندگی و زاویه اصطکاک مربوط به توده در شرایط کاهش یافته به سبب رخداد منطقه پلاستیک هستند. با قرار دادن معادله (۴۲) در معادله

پلاستیک است که به صورت روابط زیر ارایه می‌شود:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r^p + \varepsilon_r^e \quad (55)$$

$$\varepsilon_\theta = \varepsilon_\theta^p + \varepsilon_\theta^e \quad (56)$$

که روابط کلی کرنش‌های شعاعی و مماسی طبق روابط (۱۳) و (۱۴) ارایه می‌شوند. در وضعیت کرنش‌های پلاستیک از قاعده جاری شدن پلاستیک بهره گرفته می‌شود که اگر تاثیر افزایش حجم برای این کرنش‌ها در نظر گرفته شود وضعیت *non-associated flow rule* برقرار است و تابع وضعیت پلاستیک بر اساس این معیار می‌تواند به فرم زیر ارایه شود:

$$Q = f(\sigma_r, \sigma_\theta) = \sigma_\theta - k_\psi \sigma_r - 2c\sqrt{k_\psi} = 0 \quad (57)$$

که در آن  $k_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}$  و  $\psi$  زاویه اتساع است.

رابطه‌ی مابین کرنش شعاعی و کرنش مماسی به صورت زیر قابل بیان است [3]:

$$\varepsilon_r^p = -k_\psi \varepsilon_\theta^p \quad (58)$$

از جای‌گذاری روابط (۱۳) و (۱۴) و (۵۸) و (۵۹) معادله‌ی دیفرانسیلی زیر قابل استخراج است:

$$\frac{du_r}{dr} + k_\psi \frac{u_r}{r} = g(r) \quad (59)$$

که در آن:

$$- (\varepsilon_r^e + k_\psi \varepsilon_\theta^e) = g(r) \quad (60)$$

با در نظر گرفتن شرایط مرزی برای جابجایی شعاعی در منطقه الاستو پلاستیک به صورت [1]:

$$u_{r(r=r_e)} = \frac{-r_e}{2G} (\sigma_{v0} - \sigma_{r(r=r_e)}) \quad (61)$$

که  $G$  مدول برشی برای توده سنگ است.

با بهره‌گیری از معادلات (۵۹) و (۶۱) معادله جابجایی شعاعی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$u_r = r^{-k_\psi} \int_{r_e}^r r^{k_\psi} g(r) dr + u_{r(r=r_e)} \left( \frac{r_e}{r} \right)^{k_\psi} \quad (62)$$

#### ۴- محاسبه شعاع منطقه پلاستیک

با محاسبه‌ی تنش‌های شعاعی در مرز الاستو پلاستیک ناشی از مناطق الاستیک و پلاستیک اطراف تونل و فرض برابری این تنش‌ها در این منطقه با برابری دو رابطه و حل به روش بسته به دست می‌آید:

$$\sigma_{re} [r = r_e] = \sigma_{rp} [r = r_e] \quad (50)$$

با توجه به توضیحات پیشین در محاسبات این قسمت تنها تنش‌های محاسبه شده در مرز که با هم از لحاظ مقداری برابر هستند، مساوی قرار داده شده‌اند تا رابطه‌ی دلخواه به دور از محاسبات سعی و خطایی مرسوم به صورت مستقیم محاسبه شود.

برای محاسبه‌ی شعاع منطقه پلاستیک رابطه (۵۰) را به صورت رابطه تک مجهولی نسبت به  $r_e$  بازنویسی می‌شود [11]:

$$A_1 \times r_e^{(k_r-1)} + A_2 \times \ln(r_e) - A_3 = 0 \quad (51)$$

با اعمال تغییر متغیر به صورت  $F' = r_0^{(k_r-1)}$  ثابت-های موجود در معادله‌ی (۵۱) به صورت زیر ارایه می‌شوند:

$$A_1 = \left[ P_i + \alpha_r - \frac{P_w^0}{(k_r-1) \ln \frac{R}{r_0}} \right] \quad (52)$$

$$A_2 = \frac{4fS}{(1+k)} F' \quad (53)$$

$$A_3 = \frac{-2c'_i S}{(1+k)} F' + \frac{2\sigma'_0}{(1+k)} F' + \frac{(1-k)}{(1+k)} \alpha F' + \alpha_r F' + \left[ \frac{-P_w^0}{(k_r-1) \ln \frac{R}{r_0}} \right] \quad (54)$$

با حل این معادله ریشه به دست آمده شعاع منطقه پلاستیک تشکیل شده در اطراف تونل است.

#### ۵- تحلیل نظری جابجایی جداره‌ی تونل

هدف از ارایه روابط این قسمت مشخص کردن سری روابطی است که جهت جابجایی جدار تونل استفاده گردیده است و تنها جنبه یادآوری دارد.

جابجایی شعاعی برای تونل دایره‌ای را می‌توان به کمک معیار الاستو پلاستیک محاسبه نمود. با این فرض که کرنش در محدوده پلاستیک مجموع کرنش‌های الاستیک و

بررسی وضعیت رفتاری و رسم منحنی همگرایی زمین در شرایط زیر سطح آب زیرزمینی، جهت بررسی میزان دقت و نیز مشاهده‌ی وضعیت رفتاری این منحنی به ازای مقادیر مختلف فشار پوشش تونل اقدام به حل مثال ارایه شده توسط شین (Shin) و همکاران [14] نموده و نتایج را با نتایج ارایه شده با نرم افزار (Pentagon 2D) و نتایج حل شده به روش شین (Shin) و همکاران [14] مورد مقایسه قرار گرفته است.

پارامترهای دخیل مورد استفاده در مثال در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- پارامترهای مورد استفاده در مثال [14]

نوع	مقدار
$\gamma(kN/m^2)$	4.9
$C(kN/m^2)$	9.81
$\phi(deg)$	35.0
$\psi(deg)$	0.0
$E(kN/m^2)$	49000
$\nu$	0.30

یک عامل موثر، شعاع ناحیه تراوش است که در بسط روابط از این پارامتر مهم استفاده شده است. مقدار این شعاع تاثیر ناحیه تراوش مورد استفاده در روابط از مفروضات موجود در جدول ۲ که توسط (Shin) و همکاران [14] پیشنهاد شده استفاده شده است که  $C$  عمق قرارگیری تونل در زمین،  $D$  قطر تونل حفر شده و  $H$  ارتفاع سطح آب زیرزمینی است.

جدول ۲- مقادیر شعاع تاثیر تراوش پیشنهادی [14]

The region for calculating seepage force (m)	C/D=2.5 C/D=5.0 C/D=7.5 C/D=10			
	C/D=2.5	C/D=5.0	C/D=7.5	C/D=10
H/D=2.5	12.5	12.5	12.5	12.5
H/D=5.0	12.5	25.0	25.0	25.0
H/D=7.5	12.5	25.0	37.5	37.5
H/D=10	12.5	25.0	37.5	50.0

مقایسه منحنی‌های همگرایی زمین در وضعیت‌های مختلف در اشکال ۲ و ۳ و ۴ نشان داده شده است.

برای حل انتگرال موجود مقادیر مربوط به  $\varepsilon_r^e, \varepsilon_\theta^e$  از روابط زیر که توسط برادی (Brady) و برون (Brown) [1] ارایه شده است، بهره گرفته می‌شود:

$$\varepsilon_\theta^e = \frac{1}{2G} \left[ (1-2\nu_r)C - \frac{D}{r^2} \right] \quad (63)$$

$$\varepsilon_r^e = \frac{1}{2G} \left[ (1-2\nu_r)C + \frac{D}{r^2} \right] \quad (64)$$

که  $C = \frac{(\sigma_{r(r=r_e)} - \sigma'_0)r_e^2 - (P_i - \sigma'_0)r_0^2}{r_e^2 - r_0^2}$  و  $D = \frac{(P_i - \sigma_{r(r=r_e)})r_0^2 r_e^2}{r_e^2 - r_0^2}$  است. با جای‌گذاری معادلات

(63) و (64) در معادله‌ی (62) و قرار دادن مقدار مربوط به  $g(r)$  در معادله‌ی (62) و حل انتگرال، این معادله برای وضعیت جابجایی شعاعی برای ناحیه‌ی پلاستیک اطراف تونل قابل استخراج است [5]:

$$u_r = \frac{1}{2G} r^{-k_\psi} \left[ \begin{aligned} & C(1-2\nu_r) \left( r_e^{k_\psi+1} - r^{k_\psi-1} \right) \\ & - D \left( r_e^{k_\psi-1} - r^{k_\psi-1} \right) \end{aligned} \right] \quad (65)$$

$$+ u_{r(r=r_e)} \left( \frac{r_e}{r} \right)^{k_\psi}$$

و به همین طریق معادله‌ی جابجایی شعاعی برای جدار تونل قابل استخراج است:

$$u_{r(r=r_0)} = \frac{1}{2G} r_0^{-k_\psi} \left[ \begin{aligned} & C(1-2\nu_r) \left( r_e^{k_\psi+1} - r_0^{k_\psi-1} \right) \\ & - D \left( r_e^{k_\psi-1} - r_0^{k_\psi-1} \right) \end{aligned} \right] \quad (66)$$

$$+ u_{r(r=r_e)} \left( \frac{r_e}{r_0} \right)^{k_\psi}$$

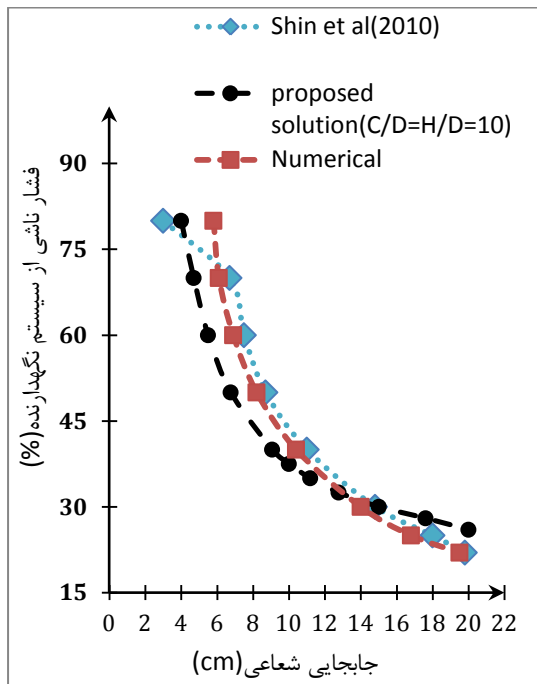
## ۶- رسم منحنی مشخصه زمین با بهره‌گیری از

### روش پیشنهادی

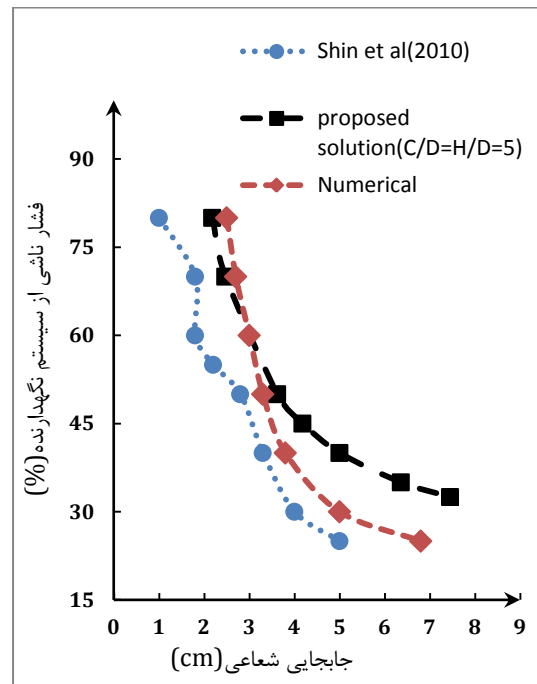
با توجه به راه حل تحلیلی در نظر گرفته شده برای جابجایی‌ها و مشخص بودن وضعیت رفتاری منحنی مشخصه‌ی زمین در شرایط الاستیک که به صورت یکنواخت است تمامی منحنی‌های رسم شده در این مقاله بر اساس رخداد وضعیت پلاستیک بوده و نشانگر محدوده پلاستیک از منحنی مشخصه است.

### ۶-۱- مقایسه با دیگر روش‌ها

در این بخش با توجه به عدم کارایی مناسب نرم‌افزارهای موجود در جهت انطباق با شرایط مختلف زهکشی، جهت



شکل ۴- مقایسه منحنی همگرایی زمین در وضعیت  $C/D=H/D=10$



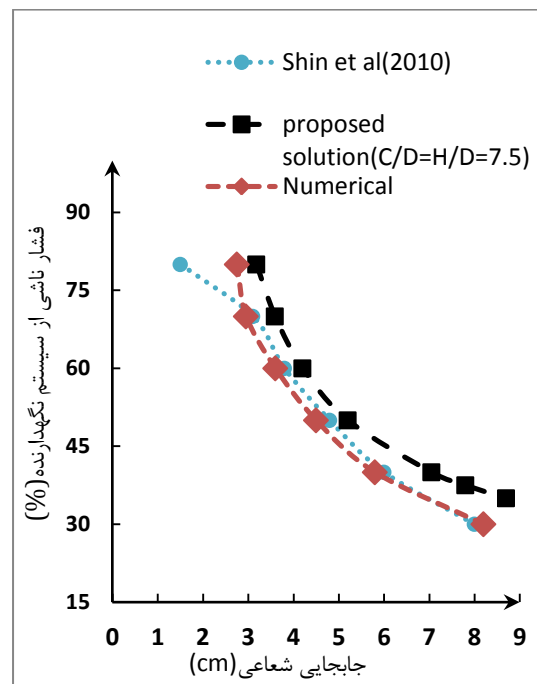
شکل ۲- مقایسه منحنی همگرایی زمین در وضعیت  $C/D=H/D=5$

همان طور که قابل مشاهده است، وضعیت رفتاری کاملاً مشابه است و روش انطباق خوبی با سایر روش‌ها دارد و همچنین در تمامی موارد، در جهت اطمینان است. مزیت این روش راحتی محاسبات و قابل کاربرد بودن آن است.

#### ۶-۲- آنالیز حساسیت

در این بخش بر پایه‌ی مثال پیشین در وضعیت قرارگیری  $C/D=H/D=10$  به بررسی و حساسیت‌سنجی تأثیر پارامترهایی چون شعاع حفر تونل، مدول الاستیسیته توده، ضریب پواسون توده، شعاع تأثیر تراوش، چسبندگی توده، زاویه اصطکاک توده، تأثیر چسبندگی و زاویه اصطکاک کاهش یافته توده در منطقه پلاستیک شده است.

منحنی همگرایی زمین به ازای شعاع‌های مختلف حفاری در شکل ۵ و منحنی همگرایی زمین به ازای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته توده در شکل ۶ نمایش داده شده است.



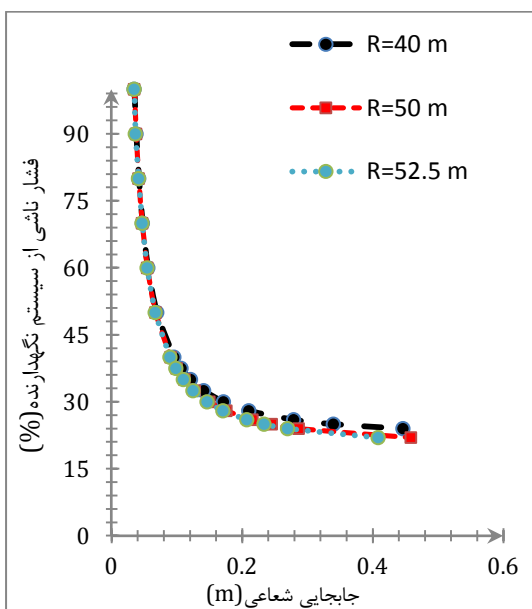
شکل ۳- مقایسه منحنی همگرایی زمین در وضعیت  $C/D=H/D=7.5$



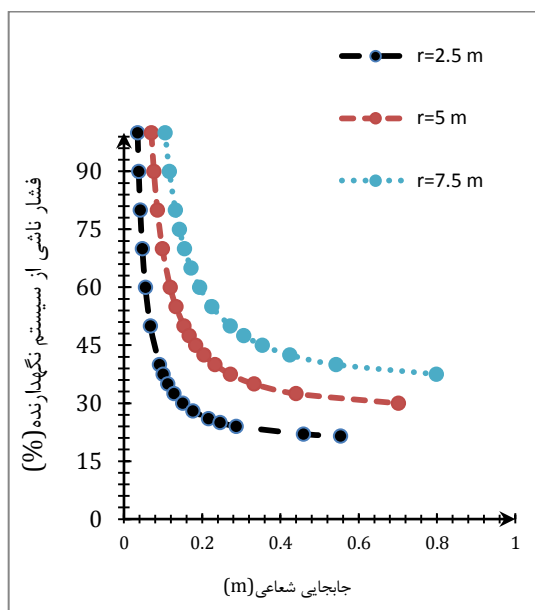
مقدار مربوط به مدول الاستیسیته منحنی وضعیت مطلوب‌تری به خود می‌گیرد که نشان دهنده تاثیر مثبت افزایش مدول الاستیسیته است.

پارامتر ضریب پواسون پارامتری است که بر اساس وضعیت جابجایی‌ها و کرنش‌ها بسط و توسعه داده شده است، که پارامتری دخیل در جابجایی‌ها به نظر می‌رسد، لذا در یک محدوده‌ی منطقی به بررسی این پارامتر و تاثیر تغییرات آن بر روی منحنی همگرایی زمین پرداخته می‌شود، همچنین یکی از پارامترهای جدید مورد استفاده در این روش پارامتر شعاع ناحیه تاثیر تراوش  $R$  است که پارامتری برای بررسی وضعیت زهکشی توده‌ی اطراف تونل است و تغییر مقدار این پارامتر در وضعیت زهکشی توده‌ی اطراف تونل تاثیرگذار است.

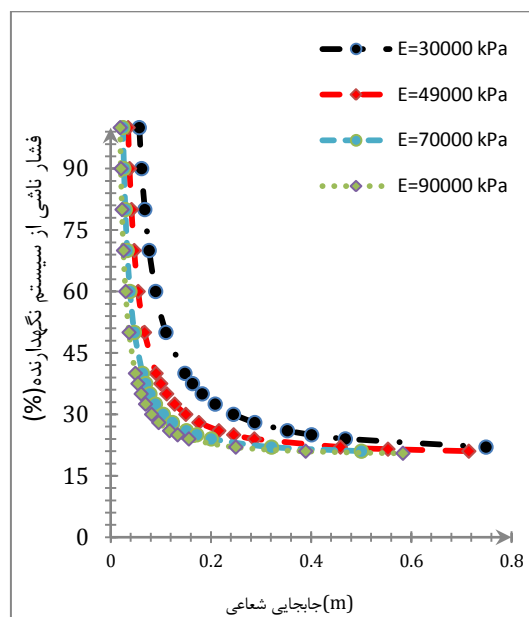
منحنی همگرایی زمین به ازای مقادیر مختلف شعاع ناحیه تاثیر تراوش در شکل ۷ و منحنی همگرایی زمین به ازای مقادیر مختلف ضریب پواسون توده در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۷-منحنی همگرایی زمین به ازای مقادیر مختلف شعاع ناحیه تاثیر تراوش (m)



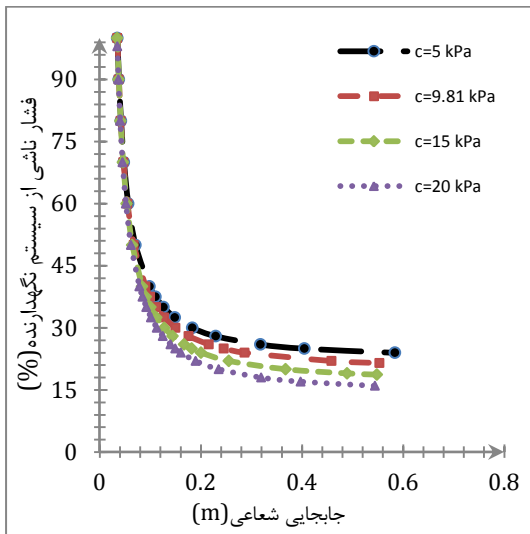
شکل ۵- منحنی همگرایی زمین به ازای شعاع‌های مختلف حفاری (m)



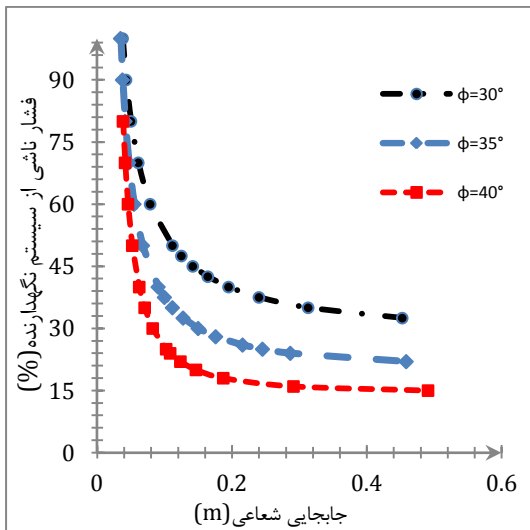
شکل ۶-منحنی همگرایی زمین به ازای مقادیر مختلف مدول الاستیسیته توده (kPa)

همان‌طور که از گراف‌ها نیز مشخص است به ازای افزایش شعاع حفاری تونل وضعیت منحنی حالت بحرانی‌تری به خود می‌گیرد. حال آن که با افزایش

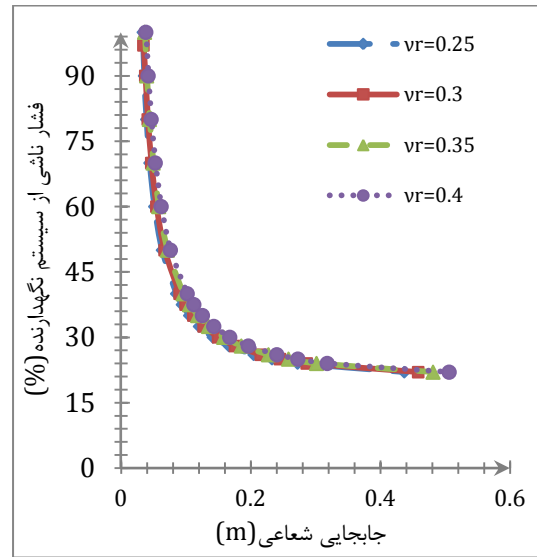
کاهش یافته در منطقه پلاستیک  $\phi = \phi_r$  و  $c = c_r$  و در ادامه با تغییر مقادیر در ناحیه پلاستیک به بررسی تاثیر این پارامترها بر منحنی مشخصه پرداخته می‌شود. منحنی همگرایی زمین به ازای مقادیر مختلف چسبندگی توده در شکل ۹ و به ازای مقادیر مختلف زاویه اصطکاک توده در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹- منحنی همگرایی زمین به ازای مقادیر مختلف چسبندگی توده



شکل ۱۰- منحنی همگرایی زمین به ازای مقادیر مختلف زاویه اصطکاک توده



شکل ۸- منحنی همگرایی زمین به ازای مقادیر مختلف ضریب پواسون توده

همان‌طور که در گراف نیز مشاهده می‌شود به ازای افزایش  $U_r$  از ۰٫۲۵ تا ۰٫۴ منحنی وضعیت بحرانی‌تری به خود می‌گیرد. مقادیر مربوط به این ضریب حالت فرضی داشته و تنها جهت نمایان‌سازی تاثیر این پارامتر است که این وضعیت با منطق افزایش کرنش‌های جانبی کاملاً هم‌خوانی داشته و منطقی است، اما به دلیل محدوده پایین این تغییرات، وضعیت و تعیین بسیار دقیق این ضریب برای این وضعیت چندان نمایان نیست. با این وجود توصیه می‌شود که در تعیین این پارامتر نیز دقت لازم صورت گیرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییرات در مقدار  $R$  نیز وضعیت منحنی دچار تغییر می‌شود، تعیین مقدار دقیق و مناسب این پارامتر و بررسی تاثیرات آن از کارهای نو در این زمینه است.

همان‌گونه که در روابط ارائه شده در این مقاله نیز مشاهده شد، مقادیر مربوط به چسبندگی و زاویه اصطکاک در مناطق الاستیک و پلاستیک از اطراف تونل متفاوت در نظر گرفته شده است و این با شرایط رخداد منطقه پلاستیک و خرد شدگی توده هم‌خوانی دارد. لذا در ابتدا با فرض برابری مقادیر در توده و

قابل مشاهده است که با تاثیر توام این دو پارامتر وضعیت منحنی بحرانی‌تر است که این به دلیل سست‌تر شدن ناحیه پلاستیک از اطراف تونل است. بررسی‌های انجام شده در مورد پارامترهای دخیل در ناحیه پلاستیک، لزوم تعیین دقیق این پارامترها را نمایان می‌کند و لزوم انجام تحقیق و بررسی‌های بیشتر را بر روی رفتار این منطقه را نشان می‌دهد.

#### ۷- نتیجه‌گیری

در مورد تونل‌ها در محیط خشک و بدون وجود آب زیرزمینی معادلات تحلیلی و نیز نرم‌افزارهای دقیق و بسیاری موجود است که قادر به تحلیل و بررسی و آنالیز تونل، تنش‌ها و جابجایی‌های جدار و محیط اطراف تونل هستند. اما در مورد تونل‌های زیر سطح آب زیرزمینی این کمبود احساس شده، بخصوص در مورد بررسی جابجایی‌های جدار و محیط اطراف آن با در نظر گرفتن رخداد وضعیت رفتاری واقعی در توده اطراف تونل، به صورت در نظر گرفتن وضعیت پلاستیک و الاستیک به صورت توام در محیط اطراف تونل، لذا به ارایه یکسری روابط کاملا تحلیلی و روان در این شرایط به دور از هرگونه پیچیده کاری و بهره‌گیری از روش سعی و خطایی مرسوم در این گونه محاسبات اقدام شده است.

با بررسی وضعیت تراوش به تونل به بررسی پارامترهای دخیل بر منحنی مشخصه پرداخته و حساسیت سنجی در شرایط مختلف انجام شده است و گراف‌های به دست آمده مشابه با کارهای پیشین انجام شده به کمک نرم‌افزارهای مختلف است که لزوم در نظرگیری با دقت بیشتر پارامترهای دخیل را نمایان می‌سازد.

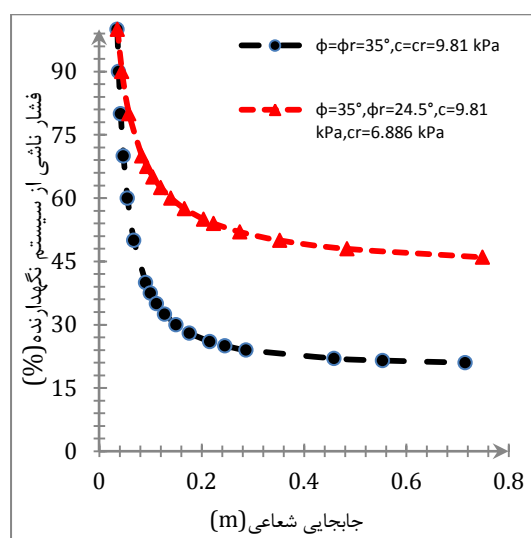
تاثیر مشهود پارامترهای چسبندگی و اصطکاک داخلی بر روی وضعیت منحنی در اشکال ۹ و ۱۰ کاملا مشاهده می‌شود.

همان‌گونه که در روابط ارایه شده مشاهده می‌شود، پارامترهای چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک توده اطراف تونل به سبب رخداد وضعیت پلاستیک در اطراف تونل دچار تغییراتی می‌شوند که در این بخش با فرض این که مقدار چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک توده در منطقه پلاستیک به میزان ۷۰٪ وضعیت کلی توده دچار کاهش شده، به رسم منحنی همگرایی زمین به ازای این تغییرات و بررسی تاثیرات آن پرداخته می‌شود (شکل ۱۱).

$$c_r = 70\% c \Rightarrow c_r = 6.867 \text{ kPa} \quad (67)$$

$$\phi_r = 70\% \phi \Rightarrow \phi_r = 24.5^\circ$$

وضعیت دیگر پارامترهای مورد استفاده در وضعیت  $C/D = H/D = 10$  ثابت در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۱۱- منحنی همگرایی زمین به ازای مقادیر متفاوت زاویه اصطکاک و چسبندگی کاهش یافته منطقه پلاستیک نسبت به توده

#### ۸- منابع

- [1] Brady, B.H.G., Brown, E.T., (1993). Rock Mechanics for Underground Mining. Chapman and Hall, London.
- [2] Stille, H., Holmberg, M., Nord, G., (1989). Support of weak rock with grouted bolts and shotcrete. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 26 (1), 99-113.

- [3] Wang, Yarloung., (1994). Ground response of circular tunnels in poorly consolidated rock.
- [4] Carranza-Torres, C., (2002). Dimensionless graphical representation of the exact elasto-plastic solution of a circular tunnel in a Mohr-Coulomb material subject to uniform far-field stresses. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 36 (3), 237-253.
- [5] Sharan, S.K., (2003). Elastic-brittle-plastic analysis of circular openings in Hoek-Brown media. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40, 817-824.
- [6] Muir Wood, A.M., (1975). The circular tunnel in elastic ground. *Geotechnique* 25(1), 115-127.
- [7] Curtis, D.J., Mott, Hay, Anderson., (1976). The circular tunnel in elastic ground.
- [8] [8] Atkinson, J.H., Mair, R.J., (1983). Loads on leaking and watertight tunnel lining, sewers and buried pipes due to groundwater. *Geotechnique* 33 (3), 341-344.
- [9] Fernandez, G., Alvarez, T.A., (1994). Seepage-induced effective stresses and water pressures around pressure tunnels. *Journal of Geotechnical Engineering* 120 (1), 108-128.
- [10] Bobet, A., (2003). Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading. *Tunnelling and Underground Space Technology* 18, 377-393.
- [11] Shin, J.H., Potts, D.M., Zdravkovic, L., (2005). The effect of pore-water pressure on NATM tunnel linings in decomposed granite soil. *Canadian Geotechnical Journal* 42, 1585-1599.
- [12] Fahimifar, A., Zareifard, M.R., (2009). A theoretical solution for analysis of tunnels below groundwater considering the hydraulic-mechanical coupling. *Tunnel. Underg. Space Technol.*, doi:10.1016/j.tust.2009.06.002.
- [13] Lee, S.W., Jung, J.W., Nam, S.W., Lee, I.M., (2007). The influence of seepage forces on ground reaction curve of circular opening. *Tunnelling and Underground Space Technology* 21, 28-38.
- [14] Shin, Y.J., Kim, B.M., Shin, J.H., Lee, I.M., (2010). The ground reaction curve of underwater tunnels considering seepage forces. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 25, 315-324.
- [15] Mohammad Reza Zareifard. Ahmad Fahimifar. "Effect of seepage forces on circular openings excavated in Hoek-Brown rock mass based on a generalized effective stress principle". *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2014, Vol. 18, No. 5, 584-600.
- [16] A. Fahimifar, H. Ghadami, and M. Ahmadvand, The Influence of Seepage and Gravitational Loads on Elastoplastic Solution of Circular Tunnels. *Scientia Iranica, Transactions A: Civil Engineering* 21 (2014) 1821-1832.
- [17] Bobet, A., (2010). Characteristic curves for deep circular tunnels in poroplastic rock. *Rock mechanics and rock Engineering*,. 43, 185-200.
- [18] Timoshenko, S.P., Goodier, J.N., (1969). *Theory of Elasticity*. McGraw-Hill, New York.
- [۱۹] امیری، س. (۱۳۹۰). بررسی منطقه پلاستیک اطراف تونل‌های زیر سطح آب جهت رسم منحنی مشخصه‌ی زمین در شرایط زهکشی شده. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تفرش.