

### تحلیل پارامتری تونل‌های هیدرولیکی با مقطع نعل اسبی نسبت به عوامل موثر در طراحی لاینینگ بتنی با استفاده از توابع پتانسیل مختلط

علی‌رضا کارگر<sup>۱\*</sup>؛ رضا رحمان نژاد<sup>۲</sup>؛ محمدعلی حاج عباسی<sup>۳</sup>

۱- استادیار؛ دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- استادیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- استادیار؛ گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

دریافت دست‌نوشته: ۱۳۹۵/۰۷/۲۴؛ پذیرش دست‌نوشته: ۱۳۹۶/۰۷/۱۹

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2017.4921.1286

واژگان کلیدی	چکیده
تونل‌های نعل اسبی توابع پتانسیل مختلط نگاشت هم‌مدیس آنالیز حساسیت تنش	<p>در این مقاله تونل‌های نعل اسبی همراه با لاینینگ بتنی نسبت به نسبت سختی، ضخامت نسبی و نسبت تنش برجا، در شرایط وجود فشار زمین و فشار آب داخلی در تونل آنالیز حساسیت شده‌اند. محیط توده‌سنگ و بتن الاستیک فرض شده و از توابع پتانسیل مختلط همراه با نگاشت هم‌مدیس برای بررسی فوق کمک گرفته شده است. بررسی‌ها نشان دادند که افزایش نسبت سختی موجب افزایش تنش مماسی در نقاط بحرانی سازه در بتن شده اما موجب کاهش آن در سقف در محیط سنگی می‌شود. مشاهده گردید که در نسبت‌های سختی بالا در ضخامت‌های نسبی کمتر از ۰/۰۴ تنش مماسی بشدت افزایش می‌یابد که در طراحی می‌بایست از این امر اجتناب نمود. افزایش نسبت تنش برجا نیز موجب افزایش تنش مماسی در سقف و کاهش آن در دیواره شد. بررسی‌ها نشان دادند که تغییرات تنش مماسی در نسبت‌های سختی کمتر از یک برای یک نسبت تنش برجا به مراتب کمتر از تغییرات آن برای مقادیر نسبت‌های سختی بیش از یک است.</p>

(Savin, 1961), (Bobet, A., 2010), (Bobet, 2003), (Peck, R. B., Hendron, A., Mohraz, B., 1972), (Fahimifar, A.; Zareifard, M.), (Fernández, 1994), (R., 2009), (Wenqi, 1997), (Qingqi, Li; Qicheng, ) و (He, 1998). روابط تجربی فراوانی برای بار وارده بر تونل از طرف توده‌سنگ ارائه شده است. از طرفی مدل‌های عددی به عنوان ابزاری توانا در تحلیل تنش اطراف سازه‌های زیرزمینی، از جمله تونل‌ها، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. اما تمامی این روش‌ها برای راستی‌آزمایی نیاز به راه‌حل‌های دقیق که روش‌های تحلیلی ارائه می‌کنند دارند.

یکی از روش‌های تحلیلی که توانایی زیادی در تعیین توزیع تنش اطراف تونل‌ها را دارد روش متغیرهای مختلط در الاستیسیته می‌باشد. این روش که توسط موسخلیشویلی بسط

#### ۱- مقدمه

تونل‌ها یکی از رایج‌ترین سازه‌های زیرزمینی می‌باشند که برای حمل و نقل، انتقال آب، تاسیسات و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند. از میان تونل‌ها با شکل مقاطع مختلف، شکل مقطع نعل اسبی یکی از پرکاربردترین آنهاست. تونل‌های نعل اسبی به علت توزیع مناسب تنش در توده سنگ اطراف خود دارای قابلیت استفاده در دامنه وسیعی از سنگ‌ها را، از ضعیف تا سخت، می‌باشد. از طرفی دیگر، فشار آب داخلی در تونل‌های هیدرولیکی نیز سهم زیادی را در توزیع تنش و پایداری تونل دارد. بنابراین لاینینگ طراحی شده می‌بایست هم در برابر فشار زمین و هم در مقابل فشار آب داخلی مقاوم باشد.

موضوع توزیع تنش در اطراف تونل‌ها یکی از مباحث مهمی است که محققین زیادی سعی در یافتن آن نموده‌اند

\* تهران؛ خیابان کارگر شمالی؛ پردیس ۲ دانشکده‌های فنی؛ دانشکده مهندسی معدن؛ طبقه دوم؛ کدپستی: ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱؛ شماره‌ی تلفن: ۶۱۱۱۴۲۶۶-

۰۲۱، رایانامه: ar.kargar@ut.ac.ir

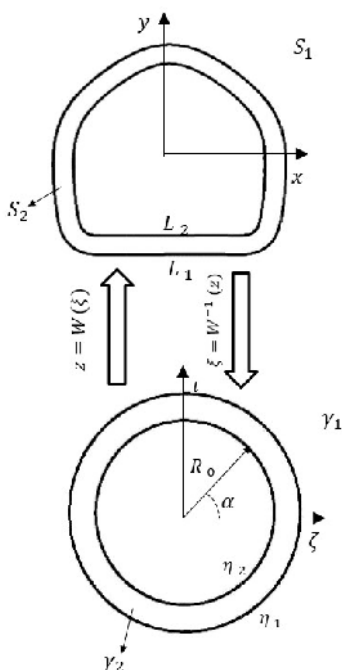
برای تونل‌های بتنی غیردایروی با استفاده از توابع پتانسیل مختلط محاسبه کردند (Lu, A. Z., Zhang, N., Kuang, L., 2014)

در این تحقیق، سعی شده است تا با استفاده از توابع پتانسیل مختلط تونل‌های با مقطع نعل اسبی نسبت به پارامترهای طراحی تحلیل شوند و توصیه‌هایی ارائه گردد.

## ۲- تعیین میدان تنش با استفاده از توابع پتانسیل مختلط

برای تعیین میدان تنش، مطابق شکل ۱، در ابتدا با استفاده از نگاشت  $Z = W(\xi)$  تونل با مقطع نعل اسبی و نگهداری بتنی را به روی دو دایره هم‌مرکز با شعاع خارجی یک و داخلی  $R_0$  تصویر می‌کنیم. بر اساس نظریه موسخلیشویلی و کولوسوف توابع پتانسیل مختلط  $\psi_1, \varphi_1$  و  $\psi_2, \varphi_2$  به ترتیب در میدان  $\gamma_1$  و  $\gamma_2$  موجودند که به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شوند:

$$w(\xi) = \operatorname{Re} \frac{i\pi}{2} \left( \xi + \sum_{j=1}^n \omega_j \xi^{-j} \right) \quad (1)$$



شکل ۱- تصویر تونل همراه با لاینینگ به دو دایره متحد المركز

و توسعه داده شد قادر به تعیین دقیق مولفه‌های تنش اطراف تونل‌هاست (Muskhelishvili, 1953).

از اولین افرادی که از این روش برای تحلیل تنش در اطراف تونل‌ها استفاده کرد فوتیوا بود. ایشان با استفاده از روش متغیرهای مختلط راه‌حل جدیدی را برای محاسبه تنش در اطراف تونل‌های کم عمق با نگهداری بتنی ارائه دادند (Fotieva, Nina N; Bulychev, NS; Sammal, AS, ) (1996 Fotieva, NN; Bulychev, NS; Antziferova, ) (LN, 1998 Fotieva, Nina; Bulychev, Nikolay; ) (LN, 1998 Sammal, Andrey; Deev, Petr, 2005). او میدان تنش در اطراف تونل‌های چندگانه را نیز با استفاده از این روش بررسی کرد (Fotieva, NN; Voronina, I Yu, 2004).

اکساداکتیلیس راه‌حلی را برای محاسبه تنش و جابجایی در اطراف تونل‌های غیردایروی بدون نگهداری بر اساس توابع پتانسیل مختلط موسخلیشویلی با فرض محیط با رفتاری الاستیک و شرایط کرنش صفحه‌ای ارائه داد (Exadaktylos, ) (G., Stavropoulou, M., 2002). او روشی نیمه تحلیلی برای محاسبه تنش و جابجایی در اطراف تونل‌های دایروی دارای گوشه که دچار شکست شده‌اند را نیز ارائه کرد (Exadaktylos, G. E., Liolios, P. A., Stavropoulou, ) (M. C., 2003).

بویت با استفاده از روش سختی نسبی (Relative stiffness method) و توابع پتانسیل مختلط راه‌حلی را برای محاسبه عکس‌العمل نگهداری توده‌سنگ برای تونل‌های مستطیلی‌شکل عمیق در شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده ارائه داد. او در مدل خود فرض کرد که تنش برجای اولیه تنها تنش برشی می‌باشد (Bobet, A., 2010).

باتیستا میدان تنش‌ها و جابجایی‌ها را در اطراف حفاریات غیردایروی با استفاده از توابع مختلط موسخلیشویلی و نگاشت شوارتز-کریستوفل تعیین نمود (Batista, 2011).

کارگر و همکاران راه‌حلی تحلیلی را برای تعیین میدان تنش در اطراف تونل‌های غیردایروی همراه با پوشش لاینینگ ارائه دادند (Kargar, A. R., Rahmamejad, R., ) (Hajabasi, M. A., 2014). آنها سپس راه‌حل خود را به تونل‌ها زیر سطح آب زیر زمینی توسعه دادند (Kargar, A. ) (R., Rahmamejad, R., Hajabasi, M. A., 2015).

آی‌ژانگ لو و همکاران تاثیر تاخیر در نصب نگهداری را

که در اینجا  $u_x^L$  و  $u_y^L$  مولفه‌های جابجایی بتن و  $u_x^R$  و  $u_y^R$  مولفه‌های جابجایی سنگ در مرز توده‌سنگ- بتن می‌باشد.  $p_w$  و  $q_w$  نیز مولفه‌های بردار تنش ناشی از فشار آب داخل تونل می‌باشد. با تعریف این متغیرها بر حسب توابع موسخلیشویلی روابط (۵) به دست می‌آید.

$$\frac{k_1}{G_1} \varphi_1(t) - \frac{1}{G_1} \left( \frac{w(t)}{w'(t)} \overline{\varphi_1'(t)} + \overline{\psi_1(t)} \right) = \frac{k_2}{G_2} \varphi_2(t) - \frac{1}{G_2} \left( \frac{w(t)}{w'(t)} \overline{\varphi_2'(t)} + \overline{\psi_2(t)} \right)$$

$$\varphi_1(t) + \frac{w(t)}{w'(t)} \overline{\varphi_1'(t)} + \overline{\psi_1(t)} = \varphi_2(t) + \frac{w(t)}{w'(t)} \overline{\varphi_2'(t)} + \overline{\psi_2(t)}$$

$$\varphi_2(t) + \frac{w(t)}{w'(t)} \overline{\varphi_2'(t)} + \overline{\psi_2(t)} = i \int_{L_2} (p_w + i q_w) ds$$

که در اینجا:

$$i \int_{L_2} (p_w + i q_w) ds = -\gamma_w H_2 w(t)$$

$$-\frac{1}{4} \gamma_w i (w(t))^2 + \frac{1}{2} \gamma_w i \int_{t_0}^t \overline{w(t)} w'(t) dt$$

$H_2$  ارتفاع هیدرولیکی آب در داخل تونل است. با ضرب طرفین رابطه (۵) در هسته انتگرال کوشی  $(\frac{dt}{t-\xi})$  و انتگرال گیری بر روی مرز دایره  $\eta_1$  به شعاع واحد برای اندازه  $|\xi| > 1$  و  $|\xi| < 1$  به شش معادله و شش تابع مجهول میرسیم که ضرایب  $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i$  و  $f_i$  با مساوی قرار دادن ضرایب توان‌های مساوی  $\xi^j$  در دو طرف تساوی تعیین می‌شوند (Kargar, 2015).

بنابراین مولفه‌های تنش به صورت زیر بر حسب توابع پتانسیل، بر اساس روابط موسخلیشویلی، به دست می‌آیند.

$$\varphi_1(\xi) = -\frac{1}{2\pi(1+k_1)} (F_x + iF_y) \ln \xi + w \xi + \varphi_0(\xi)$$

$$\psi_1(\xi) = \frac{k_1}{2\pi(1+k_1)} (F_x - iF_y) \ln \xi + w' \xi + \psi_0(\xi)$$

$$\varphi_2(\xi) = \frac{1}{2\pi(1+k_2)} (F_x + iF_y) \ln \xi + R_1(\xi) + R_2(\xi)$$

$$\psi_2(\xi) = \frac{k_2}{2\pi(1+k_2)} (F_x - iF_y) \ln \xi + Q_1(\xi) + Q_2(\xi)$$

که در اینجا:

$$\varphi_0(\xi) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j \xi^{-j}, \quad \psi_0(\xi) = \sum_{j=0}^{\infty} b_j \xi^{-j}$$

$$Q_1(\xi) = \sum_{j=1}^{\infty} e_j \xi^{-j}, \quad R_1(\xi) = \sum_{j=1}^{\infty} c_j \xi^{-j}$$

$$Q_2(\xi) = \sum_{j=0}^{\infty} f_j \xi^j, \quad R_2(\xi) = \sum_{j=0}^{\infty} d_j \xi^j$$

$$\Gamma = \frac{1}{4} (\sigma_1 + \sigma_2) = -\frac{1+K}{4} \gamma H$$

$$\Gamma' = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) = -\frac{1-K}{2} \gamma H$$

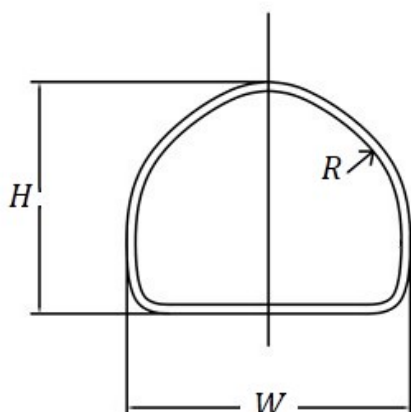
$F_x$  و  $F_y$  نیز مولفه‌های نیروی برآیند وارد بر مرز  $L_2$  می‌باشند.

$\sigma_1$  و  $\sigma_2$  به ترتیب تنش‌های اصلی قائم و افقی، و  $K$  ضریب فشار جانبی می‌باشد. با اعمال شرایط مرزی تنش نرمال برابر فشار آب داخلی در مرز  $L_2$ ، و پیوستگی بردار تنش و تغییر شکل در مرز  $L_1$  به معادلات زیر می‌رسیم:

$$u_x^R + i u_y^R = u_x^L + i u_y^L$$

$$i \int_{L_1} (p_R + i q_R) ds = i \int_{L_1} (p_L + i q_L) ds$$

$$i \int_{L_2} (p_L + i q_L) ds = i \int_{L_2} (p_w + i q_w) ds$$



شکل ۲- شکل مقطع تونل نعل اسبی

در اینجا تغییرات فاکتور تمرکز تنش مماسی در مرز داخلی دیواره بتن و دیواره سنگی نسبت به ضخامت نسبی، سختی نسبی و نسبت تنش، در سقف و دیواره (محل برخورد قوس سقف و دیواره)، مورد بررسی قرار گرفت. در آنالیز حساسیت نسبت به ضخامت و سختی نسبی فرض شد که  $\frac{W}{H} = 1$ ، و نسبت تنش در محیط  $\frac{v}{1-v}$  می‌باشد. لازم بذکر است که تحلیل‌ها با فرض  $\nu_1 = \nu_2 = 0.25$  انجام گرفت.

### ۳-۱- آنالیز حساسیت نسبت به ضخامت و سختی نسبی

اشکال ۳ و ۴ میزان فاکتور تمرکز تنش مماسی را در سقف و دیواره در مرز داخلی دیواره بتنی، تحت فشار زمین، نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با افزایش سختی نسبی میزان فاکتور تمرکز تنش مماسی در سقف و دیواره افزایش می‌یابد. از طرفی در سختی‌های نسبی کمتر از یک تغییرات فاکتور تمرکز تنش مماسی در دیواره بتنی، در سقف و دیواره، ناچیز است و افزایش ضخامت تأثیری در کاهش تنش ایجاد شده در بتن ندارد.

$$\sigma_\rho + \sigma_\theta = 2 \left( \frac{\phi_j'(\xi)}{w'(\xi)} + \frac{\overline{\phi_j'(\xi)}}{w'(\xi)} \right)$$

$$\sigma_\theta - \sigma_\rho + 2i\tau_{\rho\theta} = \frac{2e^{2i\theta}}{w'(\xi)}$$

$$\left\{ \frac{\phi_j''(\xi)w'(\xi) - \phi_j'(\xi)w''(\xi)}{(w'(\xi))^2} + \psi_j'(\xi) \right\} \quad (7)$$

$j=1,2$

مقادیر مولفه‌های تنش در توده سنگ و لاینینگ بر حسب توابع پتانسیل در بخش پیوست ارائه شده است.

### ۳- بحث

در این مرحله یک تونل با مقطع نعل اسبی نسبت به پارامترهای طراحی لاینینگ بتنی همچون ضخامت نسبی، سختی نسبی و نسبت تنش، آنالیز حساسیت شدند. بدین منظور از داده‌های جدول ۱ برای تابع نگاهت شکل مقطع تونل (شکل ۲) استفاده شد. در ابتدا مفاهیم زیر تعریف شدند:

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \text{نسبت تنش}$$

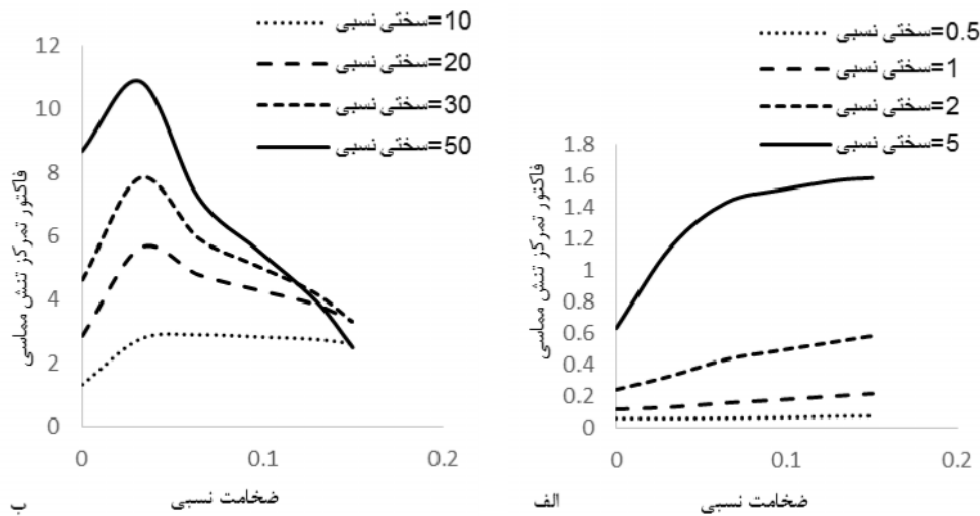
$$\frac{t}{R} = \text{ضخامت نسبی}$$

$$\frac{G_2}{G_1} = \text{سختی نسبی}$$

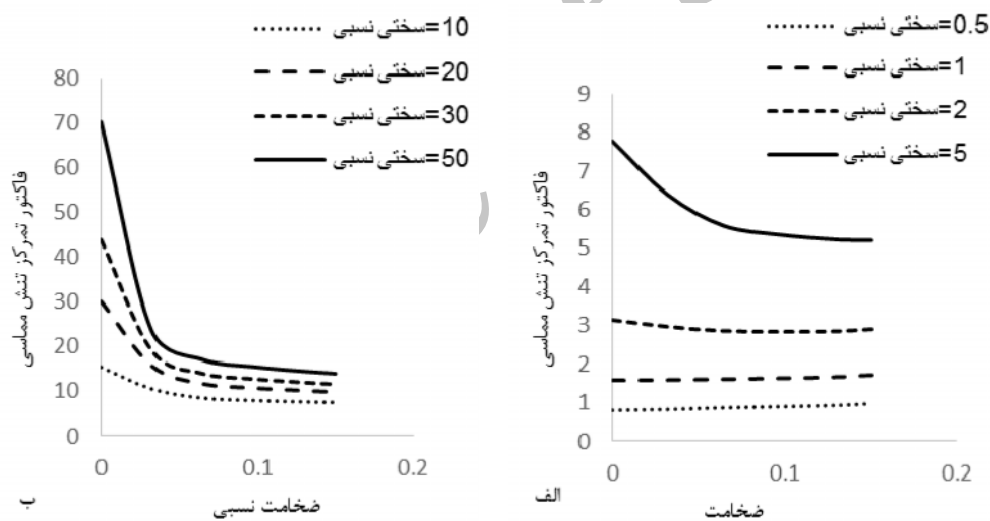
$$\frac{\sigma_\theta}{P} = \text{فاکتور تمرکز تنش مماسی}$$

جدول ۱- ثوابت تابع نگاهت همدیس

$\omega_4$	$\omega_3$	$\omega_2$	$\omega_1$	$R$
-0.0331	-0.0505	-0.1054	-0.1020	2.95



شکل ۳- تغییرات فاکتور تمرکز تنش مماسی در سقف در مرز داخلی بتن برای تونل با مقطع نعل‌اسبی تحت فشار زمین



شکل ۴- تغییرات فاکتور تمرکز تنش مماسی در دیواره در مرز داخلی بتن برای تونل با مقطع نعل‌اسبی تحت فشار زمین

می‌شود که بهتر است در طراحی از ضخامت‌های نسبی بیشتر از این مقدار استفاده کرد.

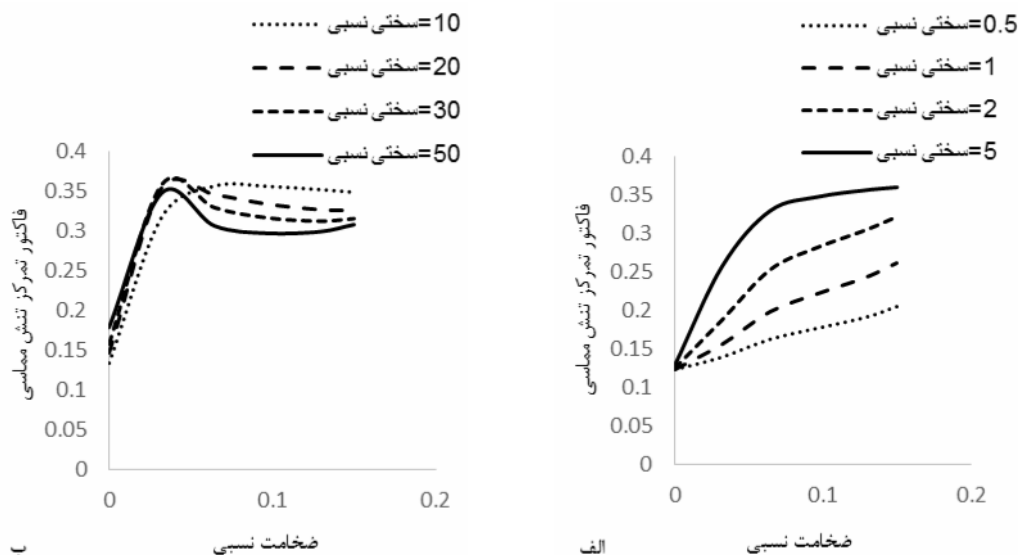
اشکال ۵ و ۶ میزان فاکتور تمرکز تنش مماسی را در سقف و دیواره در دیواره سنگی، تحت فشار زمین، نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که افزایش سختی نسبی بطور کلی باعث افزایش فاکتور تمرکز تنش در سقف و کاهش آن در

در شکل ۳-ب مشاهده می‌شود که با افزایش سختی نسبی به مقادیر بیش از ۱۰، مقدار فاکتور تمرکز تنش در نقطه‌ای با ضخامت نسبی تقریباً ۰/۰۴ ماکزیمم می‌شود که می‌بایست از طراحی با این ضخامت اجتناب نمود. در شکل ۴-ب نیز دیده می‌شود که با افزایش سختی نسبی تغییرات فاکتور تمرکز تنش در ضخامت‌های نسبی کمتر از ۰/۰۴ شدید

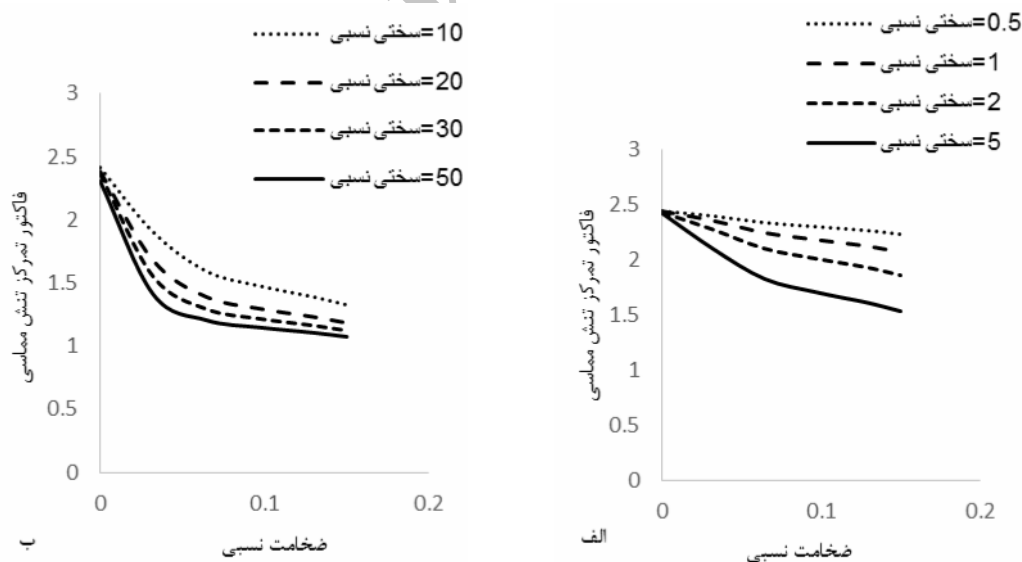
تحلیل پارامتری تونل‌های هیدرولیکی با مقطع نعل اسبی نسبت به عوامل موثر در طراحی لاینینگ بتنی با ... : ص ۴۳-۵۶

شکل‌های ۷ تا ۱۰ آنالیز حساسیت نسبت به ضخامت و سختی نسبی را در حالت وجود فشار آب داخلی در تونل نشان می‌دهند.

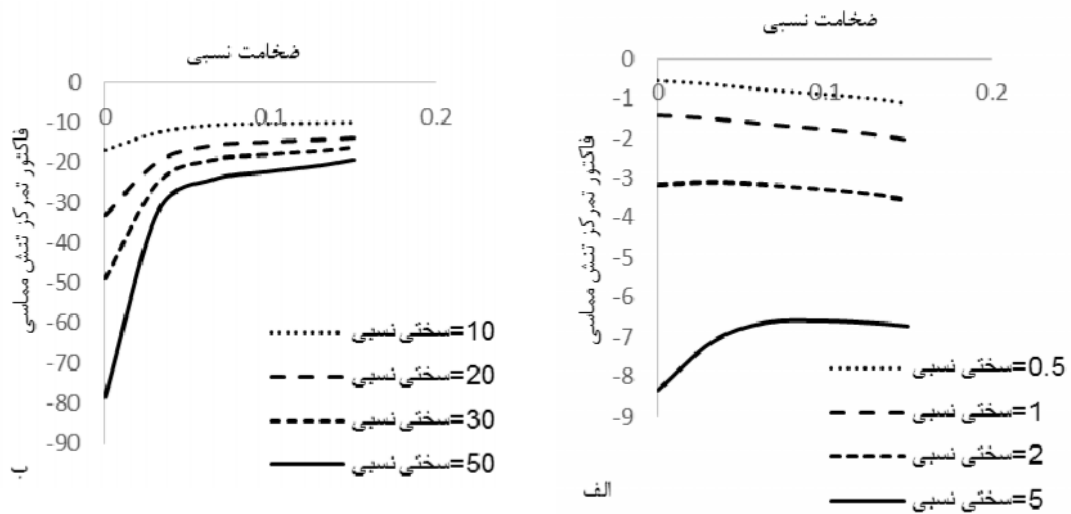
دیواره می‌گردد. همانند حالت قبل تغییرات فاکتور تمرکز تنش در مقادیر ضخامت‌های نسبی کمتر از ۰٫۰۴، در سختی‌های بالا، زیاد است.



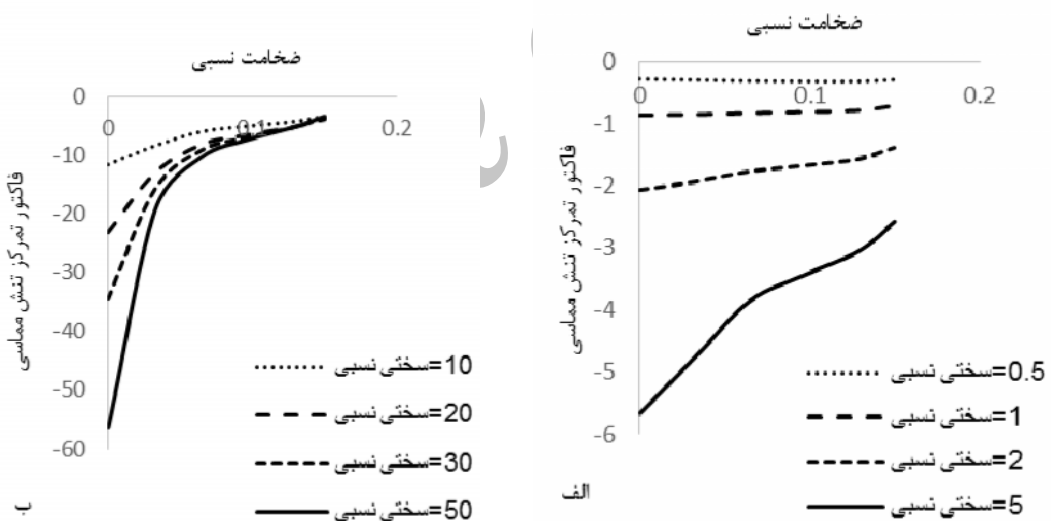
شکل ۵- تغییرات فاکتور تمرکز تنش مماسی در سقف در فصل مشترک بتن سنگ در داخل سنگ برای تونل با مقطع نعل-اسبی تحت فشار زمین



شکل ۶- تغییرات فاکتور تمرکز تنش مماسی در دیواره در فصل مشترک بتن سنگ در داخل سنگ برای تونل با مقطع نعل-اسبی تحت فشار زمین



شکل ۷- تغییرات فاکتور تمرکز تنش مماسی در سقف در مرز داخلی بتن برای تونل با مقطع نعل‌اسبی تحت فشار آب داخلی

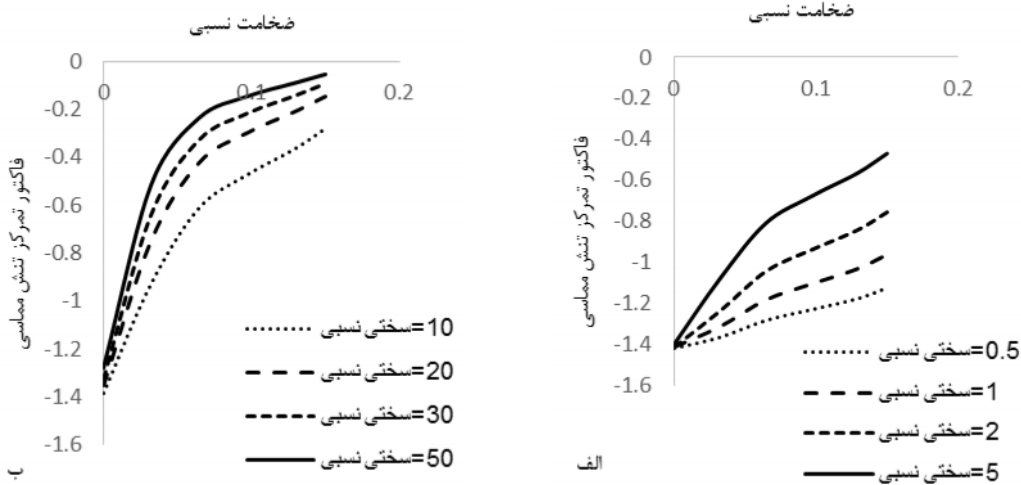


شکل ۸- تغییرات فاکتور تمرکز تنش مماسی در دیواره در مرز داخلی بتن برای تونل با مقطع نعل‌اسبی تحت فشار آب داخلی

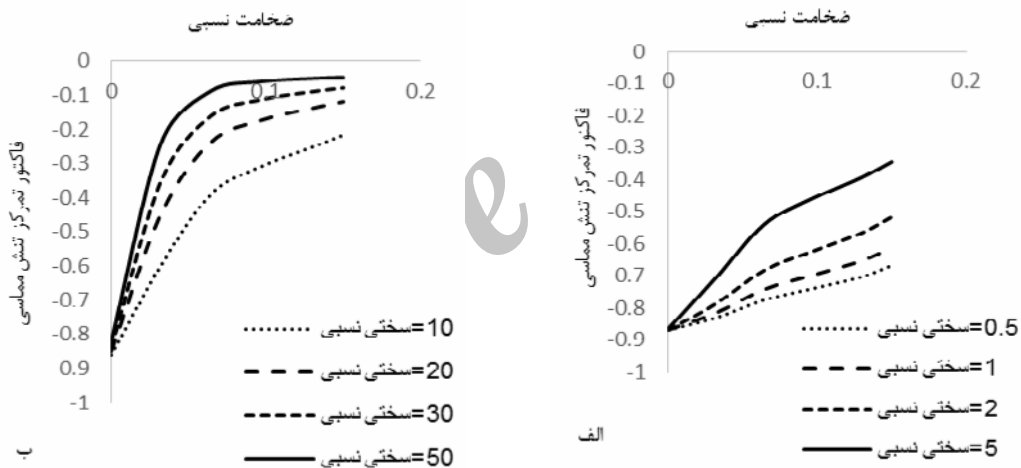
۷-ب و ۸-ب دیده می‌شود که با افزایش نسبت سختی به مقادیر بیش از ۱۰ فاکتور تمرکز تنش مماسی در لاینینگ در مقادیر ضخامت نسبی تقریباً کوچکتر از ۰/۰۴ بشدت افزایش می‌یابد که در طراحی باید از این مقادیر پرهیز کرد.

مشاهده می‌شود که در حالت وجود فشار آب داخلی تنش کششی در لاینینگ ایجاد شده که با افزایش نسبت سختی افزایش می‌یابد. اما در توده‌سنگ مجاور تونل افزایش سختی نسبی موجب کاهش تنش مماسی می‌شود. در شکل

تحلیل پارامتری تونل‌های هیدرولیکی با مقطع نعل اسبی نسبت به عوامل موثر در طراحی لاینینگ بتنی با ... : ص ۴۳-۵۶



شکل ۹- تغییرات فاکتور تمرکز تنش مماسی در سقف در فصل مشترک بتن سنگ در داخل سنگ برای تونل با مقطع نعل- اسبی تحت فشار آب داخلی



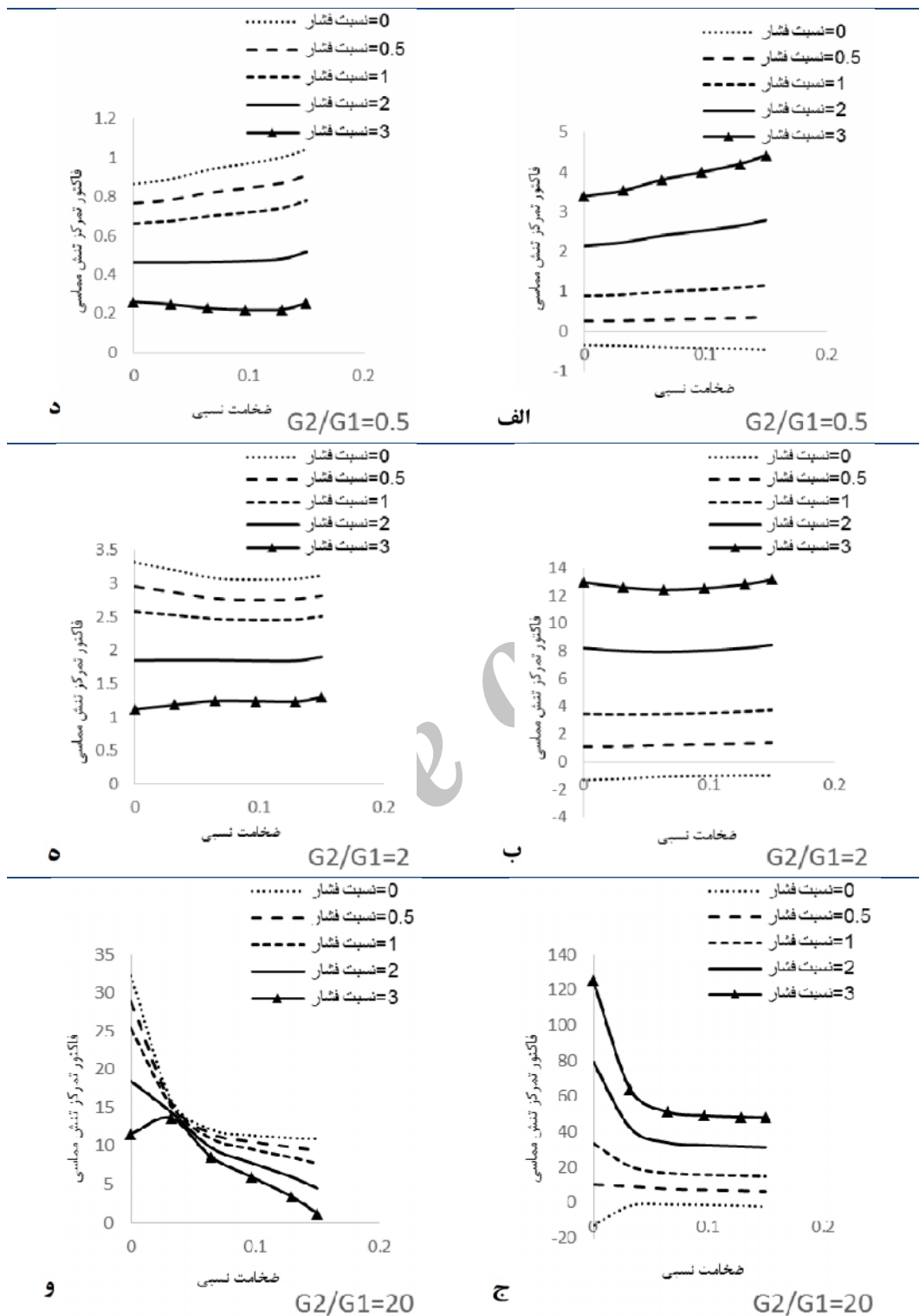
شکل ۱۰- تغییرات فاکتور تمرکز تنش مماسی در دیواره در فصل مشترک بتن سنگ در داخل سنگ برای تونل با مقطع نعل اسبی تحت فشار آب داخلی

مشاهده می‌شود که در سختی‌های نسبی بالا نمودارها در ضخامت نسبی ۰/۰۴ همگرا می‌شوند، بنابراین می‌بایست از مقادیر ضخامت نسبی کمتر از ۰/۰۴ بعلت افزایش زیاد تنش در بتن، در سقف و دیواره، اجتناب نمود. از طرفی در سختی‌های نسبی کمتر از دو تغییرات فاکتور تمرکز تنش بر حسب تغییرات ضخامت نسبی ناچیز می‌باشد، بنابراین افزایش ضخامت تاثیر چندانی در کاهش تنش در بتن و افزایش ظرفیت باربری ندارد.

### ۲-۳- آنالیز حساسیت نسبت به ضخامت و نسبت تنش در سختی‌های نسبی مختلف

در این مرحله تغییرات فاکتور تمرکز تنش مماسی را بر حسب ضخامت نسبی و نسبت‌های مختلف تنش در سختی‌های نسبی متفاوت بررسی می‌کنیم. همانگونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود با افزایش نسبت تنش (نسبت فشار)، تنش‌ها در بتن در سقف افزایش و در دیواره کاهش می‌یابد. افزایش سختی نسبی نیز موجب افزایش تنش‌ها در سقف و دیواره می‌گردد.

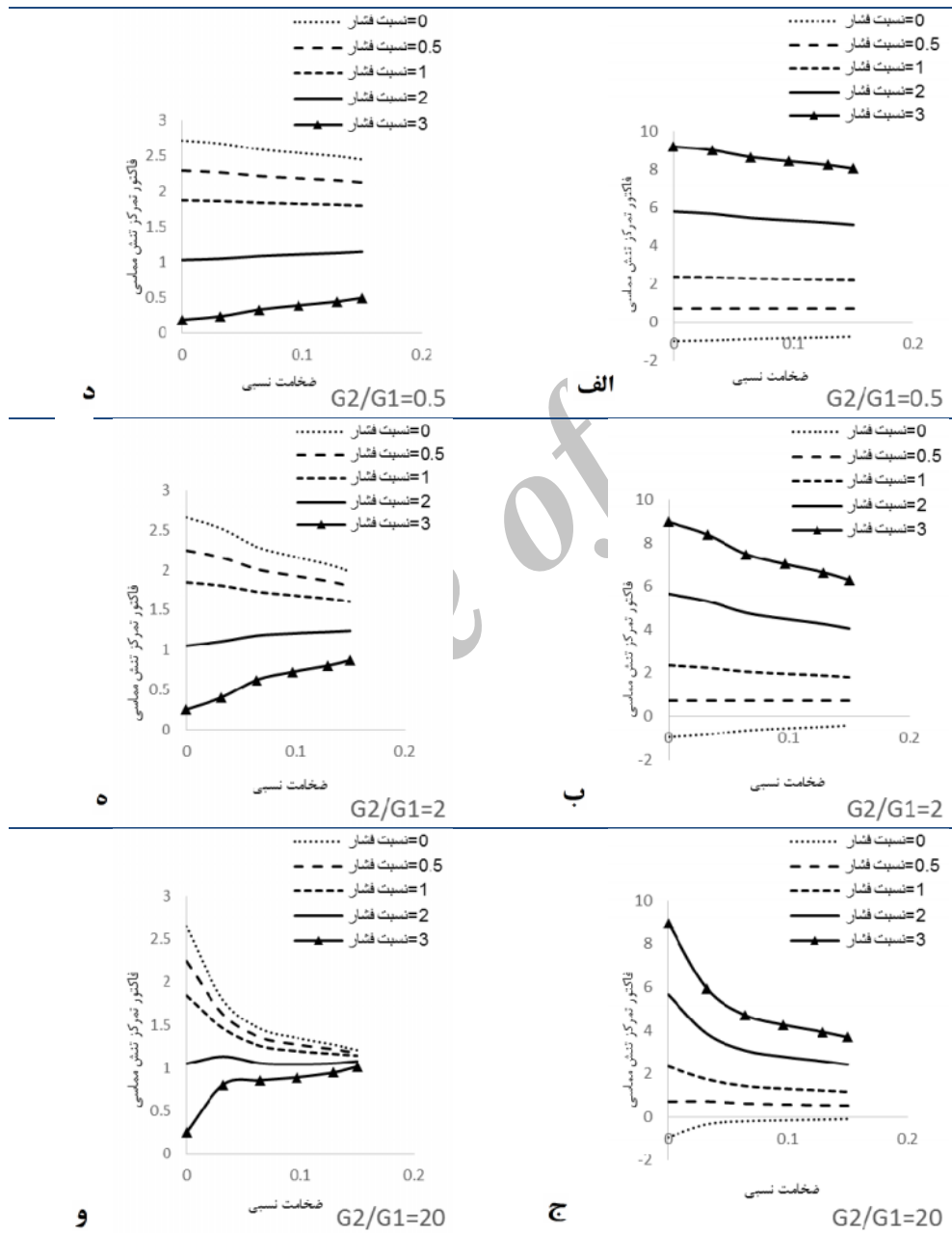




شکل ۱۱- تغییرات فاکتور تمرکز تنش مماسی بر حسب ضخامت نسبی در نسبت فشارهای مختلف و سختی نسبی‌های متفاوت در مرز داخلی دیواره بتنی در الف، ب، ج، د، ه، و) دیواره

از یک، فاکتور تمرکز تنش مماسی تغییرات چندانی را نسبت به افزایش ضخامت نسبی از خود نشان نمی‌دهد، اما با افزایش سختی نسبی، نمودارها در ضخامت نسبی تقریباً ۰/۰۴ همگرا می‌شوند و با افزایش ضخامت نسبی به مقادیر بیش از این تغییر چندانی در میزان تنش مماسی ایجاد نمی‌شود.

در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت تنش، میزان تنش مماسی در دیواره سنگی در سقف افزایش و در دیواره کاهش می‌یابد. از طرفی دیگر افزایش سختی نسبی موجب کاهش میزان تمرکز تنش در سقف و دیواره می‌شود. همانگونه که در نمودارها دیده می‌شود در سختی نسبی کمتر



شکل ۱۲- تغییرات فاکتور تمرکز تنش مماسی بر حسب ضخامت نسبی در نسبت فشارهای مختلف و سختی نسبی‌های متفاوت در دیواره سنگی در الف، ب، ج (سقف و د، ه، و) دیواره

#### ۴- نتیجه‌گیری

طبق آنالیز حساسیت انجام گرفته مشخص شد با افزایش سختی نسبی مقدار تمرکز تنش مماسی در تونل‌های نعل-اسبی، در سقف و دیواره در بتن افزایش می‌یابد. تمرکز تنش مماسی در سنگ نیز در سقف کاهش و در دیواره در حالت کلی اندکی افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر تغییرات تنش مماسی در سختی‌های نسبی بالا (بیشتر از ۱۰)، در ضخامت-های نسبی کمتر از ۰٫۰۴ برای تونل‌های نعل‌اسبی، در دیواره، افزایش می‌یابد، بنابراین در طراحی نگهداری می‌بایست از انتخاب ضخامت‌های نسبی در این محدوده پرهیز کرد. در حالت وجود فشار آب داخلی، افزایش نسبت سختی باعث افزایش فاکتور تمرکز تنش در لاینینگ و کاهش آن در سنگ می‌شود. مشاهده می‌شود که با افزایش نسبت سختی به مقادیر بیش از ۱۰ فاکتور تمرکز تنش مماسی در لاینینگ در مقادیر ضخامت نسبی تقریباً کوچکتر از ۰٫۰۴ بشدت افزایش می‌یابد که در طراحی می‌بایست از این مقادیر پرهیز کرد.

افزایش نسبت تنش برجا نیز باعث افزایش تمرکز تنش فشاری در سقف و کاهش آن در دیواره، در توده سنگ و بتن، برای تونل‌های نعل اسبی می‌شود. مشاهده می‌شود که در نسبت‌های سختی پایین (حداکثر ۲) برای نسبت‌های تنش برجا متفاوت مقدار تنش مماسی ایجاد شده در نقاط بحرانی لاینینگ با افزایش ضخامت نسبی تغییر چندانی نمی‌کند، برای توده‌سنگ این مقدار حدی نسبت سختی برابر ۱ است. بنابراین افزایش ضخامت لاینینگ در این شرایط تاثیری در نگهداری تونل ندارد. اما با افزایش سختی نسبی، نمودارها در مقدار ضخامت نسبی تقریباً ۰٫۰۴ همگرا می‌شوند و با افزایش

ضخامت نسبی به مقادیری بیش از این مقدار تنش مماسی تغییر چندانی نمی‌کند.

#### ۵- فهرست نمادها

فهرست نمادها در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- فهرست نمادها		
نماد	واحد	شرح
$\sigma$	Mpa	تنش
$\sigma_2$	Mpa	تنش افقی
$\sigma_1$	Mpa	تنش قائم
$\gamma$	$\frac{Mpa}{m}$	گرادیان تنش قائم
$K$		ضریب فشار جانبی
$H$	m	عمق تونل
$p_i$	Mpa	فشار داخلی مغار

#### ۶- پیوست‌ها

پس از تعیین ضرایب توابع پتانسیل مجهول، میدان تنش را می‌توانیم طبق فرمول (۷) تعیین کنیم. در اینجا برای سادگی با استفاده از دستگاه معادلات تمام ضرایب بر حسب  $a_i$  و  $d_i$  تعیین شده و در نهایت دستگاه دو معادله و دو تابع پتانسیل مجهول حل می‌شود. با یافتن  $a_i$  و  $d_i$  میدان تنش در توده‌سنگ به صورت معادله (۸) به دست می‌آید.

$$\sigma_p = \frac{1}{|\xi|^2 R (c_1^{*2} + d_1^{*2})} \operatorname{Re} \left\{ (c_1^* - id_1^*) \sum_{j=1}^{n_1} ja_j \xi^{-j-1} + (c_1^* + id_1^*) \left( \frac{1}{t} \sum_{j=1}^{n_2} j \bar{d}_j \xi^{-j+1} + \mu_3 \sum_{j=1}^{n-2} j T_j \xi^{j+1} \right) \right. \\ \left. - \mu_2 \sum_{j=1}^{n-1} j F_1 q_{j+1} \xi^{j+1} + F_2 \xi \right\} - (c_1^* - id_1^*) F_1 \xi^{-2} - (c_1^* + id_1^*) F_1 \xi^{-1} \\ - \frac{G_1}{G_1 - G_2} \gamma H \sum_{j=1}^n \left( \frac{1+K}{2} \chi_{j,1} - \frac{1-K}{2} \omega_j \right) j \xi^{-j-1} - \left( \frac{\Gamma'(w'(\xi))^2}{R} \right) \xi^2 \left. \right\} + 2 \frac{a_1^* c_1^* + b_1^* d_1^*}{R (c_1^{*2} + d_1^{*2})} + \Gamma \quad (8)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{1}{|\xi|^2 R (c_1'^2 + d_1'^2)} \operatorname{Re} \left\{ (c_1' - id_1') \sum_{j=1}^{n_1} ja_j \xi^{-j-1} + (c_1'' + id_1'') \left( \frac{1}{t} \sum_{j=1}^{n_2} j \bar{d}_j \xi^{-j+1} + \mu_3 \sum_{j=1}^{n-2} j T_j \xi^{j+1} \right. \right. \quad (9)$$

$$\left. \left. - \mu_2 \sum_{j=1}^{n-1} j F_1 q_{j+1} \xi^{j+1} + F_2 \xi \right) - (c_1' - id_1') F_1 \xi^{-2} - (c_1'' + id_1'') F_1 \xi^{-1} \right.$$

$$\left. - \frac{G_1}{G_1 - G_2} \gamma H_i \sum_{j=1}^n \left( \frac{1+K}{2} \chi_{j,1} - \frac{1-K}{2} \omega_j \right) j \xi^{-j-1} - \left( \frac{\Gamma'(w'(\xi))^2}{R} \right) \xi^2 \right\} + 2 \frac{a_1' c_1'' + b_1' d_1''}{R (c_1'^2 + d_1'^2)} + \Gamma$$

$$\tau_{\rho\theta} = -\frac{1}{|\xi|^2 R (c_1'^2 + d_1'^2)} \operatorname{Im} \left\{ (c_1'' - id_1'') \sum_{j=1}^{n_1} ja_j \xi^{-j-1} + (c_1' + id_1') \left( \frac{1}{t} \sum_{j=1}^{n_2} j \bar{d}_j \xi^{-j+1} + \mu_3 \sum_{j=1}^{n-2} j T_j \xi^{j+1} \right. \right. \quad (10)$$

$$\left. \left. - \mu_2 \sum_{j=1}^{n-1} j F_1 q_{j+1} \xi^{j+1} + F_2 \xi \right) - (c_1'' - id_1'') F_1 \xi^{-2} - (c_1' + id_1') F_1 \xi^{-1} \right.$$

$$\left. - \frac{G_1}{G_1 - G_2} \gamma H_i \sum_{j=1}^n \left( \frac{1+K}{2} \chi_{j,1} - \frac{1-K}{2} \omega_j \right) j \xi^{-j-1} - \left( \frac{\Gamma'(w'(\xi))^2}{R} \right) \xi^2 \right\}$$

که در اینجا:

$$a_1' = \operatorname{Re} \left\{ F_1 \xi^{-1} - \sum_{j=1}^{n_1} ja_j \xi^{-j-1} \right\} \quad (11)$$

$$b_1' = \operatorname{Im} \left\{ F_1 \xi^{-1} - \sum_{j=1}^{n_1} ja_j \xi^{-j-1} \right\}$$

$$c_1' = \operatorname{Re} \left\{ \frac{w(\xi)}{R} \right\}, d_1' = \operatorname{Im} \left\{ \frac{w(\xi)}{R} \right\}$$

$$c_1'' = \operatorname{Re} \left\{ \frac{w'(\xi)}{R} \right\}, d_1'' = \operatorname{Im} \left\{ \frac{w'(\xi)}{R} \right\}$$

$$c_1''' = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{R} \frac{w(\xi) \overline{w''(\xi)}}{w'(\xi)} \right\}, d_1''' = \operatorname{Im} \left\{ \frac{1}{R} \frac{w(\xi) \overline{w''(\xi)}}{w'(\xi)} \right\}$$

$$F_1 = -\frac{1}{2\pi(1+k_1)} (F_x + iF_y) \quad F_2 = \frac{k_1}{2\pi(1+k_1)} (F_x - iF_y)$$

تنش مماسی در امتداد مرز  $\eta_1$  با معلوم بودن مقدار  $\sigma_\rho$  تنش مماسی در مرز  $\eta_2$  نیز، با معلوم بودن مقدار  $\sigma_\rho$  که برابر  $\sigma_\rho$  وارد شده از سمت توده سنگ بر مرز توده-سنگ-بتن است (معادله ۹) به صورت رابطه (۱۲) به دست می-آید.

تنش مماسی در مرز  $\eta_2$  نیز، با معلوم بودن مقدار  $\sigma_\rho$  که همان مقدار فشار آب در داخل تونل است، با استفاده از رابطه (۱۲) تعیین می‌شود.

$$\sigma_{\theta} = 4 \frac{c_1'' a_2' + d_1'' b_2'}{c_1''^2 + d_1''^2} - \sigma_{\rho} \quad (12)$$

که در اینجا:

$$a_2' = \operatorname{Re} \left\{ \sum_{j=1}^{n_2} j d_j \xi^{j-1} - s \sum_{j=1}^{n_1} j a_j \xi^{-j-1} + t \mu_3 \sum_{j=1}^{n-2} j T_j \xi^{-j-1} - t \mu_3 \sum_{j=1}^{n-1} F_1 j q_{j+1} \xi^{-j-1} + \frac{F_1'}{\xi} \right\} \quad (13)$$

$$b_2' = \operatorname{Im} \left\{ \sum_{j=1}^{n_2} j d_j \xi^{j-1} - s \sum_{j=1}^{n_1} j a_j \xi^{-j-1} + t \mu_3 \sum_{j=1}^{n-2} j T_j \xi^{-j-1} - t \mu_3 \sum_{j=1}^{n-1} F_1 j q_{j+1} \xi^{-j-1} + \frac{F_1'}{\xi} \right\} \quad (14)$$

$$F_1' = -\frac{1}{2\pi(1+k_2)} (F_x + iF_y) \quad F_2' = \frac{k_2}{2\pi(1+k_2)} (F_x - iF_y) \quad (15)$$

## ۷- مراجع

- Batista, M. (2011). On the stress concentration around a hole in an infinite plate subject to a uniform load at infinity. *International Journal of Mechanical Sciences*, 254-261.
- Bobet, A. (2003). Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 377-393.
- Bobet, A. (2010). Drained and undrained response of deep tunnels subjected to far-field shear loading. *Tunneling and Underground Space Technology*, 21-31.
- Exadaktylos, G. E., Liolios, P. A., Stavropoulou, M. C. (2003). A semi-analytical elastic stress-displacement solution for notched circular openings in rocks. *International Journal of Solids and Structures*, 1165-1187.
- Exadaktylos, G., Stavropoulou, M. (2002). A closed-form elastic solution for stresses and displacements around tunnels. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 905-916.
- Fahimifar, A.; Zareifard, M. R. (2009). A theoretical solution for analysis of tunnels below groundwater considering the hydraulic-mechanical coupling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 634-646, (6)24.
- Fernández, G. (1994). Behavior of pressure tunnels and guidelines for liner design. *Journal of geotechnical engineering*, 1768-1791, 10(120).
- Fotieva, Nina N; Bulychev, NS; Sammal, AS. (1996). Design of shallow tunnel linings. *ISRM International*

*Symposium-EUROCK 96* International Society for Rock Mechanics.

- Fotieva, Nina; Bulychev, Nikolay; Sammal, Andrey; Deev, Petr. (2005) .Stress state and bearing capacity of shallow tunnel linings undergoing the influence of nearby located buildings .*Górnictwo i Geoinżynieria*, 217-223, 29.
- Fotieva, NN; Bulychev, NS; Antziferova, LN .(1998) .Designing multi-layer lining of shallow tunnels . *World Tunnel Congress*, 293-298, 98.
- Fotieva, NN; Voronina, I Yu. (2004) .Study of parallel undersea or under-river tunnel linings stress state . *VIIIth Regional Rock Mechanics Symposium*, 389-393.
- Kargar, A. R., Rahmangebaj, R., Hajabasi, M. A. (2014) .A semi-analytical elastic solution for stress field of lined non-circular tunnels at great depth using complex variable method *International Journal of Solids and Structures* , 1475-1482.
- Kargar, A. R., Rahmangebaj, R., Hajabasi, M. A .(2015) .The stress state around lined non-circular hydraulic tunnels below the water table using complex variable method *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* , 207-216.
- Lu, A. Z., Zhang, N., Kuang, L .(2014) .Analytic solutions of stress and displacement for a non-circular tunnel at great depth including support delay *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* ,60-81.
- Muskhelishvili, N. I. (1953) .*Some basic problems of the mathematical theory of elasticity* .Cambridge Univ Press.
- Peck, R. B., Hendron, A., Mohraz, B. (1972) .State of the art of soft-ground tunneling *N Am Rapid Excav & Tunneling Conf Proc*, 86-259.
- Penzien, J., Wu, C. L .(1998) .Stresses in linings of bored tunnels *Earthquake engineering & structural dynamics*, 283-300.
- Qingqi, Li; Qicheng, He. (1998) .A Computational Method for the Lining of Pressure Tunnel [J] *Journal of Hydroelectric Engineering*, 123-136, 3.
- Savin, G .(1961) .*Stress Concentration Around Holes* .Oxford: Pergamon Press.
- Wenqi, Y. L. (1997) .A Study on the Design of Permeable RC Lining in High Pressure Water Carriage tunnel [J] .*Chinese Journal of rock Mechanics and Engineering*,2.