

ارائه یک مدل تحلیل برای محاسبه فشار رو به بالا در کف تونل‌ها با ویژگی‌های ژئومکانیکی ضعیف

شیراز ارشدنژاد*

استادیار گروه مهندسی معدن، واحد محلات، دانشگاه آزاد اسلامی، محلات، ایران، s_arshadnejad@yahoo.com

(دریافت: ۱۲ اسفند ۱۳۹۷ و پذیرش: ۵ تیر ۱۳۹۸)

چکیده

پژوهش‌های زیادی در مورد تحلیل تنش در اطراف تونل، به ویژه دیواره و سقف آن انجام گرفته است اما در مورد کف تونل تحلیل زیادی انجام نشده است. در این مقاله با کمک روش تعادل حدی و اصول مکانیک خاک سعی شده است تا روشی تحلیلی ارائه شود که بتوان نسبت به برآورد فشار آماس کف تونل در محیط‌های خاکی و توده سنگ‌های به شدت درزه‌دار که رفتاری مانند خاک دارند، اقدام کرد. فشار رو به بالا در کف تونل می‌تواند ناشی از پدیده تورم در سنگ‌ها و خاک‌های رسی به دلیل تغییر رطوبت، شدت میدان تنش و بروز پدیده لهیدگی، بزرگی قطر تونل و زون پلاستیک، زلزله و فشار آب منفذی و یا خزش و زمین لغزش رخ دهد اما در این پژوهش صرفاً به بررسی این پدیده ناشی از میدان تنش و شرایط ژئومکانیکی محیط و فشار آب منفذی پرداخته شده است. در الگوریتم ارائه شده اثر پدیده تمرکز تنش در اطراف تونل در نظر گرفته شده است. با بررسی نتایج حاصل از محاسبات مشخص شد که برای تونل‌های کم عمق (کمتر از ۱۰۰ متر) در چسبندگی‌های بیش از ۱۰۰ کیلوپاسکال، تاثیر افزایش زاویه اصطکاک داخلی بر کاهش فشار آماس کف اندک و تاثیر عمق تونل در برآورد فشار آماس کف زیاد است. علاوه بر این مشخص شد که برای چسبندگی‌های بیش از ۳۰۰ کیلو پاسکال و زاویه اصطکاک داخلی بیش از ۳۳ درجه در تونل‌های با عمق کمتر از ۱۰۰ متر و دهانه ۶ متر، می‌توان از فشار رو به بالا در کف تونل و احتمال ایجاد شدن گوه ناپایدار در آنجا صرفه نظر کرد. برای ساده‌سازی در استفاده از مدل (مجموعه روابط) و یا برنامه‌نویسی، یک فلوچارت نیز پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی

فشار آماس کف تونل، فشار آب منفذی، تحلیل تعادل حدی، تمرکز تنش.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

نفوذ آب با شدن جریان ۴۰ لیتر بر ثانیه رخ داد [۲۳]. یکی دیگر از عوامل بالازدگی کف، روش حفاری و گام پیشروی و در نهایت پدیده ترخیص تنش است. البته این پدیده معمولاً تأثیر اندک و محدودی در رفتار کف تونل دارد و در تحلیل تنش پیرامون تونل در نظر گرفته می‌شود. به این معنا که پس از اعمال تنش و تغییر شکل، محیط به تعادل استاتیکی می‌رسد و دیگر افزایشی در تغییر شکل، ناشی از این پدیده رخ نخواهد داد.

جدول ۱- آماس کف تونل ناشی از عوامل مختلف [۱۸].

نام تونل	بالازدگی (میلی‌متر)	علت پدیده	راهکار
تاگوکورا ^۷	۱۲	تورم	میل مهار بلند
روکوچوروکیو ^۸	۳۸ (۶ میلی‌متر در سال)	لهیدگی	رادیه بتن مسلح
ریون‌هاما ^۹	۹۰ (۱۵ میلی‌متر در سال)	تورم	رادیه بتن مسلح و میل مهار بلند
کامویی ^{۱۰}	۱۲۰	تورم	میل مهار بلند
ریون‌کنتو ^{۱۱}	۳۰۰	تورم	میل مهار بلند
یورشینو ^{۱۲}	۱۶۰	تورم	رادیه بتن مسلح
سنگنیاما ^{۱۳}	۱۱۰ (۹۹ میلی‌متر در سال)	تورم، آب منفذی و ارتعاش قطار	رادیه بتن مسلح
میوکن ^{۱۴}	۴۰	زلزله نیگاتا	میل مهار بلند
یونوما ^{۱۵}	۲۵۰	زلزله نیگاتا	میل مهار بلند
ساکازوکیاما ^{۱۶}	۹۵۰	تورم	شاتکریت و قاب فولادی و میل مهار و رادیه بتن مسلح یا قوس
خط آهن ۹ و ۱۷	۷۰	فشار آب منفذی زیاد	تزریق دوغاب با بنتونیت و فشار زیاد
چونگلیا ^{۱۸}	۳۰۰	حرکت گسل	تزریق تحکیمی
گاربو ^{۱۹}	۳۰۰	زمین لغزش خزشی و تونل کم عمق	چال زهکش در دیواره، اجرای شاتکریت و میل مهار کل مقطع تونل
برنلی ^{۲۰}	۲۰۰	فشار آب منفذی زیاد	تزریق دوغاب با فشار زیاد

تحلیل تنش در ناحیه کف تونل در مبحث تحلیل پایداری تونل‌ها تاکنون کمتر مورد توجه بوده است. در بسیاری از موارد مشاهده شده است که کف تونل به علت فشار زیاد ناشی از میدان تنش، وجود آب زیرزمینی (فشار منفذی) و گاهی مقاومت پایین توده سنگ یا خاک در بردارنده تونل، زلزله، بروز پدیده لهیدگی، خزش، برخورد با گسل و زمین لغزش، دچار بالازدگی و تغییر شکل می‌شود. همچنین در سنگ‌ها و خاک‌هایی (حاوی کانی‌های رسی) که خاصیت تورم‌پذیری در برابر تغییر رطوبت دارند نیز این پدیده دیده می‌شود. تحقیقات پیرامون این پدیده از سه منظر تحقیقات میدانی [۱-۶]، تحقیقات بر اساس مدلسازی عددی [۷-۱۳] و تحقیقات آزمایشگاهی [۱۴-۱۶] انجام می‌شود.

سنگ‌هایی مانند گچ، پیریت، مارکاسیت، گل‌سنگ، شیل، توف سرپانتین و شیست کلریتی پتانسیل بالایی در تورم ناشی از جذب آب دارند به طوری که گاهی تا ۶۰ درصد افزایش حجم پیدا می‌کنند [۱۷]. زمانی که پدیده لهیدگی ناشی از تنش زیاد در محیط نرم رخ می‌دهد، آماس کف تونل کاملاً محتمل است. موارد متعددی از این پدیده در ژاپن، تایوان، چین و هندوستان مشاهده شده است [۱۸]. همچنین یکی دیگر از این عوامل زلزله است. در زلزله کوبه ژاپن در سال ۱۹۹۵ در تونل‌های روکو^۱ و بانتاکی^۲ مقدار بالازدگی به اندازه ۱۲۰ میلی‌متر مشاهده شد [۱۹]. مشابه همین اتفاق در زلزله دوزس^۳ ترکیه در سال ۱۹۹۹ و در تونل بلو^۴ با مقدار بالازدگی ۱۰۰۰ میلی‌متر رخ داد [۲۰]. مورد مهم بعدی زلزله نیگاتای ژاپن در سال ۲۰۰۴ و در تونل یونوما^۵ با مقدار بالازدگی ۲۵۰ میلی‌متر بوده است [۲۱]. از عوامل مهم دیگر این پدیده وجود فشار آب منفذی با مقدار زیاد است. در خط آهن شماره ۹ چین (وو^۶) به علت بارندگی سنگین در بازه‌ای کوتاه (۴۲۸ میلی‌متر) و بالا رفتن سطح آب زیرزمینی، مقدار ۷۰ میلی‌متر بالازدگی در کف تونل (در محیط خاکی) ثبت شد [۲۲]. در استرالیا و در تونلی به نام برنلی در عمق ۶۰ متری و با کف‌بند بتن مسلح، بالازدگی کف به اندازه ۲۰۰ میلی‌متر و به همراه

۷- Tagokura

۸- Rokujuurigo

۹- Rebunhama

۱۰- Kamui

۱۱- Rebungetouge

۱۲- Ureshino

۱۳- Sengeniyama

۱۴- Myoken

۱۵- Uonuma

۱۶- Sakazukiyama

۱۷- Wu 9 line

۱۸- Chungliao

۱۹- Garbo

۲۰- Burnley

۱- Rokko

۲- Bantaki

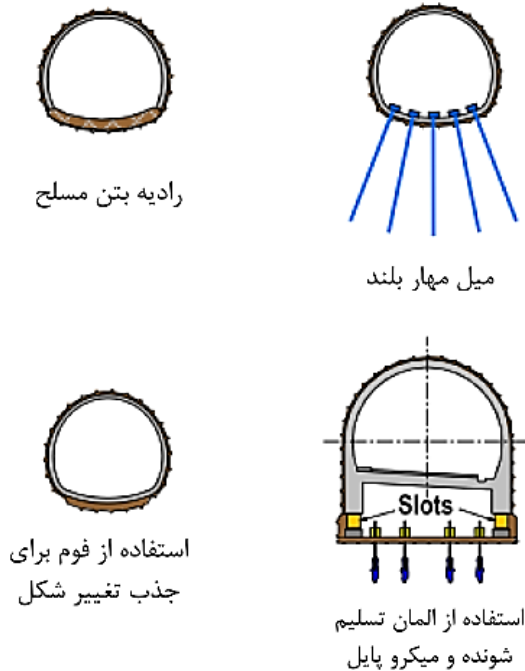
۳- Duzce

۴- Bolu

۵- Unoma

۶- Wu

نیروی برشی و لنگر خمشی) و بررسی کفایت طرح کرد. در صورتی که فشار رو به بالا خیلی زیاد باشد، از المان‌های تسلیم شونده و شکل‌پذیر، بین سازه کف‌بند و توده سنگ یا خاک استفاده می‌شود. در شکل ۲ تعدادی از این روش‌های مهار این پدیده نشان داده شده است.



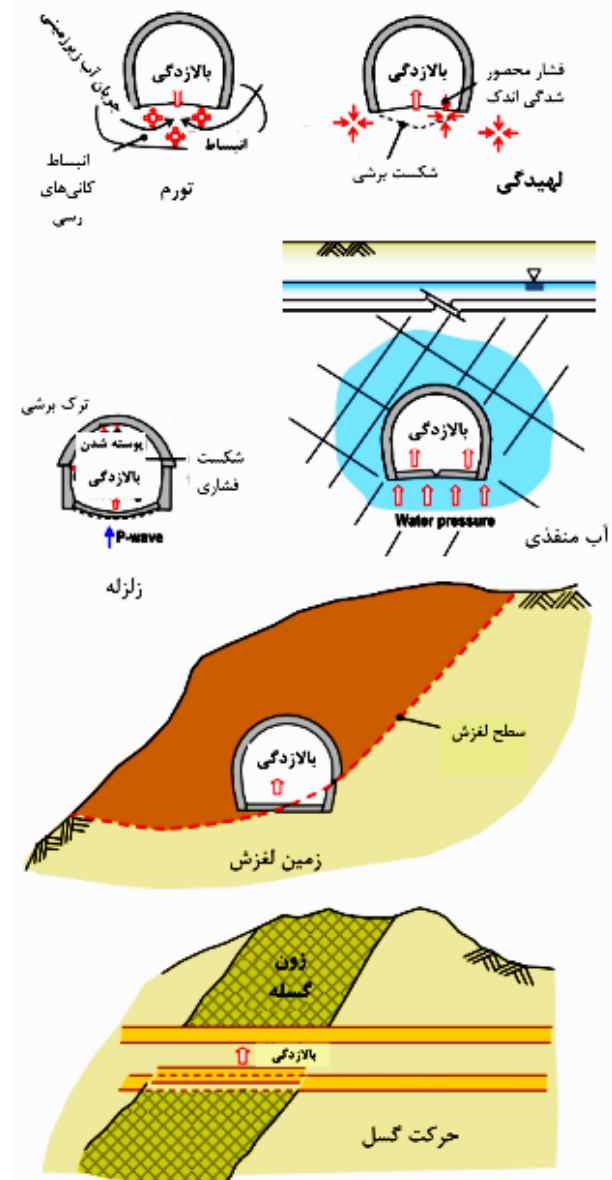
شکل ۲- روش‌های مختلف کنترل فشار رو به بالا در کف تونل [۲۴].

در این پژوهش به بحث و بررسی تحلیلی پدیده فشار رو به بالای ناشی از میدان تنش با توجه به ویژگی‌های ژئومکانیکی محیط در کف تونل پرداخته می‌شود. عواملی مانند خالی شدن مقطع تونل با حفاری و تغییر میدان تنش ناشی از آن و هم چنین پدیده ترخیص تنش که متأثر از شکل مقطع تونل، گام حفاری، سختی پوشش تونل و سختی محیط است نیز بر بالا آمدن کف تونل موثرند اما تاثیر این عوامل نسبت به موارد یاد شده کمتر است و البته روش تحلیل مستقلی دارد که موضوع مورد بحث در این مقاله نیست.

یکی از راهکارها در برابر بالازدگی کف در تونل‌های معدنی اجرای عملیات کف‌برداری و تسطیح است که مشکل را برای مدتی برطرف می‌کند اما این پدیده در مورد تونل‌های راه و به ویژه راه آهن بسیار نامطلوب است و باید به شدت از آن پرهیز شود زیرا تسلیم‌شدگی در کف تونل ممکن است، باعث نشست و گاهی تغییر شکل‌های نامتقارن در مقطع تونل شود.

برای برآورد فشار رو به بالای کف تونل از دو روش استفاده

تعدادی از موارد بروز پدیده بالازدگی کف تونل‌ها در چندین پروژه تونل‌سازی در نقاط مختلف دنیا در جدول ۱ [۱۸] و علت بروز پدیده آماس کف تونل ناشی از عوامل مختلف در شکل ۱ به صورت شماتیک ارایه شده است.



شکل ۱- تاثیر فشار رو به بالا در کف تونل [۲۱].

در طراحی کف تونل، علاوه بر تنش‌های اعمالی از طرف محیط ناشی از رفتار مکانیکی الاستوپلاستیک، لازم است تا فشار رو به بالای مضاعف ناشی از هر یک از پدیده‌های یاد شده به تنش‌های اولیه اضافه شده و سپس به صورت یک بار گسترده رو به بالا به سازه کف‌بند اعمال شود.

با روش‌های رایج طراحی متناسب با نوع سازه کف‌بند (قاب فولادی، بتن مسلح، لاتیس و شاتکریت، میل مهار و نظایر آن) می‌توان اقدام به محاسبه نیروهای داخلی (نیروی محوری،

سوم این رابطه برای در نظر گرفتن اضافه فشار ناشی از پدیده تمرکز تنش است.

$$\sigma_a = \sigma_v K_a - 2c \sqrt{K_a} + K_a \sigma_v' \quad (1)$$

که در آن:

σ_a تنش محرک (کیلوپاسکال)

σ_v تنش قائم (کیلوپاسکال)

k_a ضریب فشار محرک

c چسبندگی خاک یا توده سنگ (کیلوپاسکال)

σ_v' حداکثر تنش قائم در جداره پایینی دیواره تونل در تراز کف تونل با در نظر گرفتن اثر تمرکز تنش (رابطه ۳ و ۲)

$$\sigma_v' = c_s \sigma_v^0 \quad (2)$$

$$\sigma_v^0 = \gamma H \quad (3)$$

که در این روابط:

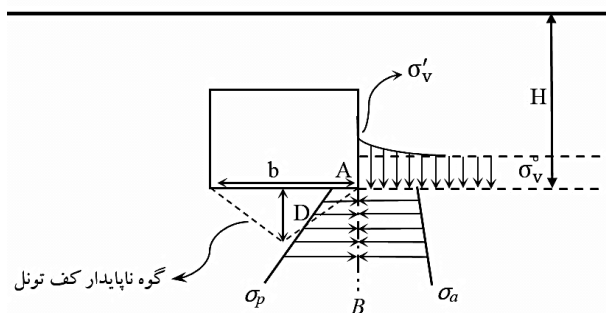
c_s ضریب تمرکز تنش در دیواره تونل

σ_v^0 تنش قائم برجای اولیه در تراز کف تونل (کیلوپاسکال)

γ وزن حجمی توده سنگ یا خاک (کیلو نیوتن/متر)

H عمق تراز کف تونل از سطح زمین (متر)

وضعیت تنش‌های مورد بحث در اطراف و کف تونل در شکل ۳ نشان داده شده است. بدیهی است که وضعیت به نمایش در آمده در سمت دیگر تونل نیز وجود دارد.



شکل ۳- توزیع تنش‌های محرک و مقاوم در کف تونل.

ضریب تمرکز تنش (c_s) را می‌توان از طریق مدل‌سازی عددی با مدل رفتاری الاستیک خاک یا توده سنگ میزبان به دست آورد اما هوک و براون مدل تجربی و البته کاربردی برای تعدادی از سطح مقطع‌های رایج در تونلسازی ارائه کرده‌اند که بسیار راه‌گشاست. این ضرایب بر اساس مدل‌سازی عددی الاستیک به روش اجزای محدود به دست آمده‌اند [۳۰]. مدل آن‌ها با توجه به شکل سطح مقطع تونل و نسبت تنش افقی به قائم قابل استفاده است. از رابطه ۴ برای تعیین ضریب تمرکز تنش در دیواره تونل استفاده می‌شود [۳۰].

می‌شود که امروزه رایج‌ترین روش، استفاده از مدل‌سازی عددی است و روش دوم استفاده از روابط تحلیلی است که با روش تعادل حدی و فرضیات مکانیک خاک قابل حصول است. یکی از اولین تحقیقات انجام شده در این زمینه توسط تیمباریوچ^۱ [۲۵ و ۲۶] انجام شده است اما این تحلیل کامل نبوده و نواقصی از جمله در نظر نگرفتن تمرکز تنش و فشار آب منفذی در آن دیده می‌شود.

تحلیل تنش در اطراف یک حفره (مانند تونل دایره‌ای) در محیط الاستیک نخستین بار توسط کیرش^۲ در سال ۱۸۹۸ انجام شد [۲۷]. به کمک روش یاد شده می‌توان تنش‌های شعاعی، مماسی و برشی در جداره تونل دایره‌ای و از جمله در کف آن را محاسبه کرد. تعدادی از محققان بر اساس نظریه پلاستیسیته مدل‌هایی در مورد چگونگی تسلیم‌شدگی توده سنگ یا خاک در اطراف تونل ارائه کردند که اغلب این مدل‌ها متمرکز به تعیین ابعاد ناحیه پلاستیک در سقف و گاهی دیواره‌های تونل است. در این میان مدل الاستوپلاستیک بری^۳ [۲۸] اعتبار ویژه‌ای دارد. این مدل در شیل‌ها و رس‌ها پاسخ قابل قبولی داده است [۲۷]. با کمک این مدل می‌توان پس از محاسبه ضخامت ناحیه پلاستیک مقدار تنش‌های مماسی و شعاعی را در اطراف تونل دایره‌ای از جمله در کف آن محاسبه کرد.

۲- تحلیل تنش در کف تونل

در روش تحلیلی پیشنهادی در این مقاله از اصول تعادل حدی و مکانیک خاک بر اساس تئوری رانکین و همچنین معیار شکست موهر-کولمب [۲۹] برای خواص توده خاک یا توده سنگ ضعیف استفاده می‌شود. منظور از توده سنگ در این مقاله، سنگ به شدت درزه‌دار و خرد شده است که رفتاری شبیه به خاک دارد و اصطلاحاً محیطی شبه پیوسته محسوب می‌شود. بنابراین ابتدا تلاش می‌شود تا عمق زون ناپایدار به اصطلاح گوه ناپایدار نامیده شده است و امکان لغزش و حرکت رو به بالا دارد، بر اساس تعادل دو تنش محرک^۴ و مقاوم^۵ محاسبه شود. تنش محرک در خاک یا توده سنگی که علاوه بر داشتن اصطکاک داخلی، چسبندگی نیز دارد به شکل رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۲۹]. البته جمله

^۱- Tsimbaryeritch

^۲- Kirsch

^۳- Bray

^۴- Active stress

^۵- Passive stress

بر اساس اصول مکانیک خاک روشن است که متناسب با ایجاد فشار محرک در یک سوی خط AB (شکل ۳) فشار مقاوم در سوی مقابل آن ایجاد خواهد شد که رابطه ۸ [۲۹] قابل محاسبه است.

$$\sigma_p = \sigma_v K_p + 2C \sqrt{K_p} \quad (۸)$$

$$K_p = tg^2(45 + \frac{\phi}{2}) \quad (۹)$$

که در این روابط:

σ_p تنش مقاوم خاک یا توده سنگ

k_p ضریب فشار مقاوم خاک یا توده سنگ

عمق گوه ناپایدار کف تونل تا جایی ادامه می‌یابد که دو تنش محرک و مقاوم با یکدیگر برابر شوند. بر اساس این تعادل، می‌توان عمق گوه مورد بحث را با رابطه پیشنهادی ۱۳ محاسبه کرد.

$$\sigma_a = \sigma_p \quad (۱۰)$$

$$K_a(\sigma_v + \sigma'_v - \frac{2c}{\sqrt{K_a}}) = \sigma_v K_p + 2C \sqrt{K_p} \quad (۱۱)$$

$$K_a(\gamma D + C_s \gamma H - \frac{2c}{\sqrt{K_a}}) = \gamma D K_p + 2C \sqrt{K_p} \quad (۱۲)$$

$$D = \frac{\left[\frac{2C \left[1 + \left(\frac{K_p}{K_s} \right)^{0.5} \right]}{K_s} - C_s \gamma H \right]}{\gamma \left(1 - \frac{K_p}{K_s} \right)} \quad (۱۳)$$

۳- تحلیل نیروی اعمالی به گوه ناپایدار کف تونل

پس از تعیین عمق گوه ناپایدار، محاسبه نیروی محرک، مقاوم و حتا سایر نیروهای موثر به گوه از رابطه‌های ۱۴ و ۱۵ قابل محاسبه‌اند.

$$P_a = \frac{\gamma D^2}{2} K_a - 2cD \sqrt{K_a} + K_a D c_s \gamma H \quad (۱۴)$$

$$P_p = \frac{\gamma D^2}{2} K_p + 2cD \sqrt{K_p} \quad (۱۵)$$

که در این روابط:

P_a نیروهای محرک (کیلونیوتن)

P_p نیروهای مقاوم (کیلونیوتن)

وضعیت نیروهای اعمالی به گوه ناپایدار کف تونل در شکل

$$C_s = B - K \quad (۴)$$

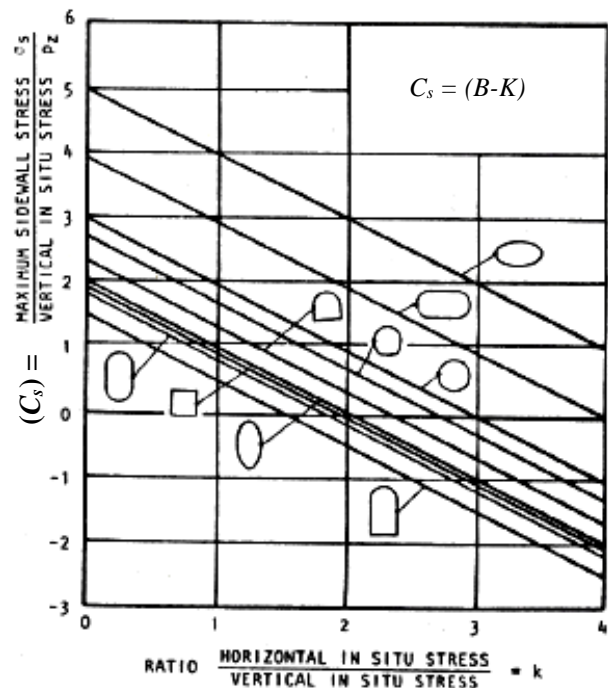
که در آن:

B ضریب ثابت مربوط به شکل مقطع حفاری (جدول ۲)

K نسبت تنش افقی به قائم (در محیط‌های خاکی معادل ضریب فشار ساکن خاک است).

جدول ۲- ضریب تجربی برای تخمین ضریب تمرکز تنش [۳۰].

مقدار ضریب B								
۲	۱٫۵	۱٫۸	۲٫۳	۲٫۷	۳	۵	۱٫۹	۳٫۹



شکل ۴- تاثیر شکل مقطع تونل و نسبت تنش افقی به قائم بر تمرکز تنش در دیواره تونل [۳۰].

رابطه ۱ را می‌توان به صورت رابطه ۵ ساده کرد. البته مقدار ضریب فشار محرک خاک بر اساس تئوری رانکین [۲۹] به صورت روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌شود.

$$\sigma_a = K_a(\sigma_v + \sigma'_v - \frac{2c}{\sqrt{K_a}}) \quad (۵)$$

$$K_a = tg^2(45 - \frac{\phi}{2}) \quad (۶)$$

$$\sigma_v = \gamma D \quad (۷)$$

که در این روابط:

ϕ زاویه اصطکاک داخلی خاک یا توده سنگ

D عمق گوه ناپایدار نسبت به کف تونل

$$P_{wf} = \gamma_w (h_w + h_t + \frac{D}{2}) \quad (21)$$

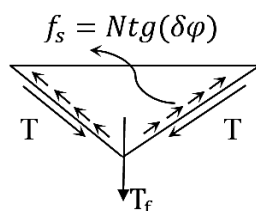
$$F_w = 2(P_{wf} \times b_f) \sin \theta_f \quad (22)$$

$$b_f = \frac{D}{\sin \beta_f} \quad (23)$$

بنابراین مجموع نیروهای محرک طبق رابطه ۲۴ محاسبه می‌شود.

$$F_f = F_w + N_f \quad (24)$$

مولفه نیروی اعمالی در امتداد دو سطح لغزش گوه و برآیند آن‌ها در امتداد قائم و رو به پایین خواهد بود. نیروی اصطکاک به خلاف جهت دو نیروی یاد شده عمل می‌کند.



شکل ۷- موقعیت نیروهای مقاوم

$$T_e = T - F_s \quad (25)$$

$$f_s = Ntg(\delta\varphi) \quad (26)$$

$$T_f = 2T_e \sin \beta_f \quad (27)$$

که در این روابط:

T نیروی اعمالی در امتداد سطح لغزش

f_s نیروی اصطکاک مقاوم

N نیروی اعمالی عمود بر سطح لغزش

φ زاویه اصطکاک داخلی خاک یا توده سنگ

δ ضریب کاهنده (برای حالت استاتیکی ۰٫۶۷ و برای حالت

دینامیکی ۰٫۵ است.) [۳۱]

T_e برآیند نیروی اعمالی در امتداد سطح لغزش

T_f برآیند نیروی اعمالی در امتداد قائم

وزن گوه نیز به عنوان یک نیروی مقاوم رو به پایین عمل می‌کند (رابطه ۲۸).

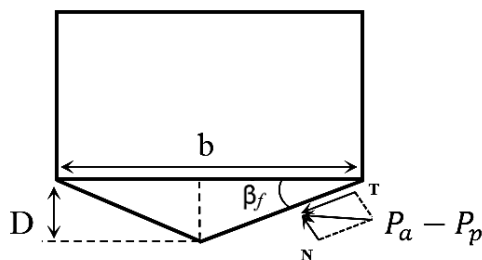
$$W_f = \frac{\gamma.D.b}{2} \quad (28)$$

بنابراین نیروی مقاوم نهایی از رابطه ۲۹ به دست می‌آید.

$$R_f = T_f + W_f \quad (29)$$

اگر تونل دارای کف‌بند باشد و یا متعلقاتی به صورت دائم در کف تونل اجرا و نصب شده باشد (مانند روسازی راه، ریل و

۵ به نمایش در آمده است. البته باید توجه کرد که این نیروها متقارن‌اند و در دو وجه گوه اعمال می‌شوند.



شکل ۵- نیروی برآیند اعمالی به گوه

$$T = (P_a - P_p) \cos \beta_f \quad (16)$$

$$N = (P_a - P_p) \sin \beta_f \quad (17)$$

$$\beta_f = \text{tg}^{-1} \left(\frac{2D}{b} \right) \quad (18)$$

که در این روابط:

b عرض تونل (متر)

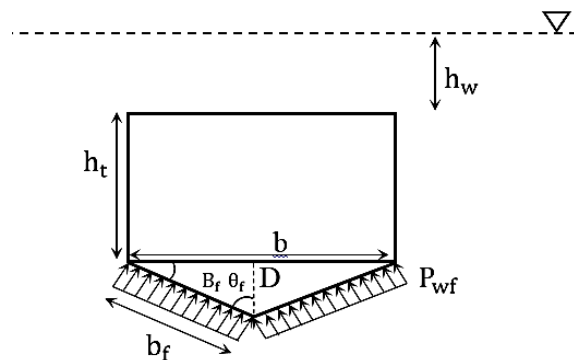
β_f زاویه کناری گوه

نیروی رانشی رو به بالا حاصل مولفه N است (شکل ۵) و از آنجا که گوه دو وجه دارد، نیروی یاد شده نیز به صورت متقارن از طرفین اعمال می‌شود و برآیند آن‌ها به شکل روابط ۱۹ و ۲۰ است.

$$N_f = 2N \sin \theta_f \quad (19)$$

$$\theta_f = 90 - \beta_f \quad (20)$$

اگر تونل در زیر سطح ایستابی باشد، فشار آب نیز به کمک نیروی محرک رو به بالا (N_f) خواهد آمد و آن را تشدید می‌کند. چنانچه در جدول ۱ اشاره شد، موارد متعددی از پدیده بالازدگی مشاهده شده است [۱۸] که ناشی از فشار آب منفذی است.



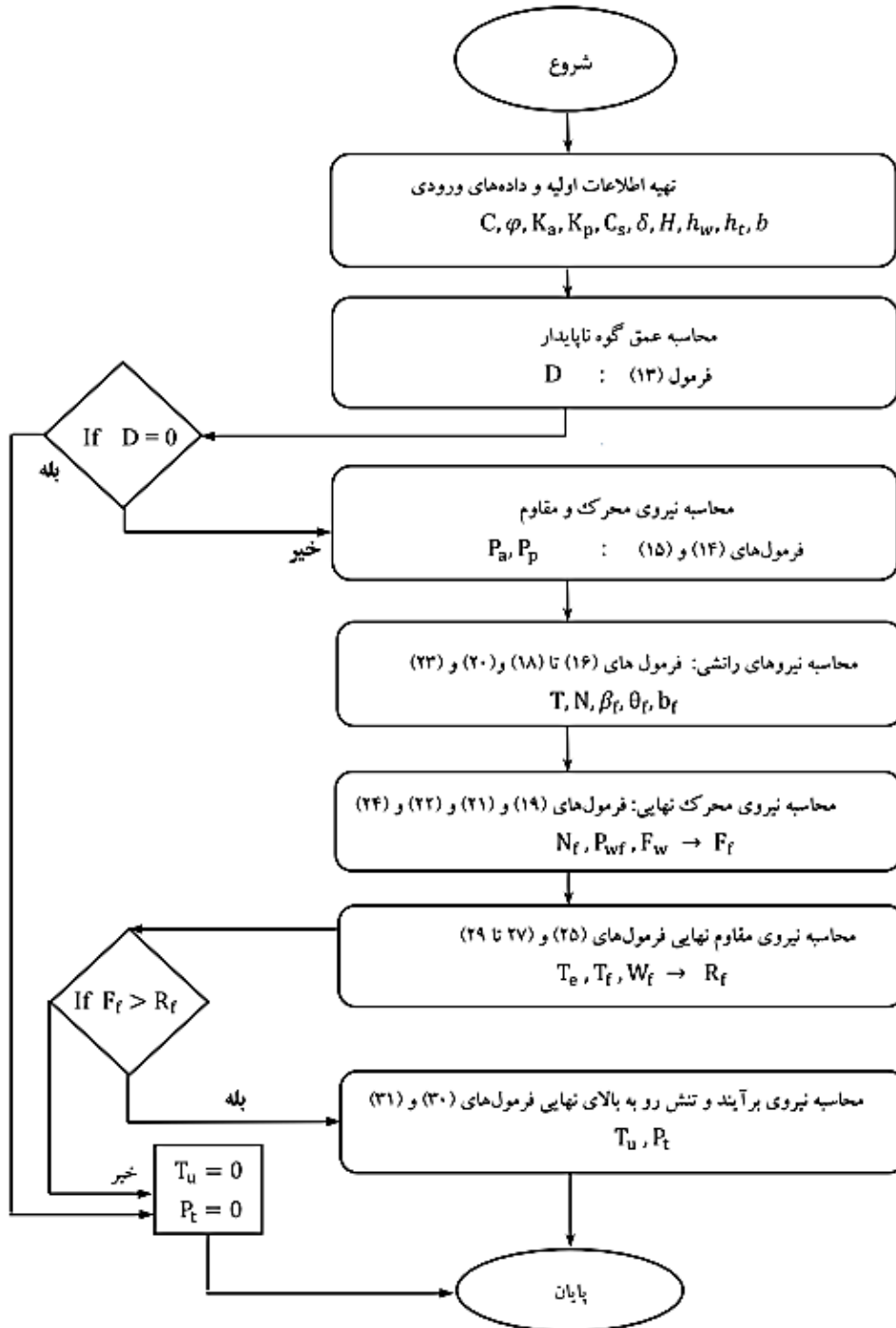
شکل ۶- توزیع بار ناشی از فشار آب بر سطح گوه

که در این روابط:
 T_u نیروی برآیند رو به بالا (کیلونیوتن)
 P_t فشار یا تنش رو به بالا در کف تونل به ازای هر یک متر از طول تونل (کیلونیوتن/متر)
 سلسله محاسبات ارائه شده در بالا در قالب یک الگوریتم در شکل ۸ آورده شده است.

تراورس و بالاست) می‌توان وزن کل آن‌ها را به صورت یک بار گسترده اعمال کرد و نیروی برآیند نهایی رو به بالا و یا تنش رو به بالا از روابط ۳۰ و ۳۱ محاسبه می‌شود.

$$T_u = F_f - R_f \quad (30)$$

$$P_t = \frac{T_u}{b} \quad (31)$$



شکل ۸- الگوریتم محاسبه نیروی رو به بالا بر اساس مدل پیشنهادی

۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک تحلیل ریاضی برای تخمین فشار رو به بالای کف تونل‌ها (فشار آماس کف تونل) در محیط خاکی و یا توده سنگ ضعیف انجام شد. دستاورد این پژوهش مجموعه‌ای از روابط است که بر پایه اصول تعادل حدی مکانیک خاک و معیار گسیختگی موهر-کولمب و در نظر گرفتن پدیده تمرکز تنش و همچنین فشار آب منفذی به دست آمده‌اند. بر اساس روابط پیشنهاد شده تاثیر عمق تونل در برآورد فشار آماس کف بسیار محسوس است.

به کمک روابط پیشنهاد شده علاوه بر تعیین وجود و یا نبود گوه ناپایدار در کف تونل می‌توان عمق آن را در شرایط زهکشی شده و زهکشی نشده تعیین کرد، سپس متناسب با هر یک از شرایط یاد شده مقدار فشار آماس کف را محاسبه کرده و در نهایت بر مبنای آن اقدام به طراحی و انتخاب سیستم سازه‌ای مناسب کف‌بند تونل کرد.

منابع

- lining of underground openings in swelling rock applying the finite element method", Institute for Foundation Engineering, Soil Mechanics, Rock Mechanics and Waterways Construction, RWTH (University), Aachen, 2, pp. 7-46 (1976).
- Anagnostou, G., "Importance of unsaturated flow in predicting the deformations around tunnels in swelling rock, Porous and Fractured Unsaturated Media, Transports and Behavior, Scientific Colloquium", Monte Verita, pp. 343-359 (1992).
- Wittke-Gattermann, P., Wittke, M., "Computation of Strains and Pressures for Tunnels in Swelling Rocks" Tunnelling and Underground Space Technology, 19, pp. 422-423 (2004).
- Wittke, W., Wittke, M., "Design, construction and supervision of tunnels in swelling rock" ITA-AITES World Tunnel Congress and 31th General Assembly, Istanbul, pp. 1173-1178 (2005).
- Mashimo, H., "Analytical investigation of damaged tunnel linings by the action of excessive earth pressure", ITA-AITES World Tunnel Congress and 33th General Assembly, Prague, pp. 1931-1936 (2007).
- Butscher, C., Huggenberger, P., Zechner, E., Einstein, H.H., "Relation between hydrogeological setting and swelling potential of clay-sulfate rocks in tunneling" Engineering Geology, 122, pp. 204-214 (2011).
- Steiner, W., Kaiser, P.K., Spaun, G., "Role of brittle fracture on swelling behaviour: evidence from tunnelling case histories", Geomechanics and Tunnelling, 4(2), pp. 17-32 (2011).
- Kim, K.J., Koh, S.Y., Choo, S.Y., Hong, C.S., Hwang, D.J., "A study of the invert tunnel's behavior in a weathered-rock using laboratory model test and numerical analysis" ITA-AITES World Tunnel Congress and 33th General Assembly, Prague, pp. 501-506 (2007).
- Seki, S., Kaise, S., Morisaki, Y., Azetaka, S., Jiang, Y., "Model experiments for examining heaving phenomenon in tunnels", Tunnelling and Underground Space Technology, 23, pp.128-138 (2008).
- Shimamoto, K., Yashiro, K., Kojima, Y., Nakanishi, Y., Tsukada, K., Asakura, T.,
- Huder J., Amberg, G., "Quellung im Mergel, Opalinuston und Anhydrit, Schweiz. Bauzeitung", 43, pp. 975-980 (1970).
- Gysel, M., "A contribution to the design of a tunnel lining in swelling rock", Rock Mechanics, 10(1), pp. 55-71 (1977).
- Serón, J., Garrido, E., Romana, M., "Characterization of swelling rocks by huder-amberg oedometric test", Paramètres de calcul géotechnique, Magnan (ed.), Presses de l'ENPC/LCPC, Paris, pp. 161-166 (2002).
- Kovari K., Amstad I., Anagnostou G., "Design construction methods-Tunneling in swelling rocks", Key Questions in Road Mechanics. U.S. Rock Mechanics Symposium. Balkema, pp. 17-32 (1988).
- Kitzler, C., Walter, H., "Geotechnical measurements in swelling rock – instrumentation of exploratory headings, results, conclusions. 2nd Colloquium "Rock Mechanics – Theory and Practice", pp. 117-128 (2004).
- Berdugo, I.R., Pérez, E.A., Morales, E.R., Solé, A.G. "Tunneling and Swelling in Triassic Sulphate-Bearing Rocks", Part I - Case studies from Baden-Württemberg. Revista Épsilon, enero-junio de, 12, pp. 13-37 (2009).
- Wittke, W. & Ribler, P., "Dimensioning of the

23. Mothersille, D., Littlejohn, S., "Grouting of Anchors to Resist Hydrostatic Uplift at Burnley Tunnel", Melbourne, Australia. 4th International Conference on Grouting and Deep Mixing, pp. 1-10 (2012).
24. Kovári, K., "Design Methods with Yielding Support in Squeezing and Swelling Rocks", ITA-AITES World Tunnel Congress and 35th General Assembly, Budapest, pp. 1-13 (2009).
25. Tsimbaryeritch, P.M., "Voprosi davleniya gornyx porod", (i.e. Questions of rock pressures), Moscow (1952).
26. Ramamurthy, T., "Engineering in rocks for slopes, foundations and tunnels", Prentice-Hall of India (2007).
27. Goodman, R.E., "Rock Mechanics", Second Edition, John Wiley & Sons (1989).
28. Bray, J.W., "A study of jointed and fractured rock II, Theory of limiting equilibrium", Felsmechanik & Ingenieurgeologie (Rock Mechanics and Engineering Geology), 5, pp. 197-216 (1967).
29. Bowles, J.E., "Foundation analysis and design", Fifth Edition, McGraw-Hill (1997).
30. Hoek, E. & Brown, E.T., "Underground excavations in rock", IMM (1980).
31. AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), (2002). "Standard Specifications for Highway Bridges", 17th Edition.
17. Rauh, F., Thuro, K., "Investigations on the swelling behavior of pure anhydrites", Proceedings of the 1st Canada-US Rock Mechanics Symposium, Vancouver, Canada, pp. 27-31 (2007).
18. Lee, C.H., Wang, T.T., Sun, L.J., Huang, T.H., "Invert heaving in operational tunnels-problems and countermeasures", World Tunnel Congress, Geneva, Taylor & Francis Group, pp. 770-777 (2013).
19. Iwai, T., "Earthquake disaster and restoration of mountain tunnels in Japan" Tunnel Engineering Geology Treatment Technology, pp. 173-205 (2000).
20. Amberg, W., Russo, M., "Seismic Design of Underground Structures the Bolu Tunnel" ITA-AITES World Tunnel Congress and 27th General Assembly, Milan, pp. 137-145 (2001).
21. Asakura, T., Tsukada, K., Matsunaga, T., Matsuoka, S., Yashiro, K., Shiba, Y., Oya, T., "Damage to Mountain Tunnels by Earthquake and its Mechanism", The EIT-JAPAN-AIT Joint Workshop "Geo-Risk Engineering & Management" (2005).
22. Li, G.Y., "The karst area tunnel invert cracking remediation", Railway Standard Design, pp. 68-71 (2007).