

بررسی ملاحظات طراحی سیستم قوس چتری با استفاده از داده‌های ابزاربندی و شبیه‌سازی

عددی

رضا مهبیاری^۱، سعید مهدوی^{۲*}

پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

چکیده

یکی از چالش‌های اصلی حفاری تونل در مناطق شهری کنترل نشست است که می‌تواند سازه‌های سطحی و زیرزمینی را تحت تاثیر قرار دهد. امروزه اجرای سیستم قوس چتری به عنوان یک راه‌حل موثر برای کنترل نشست و حفاری تونل در شرایطی که جبهه‌کار ناپایدار است، پذیرفته شده است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های حاصل از ابزاربندی تونل بیرگل و روش اجرای فورپولینگ در تونل مذکور، مدل عددی کالیبره شده و سه سناریوی تیر طره، تغییر شکل مجاز و زون تحکیم یافته با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفته است. سناریوی اول نشان داد که در صورت بررسی نیروهای داخلی المان شمع، فاکتور پایداری یک باید به عنوان ملاک طراحی قرار گیرد. در سناریوی دوم از سطح ۳ هشدار ساکورایی به عنوان معیار طراحی استفاده شود و در سناریوی سوم روابطی برای محاسبه هندسه و پارامترهای ژئومکانیکی زون تقویت شده با استنباط از سناریوی دوم ارائه شده است. نتایج تحلیل نشان داد که می‌توان از تغییرات زاویه اصطکاک داخلی در زون تقویت شده چشم‌پوشی کرد و صرفاً مقدار مدول تغییرشکل و چسبندگی را مطابق با روابط پیشنهاد شده افزایش داد.

کلید واژه‌ها: فورپولینگ، نشست، شبیه‌سازی عددی، تونل بیرگل.

^۱دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، rezamahyari92@gmail.com

^۲دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، smahdevari@iut.ac.ir

* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

با توجه به رشد جمعیت در مناطق شهری، توسعه خطوط مترو به طور پیوسته امری اجتناب ناپذیر است. با توجه به سازه‌های سطحی موجود اجرای پروژه‌های زیرزمینی جدید با محدودیت‌هایی همچون نشست زمین روبرو است. در مناطق شهری، زمین معمولاً از رسوبات آبرفتی یا سنگ‌های به شدت هوازده تشکیل شده که در هر دو حالت با جابه‌جایی‌های بالا حین حفاری تونل مواجه می‌شویم. لذا یکی از فاکتورهای اساسی که طراحی تونل در مناطق شهری را کنترل می‌کند، میزان نشست زمین است. اجرای قوس چتری (فورپولینگ) به عنوان یک راه‌حل برای کنترل نشست پذیرفته شده است (Tunçdemir et al., 2012; Li and Niu, 2012; Morovatdar et al., 2020).

از روش قوس چتری نخستین بار در اوایل دهه شصت میلادی در بلژیک جهت احداث ایستگاه مترو انت‌ورپ (Antwerp) استفاده شد. سپس این روش بصورت گسترده‌ای در آمریکا جهت ساخت تونل‌های با قطر کوچک و در ژاپن جهت احداث ایستگاه‌های مترو به کار گرفته شد (Aksoy and Onargan, 2010). این روش به منظور پایدارسازی جبهه‌کار، پایدارسازی پرتال تونل و یا کاهش نشست استفاده می‌شود. قابلیت این روش در کاهش نشست در مقایسه با دیگر روش‌ها از جمله NATM منجر به توسعه استفاده از این روش در مناطق شهری شده است.

این سیستم از طریق ایجاد یک قوس پایدار محلی بین پایل‌ها که در نهایت منجر به ایجاد یک قوس پایدار پیرامون سیستم چتری فورپولینگ می‌شود منجر به بازتوزیع تنش و پایداری تونل می‌شود. همچنین پایلهای نصب شده در محل خود باعث تحکیم خاک می‌شوند به ویژه در شرایطی که از پایل‌های منبسط شونده استفاده شود.

مطالعات انجام شده در این زمینه را می‌توان در سه دسته کلی قرار داد. دسته اول مطالعات میزان نشست در این شیوه را مورد بررسی قرار می‌دهند (Peila, 1994; Muraki, 1997; Yoo and Shin, 2003; Lee et al., 2004; Volkmann, 2004; Volkmann and Schubert, 2007; Hisatake and Ohno,

2008; S.Ockac, 2008; Jong et al., 2008; Volkmann and Schubert, 2010). میزان نشست با استفاده از شبیه‌سازی عددی، آزمون‌های آزمایشگاهی و اندازه‌گیری‌های برجا ارزیابی شده است و در تمام مطالعات انجام شده به کاهش قابل توجه نشست در صورت استفاده از سیستم قوس چتری اشاره شده است.

دسته دوم مطالعات بر روی پارامترهای عملیاتی این سیستم متمرکز شده است. کیم و شیماکر (Schumacher and Kim, 2013) با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی عددی نشان دادند، فاصله‌داری پایل‌ها و قطر آنها تاثیر بسزایی در ممان اینرسی سیستم قوس چتری دارند. پاک و همکارانش (Park et al., 2012) اثر تحکیمی المان‌های پایل منبسط شونده را در پایدارسازی تونل مورد بررسی قرار دادند. زانگ و همکارانش (Zhang et al., 2014) حداقل هم‌پوشانی المان‌های پایل را سه متر پیشنهاد می‌کنند و برای بررسی پایداری سیستم قوس چتری از گشتاور ایجاد شده در المان‌های پایل، استفاده می‌کنند.

دسته سوم مطالعات به بررسی مکانیسم عملکرد قوس چتری می‌پردازد. جانگ و همکاران (Jong et al., 2008) بیان کردند پایل‌های نصب شده در این سیستم، به صورت تیر مدفون عمل کرده و از طریق انتقال بار به صورت طولی به منطقه حفاری نشده سبب کاهش تغییرشکل و در نتیجه بهبود شرایط پایداری جبهه حفاری می‌شود. گراسو و همکاران (Grasso et al., 1993) استفاده از مفهوم چسبندگی معادل را برای شبیه‌سازی زون مسلح شده توسط المان‌های قوس چتری پیشنهاد کردند. پیلا (Peila, 1994) اشاره کرد بررسی مکانیسم عملکرد المان‌های پایل فقط از طریق مدل‌های سه بعدی امکان‌پذیر است.

اوکه و همکارانش (Oke et al., 2016) با بررسی ۱۱۴ مورد از تونل‌هایی که در آن از سیستم قوس چتری استفاده شده، یک روش برای انتخاب نوع سیستم نگهداری قوس چتری بر اساس شرایط زمین‌شناسی، آب زیرزمینی، تنش محصور، همگرایی تونل و سختی مورد نیاز نگهداری ارائه کردند ولی به جزئیات طراحی آن اشاره نکرده‌اند.

جایگزین زون تحکیم شده توسط فورپولینگ بررسی، مشخصات هندسی و میزان تقویت پارامترهای ژئومکانیکی این زون را پیشنهاد می‌کند.

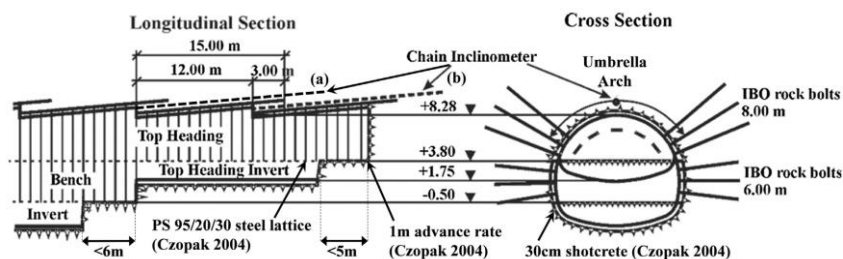
۲. زمین‌شناسی

در این پژوهش تونل راه‌آهن بیرگل به سبب نصب ابزار رفتارنگاری و همچنین وجود سیستم قوس چتری به‌عنوان مرجع کالیبراسیون برای مدل عددی مورد توجه قرار گرفت. تونل راه‌آهن دوخطه بیرگل به طول ۹۵۰ متر در سالزبورگ اتریش با سطح مقطع ۱۳۰ مترمربع و در ۶ مرحله به روش NATM حفاری شده است. روباره تونل در این محدوده بین ۳۰ تا ۵۰ متر متغیر است. ورودی غربی تونل به طول ۸۰ متر در منطقه گسله با توده سنگ متشکل از سنگ کلسیتی حاوی رس در لنز برشی قرار گرفته است. بر اساس مطالعات ژئومکانیکی تونل مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ گسله میزبان تونل کمتر از ۱ مگاپاسگال برآورد شده است (Oke et al., 2016).

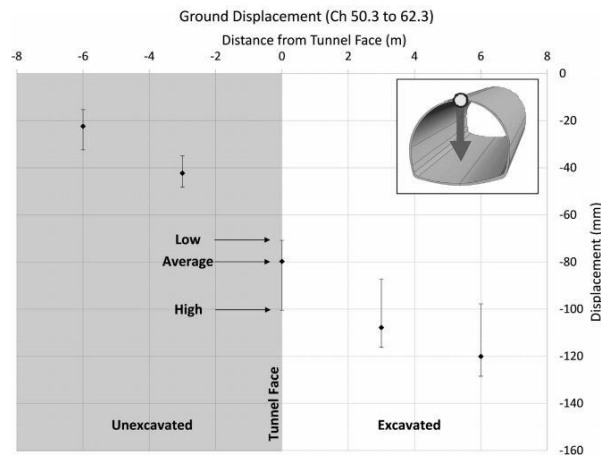
به منظور عبور از بخش گسله با حداقل جابه‌جایی ممکن، از حفاری مرحله‌ای با گام پیشروی یک متر استفاده شده است و قبل از حفر تونل با استفاده از سیستم قوس چتری، در اطراف فضای حفاری تونل عملیات پیش‌تحکیمی انجام شده است. همچنین برای کنترل جابه‌جایی جبهه‌کار و دیواره تونل، در جبهه‌کار تونل از میل مهار و در دیواره‌ها از ترکیب میل مهار و لئیس (Lattice) استفاده شده است. نحوه حفاری و مشخصات سیستم نگهداری در شکل ۱ نمایش داده شده است. به منظور مطالعه بر روی سازه‌ی سیستم قوس چتری، ۴۴ متر از این منطقه گسله به ابزار دقیق مجهز شده است. پروفیل نشست زمین در راستای تونل در فاصله ۶ متر از جبهه کار تونل در شکل ۲ نمایش داده شده است (Oke et al., 2016).

از روش‌های تحلیلی طراحی سیستم قوس چتری می‌توان به دو روش تیر ساده (Oreste and Peila, 1998; Harazaki et al., 1998; John and Mattle, 2002; Peila and Pelizza, 2003; Wang and Harazaki, 2008) و تیر بر روی فونداسیون الاستیک اشاره کرد (Jia, 2008) و تیر بر روی فونداسیون الاستیک اشاره کرد (et al., 1998; Yuan et al., 2013; Song et al., 2013) استفاده از فرض تقارن محوری، لحاظ نکردن الگوی نصب فورپولینگ، روش اجرا و فرضیات ساده‌کننده در ارتباط با اندرکنش المان پایل و زمین از نقاط ضعف روش‌های تحلیلی است. با توجه به دانش محدودی که در ارتباط با طراحی فورپولینگ یا سیستم نگهداری قوس چتری وجود دارد، طراحی و اجرای این سیستم بر اساس دانش تجربی حاصل شده از پروژه‌های مشابه انجام می‌شود و تاکنون روش جامعی برای طراحی این سیستم ارائه نشده است. غالب مطالعات موجود نیز صرفاً بر روی نشست در این شیوه متمرکز شده‌اند و مطالعات اندکی شیوه طراحی سیستم نگهداری قوس چتری را مورد توجه قرار داده‌اند. لذا در این پژوهش، به منظور تحلیل و طراحی سیستم قوس چتری ابتدا با رفتارنگاری ابزارهای نصب‌شده در تونل بیرگل اتریش و انجام تحلیل برگشتی پارامترهای ژئومکانیکی ساختگاه تونل ارزیابی شده است. سپس با توجه به داده‌های ابزاربندی تونل، هندسه و روش اجرای آن، سه فرضیه جهت طراحی سیستم قوس چتری در تونل مذکور با استفاده از شبیه‌سازی عددی مورد بررسی و راستی‌آزمایی قرار گرفته است.

در فرضیه اول سیستم قوس چتری به صورت یک تیر یک‌سرگیردار لحاظ شده و عملکرد آن با توجه به نیروهای داخلی ایجاد شده در المان، مورد بررسی قرار گرفته است. فرضیه دوم بر اساس تغییرشکل مجاز و کرنش بحرانی پیرامون فضای حفاری استوار است. فرضیه سوم استفاده از یک زون تقویت شده پیرامون تونل را به عنوان



شکل ۱. شیوه حفاری، سیستم نگهداری و خصوصیات هندسی آن در تونل بیرگل (Oke et al., 2016)



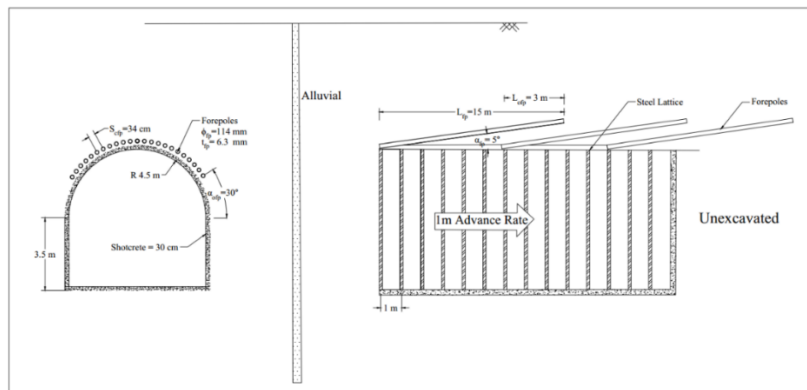
شکل ۲. پروفیل نشست تونل در بر اساس اطلاعات ابزار دقیق (Oke et al., 2016)

چشم‌پوشی باشد (کمتر از ۳ درصد). با توجه به تمرکز المان‌های پایل پیرامون تونل و هندسه نصب آنها، ابعاد مش‌ها پیرامون تونل ۱۰ سانتی‌متر منظور شده است. مدل رفتاری استفاده شده در شبیه‌سازی عددی قبل از حفاری تونل و ایجاد شرایط تنش‌های برجا الاستیک و بعد از حفاری تونل موهر-کلمب لحاظ شده است. به دلیل اطلاعاتی از مقدار زاویه اتساع خاک میزبان تونل در اختیار نبود، در شبیه‌سازی عددی مقدار آن برابر با صفر لحاظ شده است. بعد از تعادل اولیه و شکل‌گیری تنش‌های برجا، تمام جابه‌جایی و سرعت‌های گره‌ای صفر شده و زمین در شرایط سکون شبیه‌سازی شده است.

با توجه به الگوی فورپولینگ در تونل بیرگل و روش اجرای آن، بعد از شکل‌گیری تنش‌های برجا، المان‌های پایل سیستم قوس چتری و لتیس نصب شده و حفاری تونل انجام می‌شود. لذا به این منظور ابتدا یک سری المان پایل به طول ۱۵ متر با زاویه ۵ درجه نسبت به افق در قوس ۱۲۰ درجه در تاج تونل

۳. شبیه‌سازی عددی تونل بیرگل

شبیه‌سازی عددی تونل با استفاده از روش تفاضل محدود و نرم‌افزار FLAC3D انجام شده است. جانمایی مرزها و شرایط مرزی مدل عددی یکی از مواردی است که در ارتباط با آن باید تصمیم‌گیری انجام شود. در این پژوهش از مرزهای جابه‌جایی استفاده و مرزها بر اساس تحلیل حساسیت به گونه‌ای جانمایی شده‌اند که پروفیل جابه‌جایی و نشست مستقل از جانمایی مرزها باشند. برای این منظور ابعاد مدل عددی به تدریج افزایش داده شده و پروفیل نشست و جابه‌جایی بعد از حفاری تونل رصد شده است و در نهایت کوچکترین ابعاد مدل که پروفیل جابه‌جایی و نشست بعد از حفاری تونل را تحت تاثیر قرار نمی‌دهند، انتخاب شده است. روش تفاضل محدود به ابعاد مش‌های انتخاب شده حساس است. با کاهش ابعاد مش‌ها میزان جابه‌جایی افزایش و به مقدار مورد انتظار نزدیکتر می‌شود. لذا ابعاد مش‌ها نیز بر اساس تحلیل حساسیت به گونه‌ای تعیین شده که تاثیر کاهش ابعاد مش بر جابه‌جایی پیرامون تونل قابل



شکل ۳. جانمایی و الگوی پیشنهادی سیستم قوس چتری در تونل بیرگل

اطراف المان پایل می‌توان مقدار سختی نرمال فنر را بر اساس رابطه ۱ محاسبه کرد (Flac user guide, 2011).

$$K_n = \frac{2 \pi G}{10 \ln(1 + \frac{2t}{D})} \quad (1)$$

که در آن G مدول برشی خاک پیرامون المان پایل، t ضخامت لوله فولادی و D قطر لوله فولادی است.

در رابطه با پارامتر چسبندگی نرمال می‌توان بحرانی‌ترین شرایط ممکن را در نظر گرفت که شکست بین پایل و زمین صورت گیرد و تزریق در داخل خاک اطراف پایل نفوذ نکرده باشد بنابراین برای ارزیابی چسبندگی المان پایل، چسبندگی خاک ملاک قرار می‌گیرد. زاویه اصطکاک برشی و زاویه اصطکاک نرمال المان پایل هم با توجه به خصوصیات مواد احاطه کننده آن المان محاسبه شده است. پارامترهای مکانیکی لحاظ شده برای المان پایل در جدول ۲ نمایش داده شده است.

نصب شده است. میزان همپوشانی المانهای پایل سه متر منظور شده است (شکل ۳). سپس حفاری مرحله‌ای و با گام‌های یک متری انجام شده است. بدین صورت که بعد از حفر هر گام یک لیس نصب می‌شود. لیس‌ها به دلیل اعمال فشار محصورکننده یکنواخت به جداره تونل و قابلیت تحمل تغییر شکل‌های زیاد قبل از گسیختگی یکی از اجزای اصلی در طراحی سیستم قوس چتری هستند. همچنین از لحاظ اقتصادی بر سیستم قوس چتری با توجه به سهولت اجرای آن نسبت به المان پایل به دلیل عدم نیاز به حفاری و امکان استفاده از پایل‌های سبک‌تر با توجه به تکیه‌گاه غلتکی ایجاد شده توسط لیس، برتری دارد. در این پژوهش از المان تیر برای شبیه‌سازی لیس در فواصل یک متری استفاده شده است. مشخصات هندسی لیس در جدول ۱ نمایش داده شده است. با توجه به وجود دوغاب، در

جدول ۱. مشخصات هندسی لیس نصب شده در تونل بیرگل (Oke et al., 2016)

| | H_1 (mm) | S_1 (mm) | S_2 (mm) | S_3 (mm) | H (mm) |
|--|---------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|
| | 95 | 10 | 30 | 20 | 145 |
| | B (mm) | A (cm^2) | W_x (cm^3) | I_x (mm^4) | Weight (Kg/m) |
| | 180 | 13.35 | 66 | 485 | 12.5 |

جدول ۲. پارامترهای اندرکنش پایل و محیط اطراف

| Parameter | Normal stiffness | Normal friction angle | Normal cohesion | Shear stiffness | Shear friction angle | Shear cohesion |
|-----------|------------------|-----------------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------|
| Symbole | K_n | φ_n | C_n | K_s | φ_s | C_s |
| Unit | (MPa) | (°) | (N/m) | (MPa) | (°) | (N/m) |
| Value | 45 | 20 | 1.33E4 | 450 | 20 | 1.33E4 |

که در آن: u_i جابه‌جایی قرائت شده توسط ابزار در نقطه شاهد i و u'_i جابه‌جایی محاسبه شده با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نقطه متناظر است.

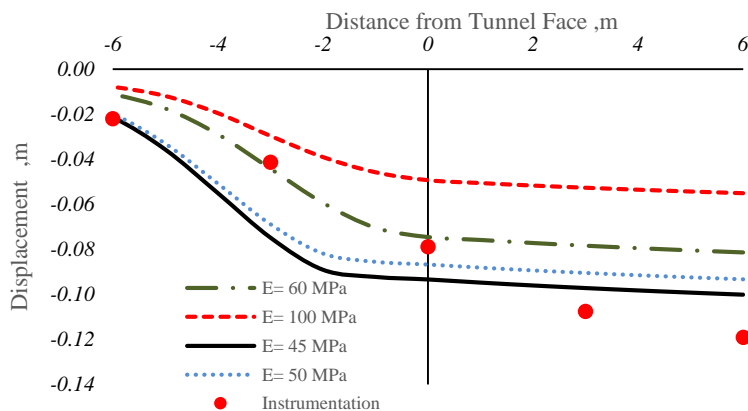
به منظور ارزیابی پارامترهای ژئومکانیکی تونل مذکور بر اساس تحلیل برگشتی دامنه تغییرات چسبندگی ۱۵-۶۰ کیلوپاسگال، زاویه اصطکاک داخلی ۱۵ تا ۲۵ درجه و مدول تغییرشکل پذیری ۴۵ تا ۱۰۰ مگاپاسگال لحاظ شده است. دامنه تغییرات پارامترهای ذکر شده با توجه به پارامترهای ژئومکانیکی ارائه شده برای تونل بیرگل لحاظ شده است (Oke et al., 2016). پروفیل نشست زمین بر اساس داده‌های حاصل از ابزارهای نصب شده به همراه پروفیل نشست حاصل از شبیه‌سازی عددی در راستای محور تونل در شرایطی که مدول تغییرشکل از ۴۵ تا ۱۰۰ مگاپاسگال تغییر می‌کند، در شکل ۴ نمایش داده شده است.

پس از هر مرحله از حفر، لیس و شاتکریت با توجه به اندرکنش با زمین نصب شده و سازه سیستم قوس چتری نیز با توجه به الگو پیشنهادی در قسمت تاج تونل در فواصل معین نصب شده است.

۴. تحلیل برگشتی

به دلیل عدم قطعیتی که در پارامترهای ژئومکانیکی ارائه شده برای تونل بیرگل وجود دارد، با استفاده از تحلیل برگشتی و جابه‌جایی‌های ثابت شده توسط ابزار پارامترهای ژئومکانیکی تونل تدقیق شده است. اگر فرض کنیم u جابه‌جایی قرائت شده توسط ابزار دقیق برای N نقطه شاهد و u' جابه‌جایی محاسبه شده توسط مدل‌سازی عددی در نقاط متناظر باشد، در این صورت تابع خطا مطابق با روش حداقل مربعات به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود.

$$f = \sum_{i=1}^N (u_i - u'_i)^2 \quad (2)$$

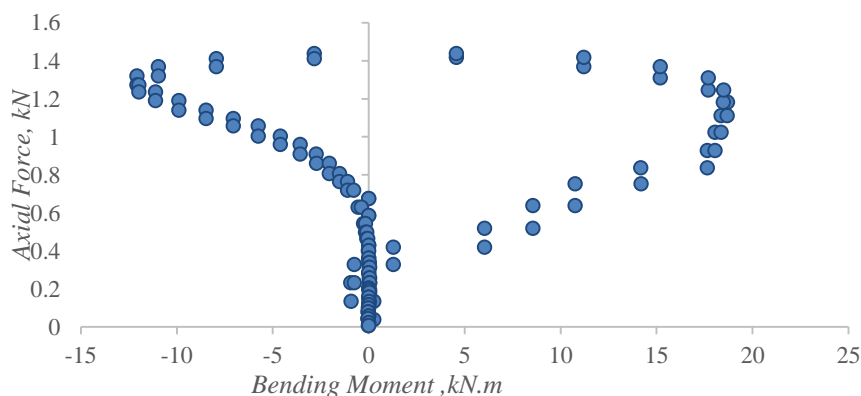


شکل ۴. پروفیل نشست در راستای محور تونل حاصل از نتایج ابزاربندی همراه با پروفیل نشست حاصل از شبیه‌سازی عددی در شرایطی که مدول تغییرشکل از ۴۵ تا ۱۰۰ مگاپاسگال تغییر می‌کند.

سیستم قوس چتری، مقدار مدول تغییر شکل پذیری ۴۵ مگاپاسگال، چسبندگی ۳۷ کیلوپاسگال و زاویه اصطکاک

بر اساس نتایج حاصل از تحلیل برگشتی و تابع خطای تعریف شده مطابق رابطه ۲، به منظور ارزیابی سناریوهای طراحی

روباره، این زون مشارکتی در باربری نداشته و کل بار به المان پایل منتقل می‌شود. هندسه نصب المان پایل و پایین بودن سطح نیروهای محوری در این المان که از شبیه‌سازی عددی نتیجه شده و در شکل ۵ نمایش داده شده است، فرض عملکرد المان پایل را به صورت تیر تایید می‌کند. ظرفیت باربری محوری المان پایل با فرض ضریب ایمنی ۱ حدود ۸۰۰ کیلونیوتن است که با توجه به بیشینه نیروی محوری نمایش داده شده در شکل ۵ که حدود ۱/۴ کیلونیوتن است، سطح نیروهای محوری المان پایل حدود ۰/۱ درصد ظرفیت باربری محوری المان است. در شکل ۶ میزان جابه‌جایی المان پایل و زمین پیرامون در راستای قائم نمایش داده شده است. میزان جابه‌جایی المان پایل از حدود ۴۰ میلی‌متر در قسمت حفاری شده تا ۰/۳ میلی‌متر در قسمت مدفون تغییر می‌کند، لذا جابه‌جایی بسیار محدود المان در قسمت مدفون، یک سر گیردار بودن تیر مفروض را تایید می‌کند. شرایط تکیه‌گاهی تیر مفروض در شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۵. مقادیر لنگر خمشی-نیروی محوری در المان پایل

خود رسیده است. با توجه به پیچیدگی های ذاتی مسئله و مسائل مربوط به اندرکنش المان پایل و زمین پیرامون امکان استفاده از روش حل تحلیلی وجود ندارد. لذا تحلیل پایداری تیر یک سر گیردار بر اساس نتایج شبیه‌سازی عددی انجام شده است. در این روش می‌توان هندسه المان‌های سیستم قوس چتری مانند طول همپوشانی، زاویه نصب، فاصله و قطر لوله‌ها

داخلی ۲۰ درجه لحاظ شده است. در مقادیر ذکر شده تابع خطا کمینه است.

۵. بحث و بررسی

به منظور تحلیل و طراحی سیستم قوس چتری سه سناریو مورد بررسی قرار گرفته است. سناریوی اول هر المان پایل را به صورت یک تیر یک سر گیردار لحاظ می‌کند و پایداری آن را با توجه به نیروهای داخلی محاسبه شده توسط نرم‌افزار و خواص مکانیکی تیر مفروض مورد بررسی قرار می‌دهد. سناریوی دوم بر اساس کرنش بحرانی پایه‌گذاری شده و در سناریوی سوم زون تحکیم یافته شده توسط فورپولینگ، با یک زون معادل جایگزین می‌شود.

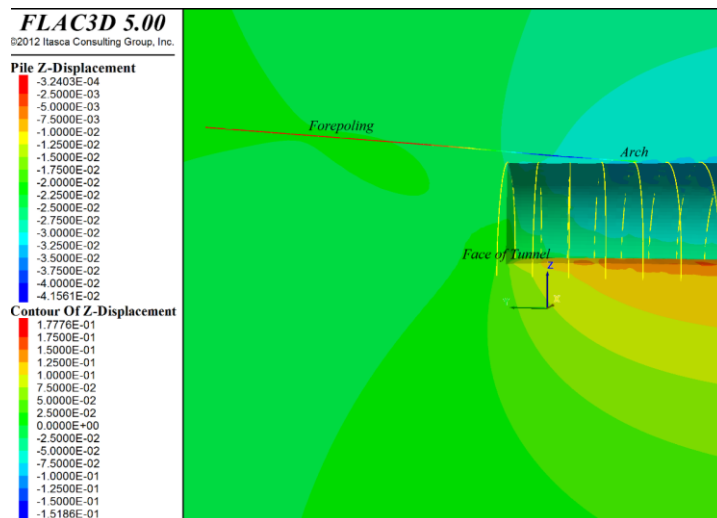
۱.۵. تیر یک سر گیردار

در این سناریو هر المان پایل به صورت یک تیر طره فرض شده است. با توجه به تفاوت سختی زیاد میان المان پایل و زون خاکی تحت تاثیر هر المان پایل، تحت تاثیر بارگسترده ناشی از

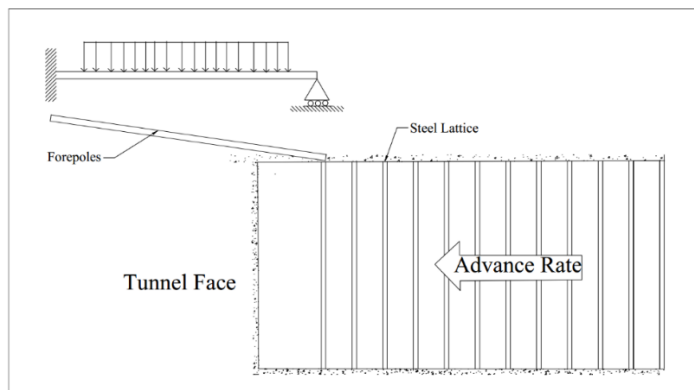
با توجه به شکل ۶، بیشینه میزان بالآمدگی در کف حدود ۱۷ سانتی‌متر و بیشینه جابه‌جایی تاج حدود ۱۵ سانتی‌متر است. علت کمتر بودن جابه‌جایی تاج، نسبت به بالآمدگی کف، هندسه‌ی قوسی تاج است. زمین میان دو لتیس نیز به صورت یک تیر دو سر مفصل که تحت تاثیر یک بار گسترده است، عمل کرده و میزان جابه‌جایی تاج، بین دو لتیس به بیشینه مقدار

زون تحت تاثیر المان پایل برای رسیدن به نتایج قابل قبول کاهش داد.

و مراحل حفاری را لحاظ کرد. به علت حساسیت نیروهای داخلی المان به سختی نرمال و برشی، بایستی ابعاد مش را در



شکل ۶. تغییرات جابه‌جایی زمین و المان سیستم قوس چتری در راستای Z



شکل ۷. لحاظ کردن سیستم قوس چتری به صورت تیر یک سر گیردار

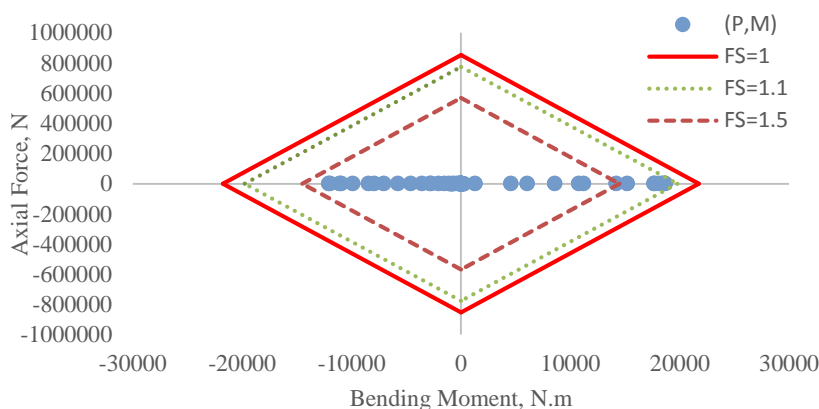
آن تحلیل پایداری انجام شود مقدار یک است. لذا در این تحلیل پایداری سیستم قوس چتری براساس سناریوی اول باید به این صورت عمل کرد.

۱. ایجاد سیستم قوس چتری با استفاده از المان پایل مطابق با هندسه موجود

۲. تنظیم سختی نرمال و برشی المان پایل به منظور حذف یا حداقل کردن نیروی محوری پایل

۳. بررسی میزان لنگر ایجاد شده در المان پایل و مقایسه آن با ظرفیت باربری المان با فرض فاکتور پایداری یک

براساس نمودار لنگر خمشی-نیروی محوری (شکل ۸) کاملاً مشخص است که المان سیستم قوس چتری تحت خمش قرار گرفته است و مقادیر نیروی محوری در آن بسیار ناچیز است. المان مذکور به طور کلی پایدار بوده و فاکتور پایداری آن در تمام نقاط بیش از ۱ است. در قسمت‌های انتهایی المان با افزایش جابه‌جایی مقدار پایداری کاهش پیدا کرده است. با توجه به این که این مدل بر اساس کالیبراسیون مدل تونل بیرگل اتریش حاصل شده است نشان می‌دهد اگر معیار طراحی پایداری المان پایل در نظر باشد فاکتور ایمنی که باید براساس



شکل ۸. نمودار لنگر خمشی-نیروی محوری برای تیر یک‌سر گیردار سیستم قوس چتری

کرنش بحرانی با توجه به شعاع تونل می‌توان به ترتیب جابه‌جایی مجاز و بحرانی را به دست آورد. با قرارگیری لوله فولادی در اطراف فضای حفاری تونل مقدار مدول تغییر شکل‌پذیری محیط اطراف (E_{gr}) افزایش می‌یابد. لذا باید در تخمین مقدار کرنش مجاز از مدول تغییر شکل‌پذیری معادل (E_{equ}) منطقه تسلیح شده استفاده شود (شکل ۹). مدول تغییر شکل‌پذیری معادل با توجه به روابط ۷ و ۸ ارزیابی شده است.

$$E_{equ} = \frac{(A_{rf} - A_{pile} \cdot N_{fp}) \cdot E_{gr} + A_{pile} \cdot E_{pile}}{A_{rf}} \quad (۷)$$

$$A_{rf} = \iint_{r_{tu}}^{r_{tu} + l_{fp} \cdot \sin \alpha_{fpa}} r \, dr \, d\theta \quad (۸)$$

که در آن: A_{rf} مساحت ناحیه تقویت‌شده، A_{pile} سطح مقطع پایل، N_{fp} تعداد فورپولینگ، l_{fp} طول سیستم قوس چتری و α_{fpa} زاویه همپوشانی سیستم قوس چتری در مقطع تونل است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی عددی، پروفیل جابه‌جایی تونل در تاج در راستای محور تونل در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. بر اساس جابه‌جایی‌های موجود و معیارهای پایداری بر مبنای کرنش مجاز، تمام معیارها به غیر سطح هشدار سوم ساکورایی ناپایداری این نوع آرایش سیستم قوس چتری را پیش‌بینی می‌کنند. مقادیر منفی نمایش داده شده در محور افقی که فاصله از جبهه‌کار را نمایش داده است، در قسمت حفاری نشده و مقادیر مثبت، در قسمت حفاری شده تونل قرار گرفته است. با

۲.۵. سناریو کرنش بحرانی

این سناریو بر مبنای جابه‌جایی در تاج تونل به عنوان ملموس‌ترین پارامتر قابل اندازه‌گیری و مقایسه آن با جابه‌جایی مجاز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این پژوهش مقدار جابه‌جایی تاج تونل بر اساس روابط ساکورایی مورد تحقیق قرار می‌گیرد. ساکورایی و همکارانش علاوه بر انتشار رابطه ۳ بین مقاومت فشاری تک‌محوره و کرنش بحرانی برای سنگ‌های مختلف، روابطی نیز بین مدول تغییرشکل‌پذیری سنگ‌های مختلف و کرنش مجاز ارائه دادند (Sakurai, 1983).

$$\varepsilon_{cr} = \frac{\sigma_c}{E} \quad (۳)$$

که در آن σ_c مقاومت فشاری تک‌محوره، E مدول تغییرشکل‌پذیری، ε_{cr} کرنش بحرانی است.

در روش ساکورایی برای بررسی پایداری سازه، مقدار تراز هشدار خطر تعیین می‌شود و با عامل اندازه‌گیری شده (کرنش مجاز ε_c) مقایسه می‌شود. روابط ۴ تا ۶، به ترتیب نشان‌دهنده تراز هشدار I، II و III خطر هستند (Sakurai, 1997).

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad (۴)$$

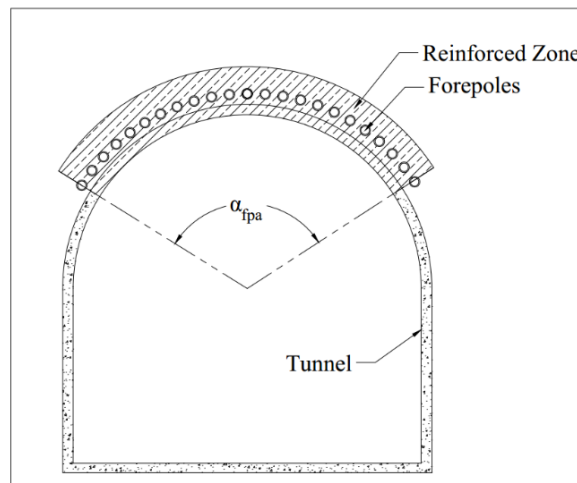
$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad (۵)$$

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad (۶)$$

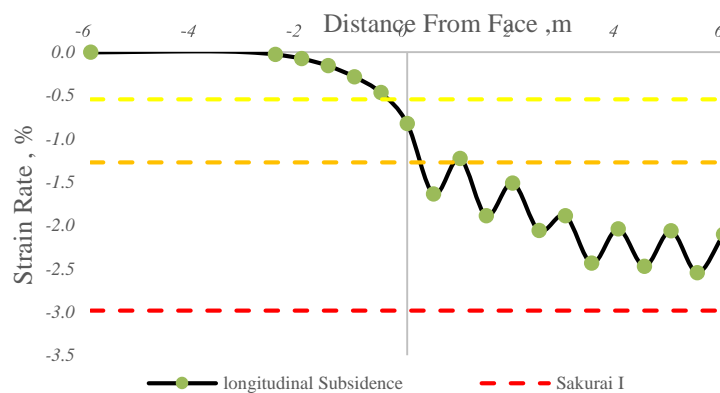
کرنش بحرانی همواره از کرنش گسیختگی کمتر است. اگر مقدار اندازه‌گیری شده از سطح هشدار خطر (کرنش بحرانی) کمتر باشد، سازه پایدار است. با داشتن مقادیر کرنش مجاز و

سینوسی کرنش میان دو لتیس، عمکرد زمین بین دو لتیس را به صورت یک تیر دو سر مفصل تایید می‌کند.

توجه به شکل ۱۰، جابه‌جایی تاج از حدود ۳ متری جبهه‌کار شروع شده و در فاصله ۴ متری از جبهه‌کار به بیشینه مقدار خود می‌رسد و بعد از آن تغییر محسوسی نمی‌کند. تغییرات



شکل ۹. مدول تغییر شکل معادل در ناحیه تسلیح شده توسط فورپولینگ



شکل ۱۰. پروفیل تغییرات کرنش در تاج تونل در راستای محور تونل

شکل‌گیری یک ناحیه تسلیح شده می‌شود؛ بنابراین می‌توان به‌جای قرارداد سیستم قوس چتری در اطراف فضای حفاری تونل پارامترهای ژئومکانیکی منطقه اطراف را تقویت کرد و به‌صورت منطقه تحکیم یافته بدون سیستم قوس چتری در نظر گرفت که منجر به ساده‌تر شدن مدل عددی می‌شود. در ارتباط با زون تقویت شده جایگزین دو سوال اساسی باید پاسخ داده شود که شامل هندسه زون و پارامترهای ژئومکانیکی آن می‌شود. ضخامت این منطقه با توجه به طول و زاویه نصب المان‌های سیستم قوس چتری نسبت به افق تعیین می‌شود. طول

در صورتیکه معیار طراحی سیستم فورپولینگ، کرنش مجاز باشد با توجه به نتایج تحلیل عددی توصیه می‌شود سطح ۳ هشدار ساکارویی به عنوان معیار طراحی انتخاب شود و مقدار مدول معادل در زون تسلیح شده با استفاده از روابط ۷ و ۸ که توسط پژوهشگران مقاله حاضر توسعه داده شده، ارزیابی شود.

۳،۵. سناریو منطقه تحکیم یافته

با قرارگیری سیستم قوس چتری در تاج و اطراف تونل یک منطقه تقویت‌شده پیرامون تونل ایجاد می‌شود و باعث

$$E_{equ} = 0.93 \sigma_c^{1.318} \rightarrow \sigma_c = 1.054 E_{equ}^{0.76} \quad (10)$$

$$\sigma_c = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \rightarrow C$$

$$= 0.527 E_{equ}^{0.76} \frac{(1 - \sin \varphi)}{\cos \varphi} \quad (11)$$

که در آن: ε_{cri} کرنش بحرانی، σ_c مقاومت فشاری تک محوره زون تسلیم شده، E_{equ} مدول تغییرشکل معادل زون تسلیم شده، φ زاویه اصطکاک داخلی و C چسبندگی معادل در زون تسلیم یا تقویت شده است.

اغلب سیستم قوس چتری در تونل‌های با سربار کم بکار گرفته می‌شود و تاثیر تغییرات زاویه اصطکاک بر پایداری تونل‌ها حفاری شده در عمق کم ناچیز است. بدین منظور، تحلیل حساسیت بر روی این پارامتر ژئومکانیکی برای مقادیر 15° ، 20° و 25° انجام شده است (شکل ۱۱). با توجه به پروفیل جابه‌جایی نمایش داده شده در شکل، کاملاً واضح است که هر سه پروفیل بر همدیگر منطبق شده‌اند و می‌توان از اثر زاویه اصطکاک داخلی صرف نظر کرد و مقدار آن را در منطقه تحکیم یافته، معادل با زاویه اصطکاک موجود در نظر گرفت. لذا زاویه اصطکاک ثابت و مقدار چسبندگی در زون تسلیم شده با استفاده از رابطه ۱۱ قابل ارزیابی است.

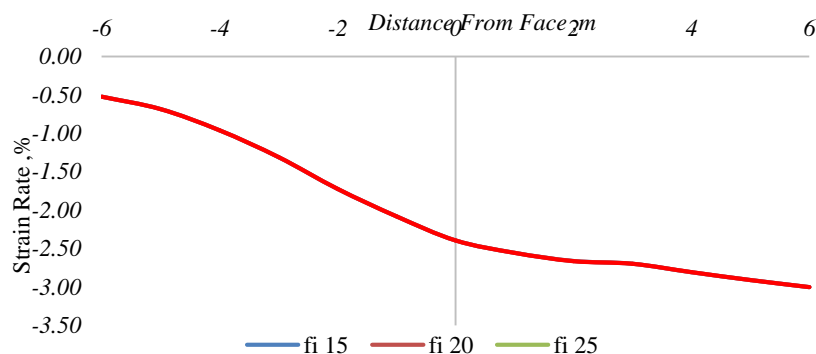
با در نظر گرفتن شرایط ژئومکانیکی موجود و مدول تغییرشکل پذیری معادل چسبندگی منطقه تحکیم یافته ۵۰۰ برابر چسبندگی اولیه در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۲ کرنش در راستای تونل در منطقه تحکیم یافته به همراه داده‌های حاصل از رفتارنگاری ابزار در تونل بیرگل نمایش داده شده است.

این منطقه در راستای تونل متناسب با طول سیستم قوس چتری آن تعیین می‌شود.

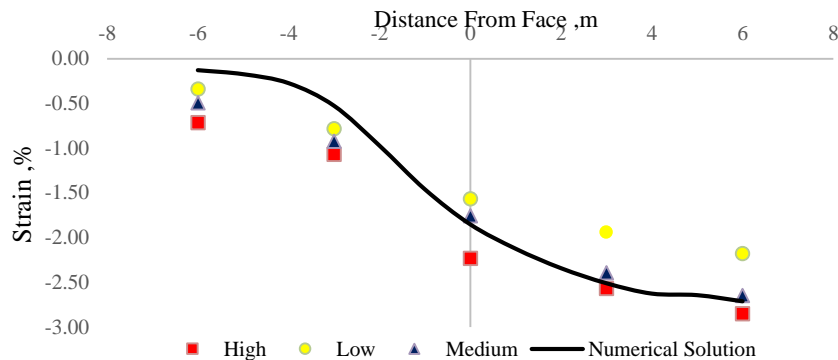
در منطقه تحکیم شده، به علت افزایش سختی و پارامترهای ژئومکانیکی ناشی از قرارگیری المان‌های فولادی سیستم قوس چتری با آرایش خاص، منجر به افزایش مقدار مدول تغییرشکل پذیری زمین اطراف تونل و کاهش مقدار جابه‌جایی شود. خصوصیات این منطقه باید به گونه انتخاب شود که بیانگر رفتار المان‌های حذف شده باشد بدین منظور مقدار مدول تغییرشکل پذیری معادل به جای مدول تغییرشکل پذیری محیط اطراف تونل در نظر گرفته می‌شود (روابط ۷ و ۸). همچنین پارامترهای مقاومتی مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی در این منطقه بایستی افزایش یابد.

پارامترهای مقاومتی زون تقویت شده را می‌توان شبیه یک محیط مخلوط سنگی در نظر گرفت، که المان‌های فورپولینگ معادل بلوک‌های سنگی است و خاک پیرامون المان‌ها نقش زمینه ضعیف را بازی می‌کند. به منظور ارزیابی مقدار افزایش چسبندگی، با استنباط از رابطه ارائه شده توسط هوک (Hoek, 1998) و ساکارویی در ارتباط با کرنش بحرانی (رابطه ۹)، رابطه میان مقاومت فشاری تک محوره و مدول تغییرشکل معادل ارزیابی شده است (رابطه ۱۰). با توجه به مشخص بودن مقدار مدول تغییر شکل معادل و استفاده از معیار شکست موهر-کلمب، میزان افزایش چسبندگی با استفاده از رابطه ۱۱ قابل ارزیابی است.

$$\varepsilon_{cri} = \frac{\sigma_c}{E_{equ}} = 1.073 \sigma_c^{-0.318} \quad (9)$$



شکل ۱۱. تاثیر افزایش زاویه اصطکاک داخلی در زون تسلیم شده بر روی پروفیل جابه‌جایی تاج تونل



شکل ۱۲. کرنش در راستای تونل در منطقه تحکیم یافته به همراه داده‌های حاصل از رفتارنگاری در تونل بیرگل

جایگزین شود. در این سناریو سطح هشدار ۳ ساکارویی می‌تواند به عنوان معیار طراحی لحاظ شود. سطح ۱ و ۲ ساکارویی می‌تواند منجر به یک طرح محافظه‌کارانه برای فورپولینگ شود.

با توجه به قرارگیری تونل بیرگل و اغلب تونل‌های شهری که نیاز به فورپولینگ دارند در عمق کم و تحلیل حساسیت انجام شده می‌توان از تاثیر زاویه اصطکاک داخلی بر جابه‌جایی تونل صرف نظر کرد و مقدار آن را معادل مقدار اولیه در تحلیل عددی زون تقویت شده منظور کرد.

مقدار چسبندگی در زون تقویت شده با استنباط از رابطه کرنش بحرانی و معیار شکست موهر-کلمب و با استفاده از مدول تغییرشکل معادل در زون تسلیح شده قابل ارزیابی است. هندسه زون تسلیح شده نیز با استفاده از الگوی فورپولینگ نصب شده قابل محاسبه است. نتایج تحلیل عددی و مقایسه آن با داده‌های حاصل از ابزاربندی تونل بیرگل تطابق خوبی را میان داده‌های برداشت شده و نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد. لذا می‌توان از سناریوی زون تقویت شده با هندسه و پارامترهای ژئومکانیکی توصیه شده جهت طراحی سیستم فورپولینگ، استفاده کرد.

با توجه به شکل ۱۲ منحنی کرنش تونل در قسمت حفاری نشده، با داده‌های حاصل از ابزار همخوانی نزدیکی دارد. روش عددی مقدار جابه‌جایی زمین را در این قسمت کمتر از مقادیر داده‌های ابزار نمایش می‌دهد اما در قسمت حفاری شده تونل و جبهه کار تونل کرنش‌های حاصل از مدل‌سازی عددی منطقه تحکیم یافته در محدوده تغییرات داده‌های ثبت شده توسط ابزار و نزدیک به مقدار میانگین آن‌ها قرار گرفته‌اند.

۶. نتیجه‌گیری

به منظور بررسی عملکرد سیستم قوس چتری و ارائه روشی جهت طراحی این سیستم با استفاده از داده‌های حاصل از ابزاربندی تونل بیرگل و پارامترهای عملیاتی سیستم فورپولینگ اجرا شده در این تونل، کارآیی سه سناریو جهت طراحی سیستم فورپولینگ مورد ارزیابی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد. با توجه به نیروهای داخلی المان پایل و ناچیز بودن نیروهای محوری، رفتار این المان به رفتار تیر نزدیک است تا تیرستون و ضریب ایمنی یک با توجه به خصوصیات هندسی و مکانیکی المان پایل نصب شده باید به عنوان معیار پایداری لحاظ شود. در طراحی سیستم فورپولینگ با توجه به کرنش مجاز، ابتدا باید مدول تغییرشکل زون تسلیح شده اصلاح و با مدول معادل

منابع

- Aksoy, C.O., Onargan, T., 2010. The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages. *Tunneling and Underground Space Technology: An International Journal*, 25(5): 553-559.
- Grasso, P., Mahtab, M.A., Rabajoli, G., 1993. Consideration for design of shallow tunnels. *International Conference on Underground Transportation Infrastructures*, Toulon.
- Harazaki, I., Anon, H., Matsuda, A., Aoki, T., Hakoishi, Y., 1998. Field observation of large supported by umbrella method: case of Maiko Tunnel in Kobe, Japan. *Tunneling and Metropolises, Proceedings of the World Tunneling Congress*, 1009-1014.
- Hisatake, M., Ohno, S., 2008. Effects of pipe roof supports and the excavation method on the displacements above a tunnel face. *Tunnelling and Underground Space Technology: An International Journal*, 23(2): 120-127.
- Hoek, E., 1998. Tunnel support in weak rock. *Symposium of Sedimentary Rock Engineering*, Taipei, Taiwan.
- Itasca Consulting Group, 2011. *Flac User's Guide*, 5 edition.
- John, M., Mattle, B., 2002. Design of tube umbrella. *Magazine of the Czech Tunnelling Committee and Slovak Tunnelling Association*, 3.
- Jong, H.S., Yong, K.C., Oh, Y.K., Sang, D.L., 2008. Model testing for pipe-reinforced tunnel heading in a granular soil. *Tunnelling and Underground Space Technology: An International Journal*, 23(3): 241-250.
- Lee, I.M., Lee, I.S., Nam, S.W., 2004. Effect of Seepage Force on Tunnel Face Stability Reinforced with multi-step Pipe Grouting. *Tunnelling and Underground Space Technology: An International Journal*, 19(6): 551-565.
- Li, F., Niu, Z., 2012. Application of forepoling in construction of under-river tunnel. *Railway Engineering: An International Journal*, 17(8).
- Morovatdar, A., Palassi, M., Ashtiani, R.S., 2020. Effect of pipe characteristics in umbrella arch method on controlling tunneling-induced settlements in soft grounds. *Rock Mechanics and Geotechnical Engineering: An International Journal*, 12(5): 984-1000.
- Muraki, Y., 1997. The umbrella method in tunneling. *Department of Civil and Environmental Engineering, MIT, Ph.D. Thesis*.
- Ockac, I., 2008. Control of surface settlements with umbrella arch method in second stage excavations of Istanbul Metro. *Tunnelling and Underground Space Technology: An International Journal*, 23(6): 674-681.
- Oke, J., Vlachopoulos, N., Diederichs, M.S., 2016. Semi-analytical model for umbrella arch systems employed in squeezing ground conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology: An International Journal*, 56: 136-156.
- Oreste, P.P., Peila, D., 1998. A new theory for steel pipe umbrella design in tunneling. *Proceedings of the World Tunnel Congress on Tunnels and Metropolises*, Vol. 2.
- Park, J., Cho, I., Lee, I., Lee, S., 2012. Tunnel reinforcement by using pressure-induced inflatable pipes methods. *Geotechnical and Geoenvironmental Engineering: An International Journal*, 138(12): 1483-1491.
- Peila, D., 1994. A theoretical study of reinforcement influence on the stability of a tunnel face. *Geotechnical and Geological Engineering: An International Journal*, 12: 145-168.
- Peila, D., Pelizza, S., 2003. Ground reinforcing and steel pipe umbrella system in tunneling, Kolymbas, D., (Ed.), *Rational Tunneling: Advances in Geotechnical Engineering and Tunnelling*, Logos Verlag, Berlin, Innsbruck.
- Sakurai, S., 1983. Displacement measurements associated with the design of underground openings. *Proceeding International Symposium, Field Measurements in Geomechanics, Zurich*, Vol. 2: 1163-1178.
- Sakurai, S., 1997. Lessons learned from field measurements in tunnelling. *Tunneling and Underground Space Technology: An International Journal*, 12(4): 453-460.
- Schumacher, F.P., Kim, E., 2013. Modeling the pipe umbrella roof support system in a Western US underground coal mine. *Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences: An International Journal*, 60: 114-124.
- Song, K.I., Cho, G.C., Chang, S.B., Lee, I.M., 2013. Beam-spring structural analysis for the design of a tunnel pre-reinforcement support system. *Journal of Rock Mechanics and Mining sciences, An International Journal*, 59: 139-150.

- Tunçdemir, H., Aksoy, C.O., Güçlü, E., Özer, S.C., 2012. Umbrella Arch and Forepoling Support Methods: A Comparison. ISRM International Symposium - EUROCK 2012, Stockholm, Sweden.
- Volkman, G.M., 2004. A contribution to the effect and behavior of pipe umbrella supports. Schubert, (ed.), Proceeding of 53rd Geomechanics Colloquy and EUROCK 2004, Salzburg, Austria.
- Volkman, G.M., Schubert, W., 2007. Geotechnical model for pipe umbrella supports in tunneling. Proceeding of the 33rd ITA-AITES World Tunneling Congress, Prague, Czech Republic, 755-760.
- Volkman, G.M., Schubert, W., 2010. A load and load transfer model for pipe umbrella support. EUROCK 2010, Rock Mechanics in Civil and Environmental Engineering, Lausanne, Switzerland.
- Wang, H., Jia, J., 2008. Analytical method for mechanical behaviors of pipe roof reinforcement. International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 352-357.
- Yoo, C., Shin, H.K., 2003. Deformation behavior of tunnel face reinforced with longitudinal pipes-laboratory and numerical investigation. Tunnelling and Underground Space Technology: An International Journal, 18(4): 303-319.
- Yuan, X., Zhou, S., Gong, Q., 2013. Three-dimensional analysis of excavating face stability supported by pipe rook. Applied Mechanics and Materials: An International Journal, 275-277: 1257-1263.
- Zhang, Z.Q., Li, H.Y., Liu, H.Y., Li G.J., Shi X.Q., 2014. Load transferring mechanism of pipe umbrella support in shallow-buried tunnels. Tunnelling and Underground Space Technology: An International Journal, 43: 213-221.