بررسی اثرات تسلیح با تکنیک تیرآهن‌رانی بررسی موردی تونل سبزکوه

عباس افتخاری؛ دانشگاه کاشان، گروه مهندسی معدن
مجید طارمی*؛ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، باشگاه پژوهش‌گران جوان و نخبگان، تهران
مهدی سعیدی؛ دانشگاه تهران، دانشکده مهندسی معدن

تاریخ: دریافت ۹۲/۱/۲٤ **پذیرش** ۹۲/۱۲/۱۹

چکیده

در این مقاله به بررسی ساز و کار ناپایداری، اعتباربخشی و روش تسلیح پذیرفته شده برای عبور از ناحیهٔ ریزشی تونل انتقال آب سبزکوه در جنوب‌غربی ایران، می‌پردازیم. مشکلات ناپایداری طی حفاری تونل به‌دلیل تغییر در تنش برجا، تغییر شکل ناشی از اتساع، افزایش در نفوذپذیری لایه‌های ماسه‌ای و گراولی، مناطق گسله و سطوح لغزش، باعث کاهش در مقاومت برشی خاک و ریزش در تونل شد. تکنیک تیرآهن‌رانی[۱] برای اولین بار به‌منظور تسلیح زمین و عبور از ناحیهٔ ریزشی در بخش ابتدایی (T1) تونل سبزکوه استفاده شد. در این پژوهش، از روش اجزا محدود برای تحلیل اثرات تسلیح با توجه به مدول بستر خاک، طول و اندازهٔ IPE استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نشست IPE با افزایش طول، روند صعودی و با افزایش مدول بستر خاک و اندازهٔ پروفیل، روند نزولی دارد.

واژه‌های کلیدی: تونل‌زنی، ریزش، روش اجزا محدود، تجربه‌ها

* **نویسنده مسئول** majid.taromi@yahoo.com

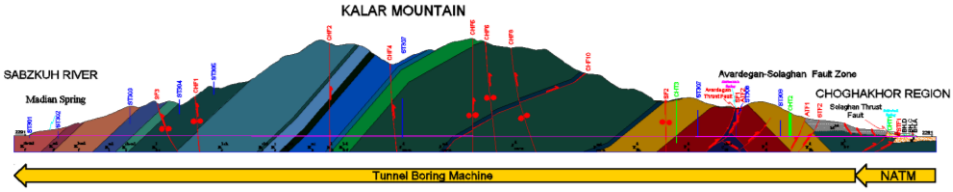
۱. IPE Arc Support Technique (IAST)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]

مقدمه

ساخت تونل فرآیند پیچیده‌ای شامل ملاحظات زمین‌شناسی، ژئوتکنیک، برنامه‌ریزی اجرایی و اقتصاد پروژه است. مطابق ضوابط تونل‌زنی باید دو واقعیت در ذهن مجریان پروژه‌های تونل‌زنی وجود داشته باشد. اول این‌که مخاطرات اجتناب‌ناپذیر نیستند، دوم این‌که مخاطرات هزینه‌های زیادی را به پروژه تحمیل می‌کنند. بنا بر این باید مخاطرات و نواحی ریزشی در تونل‌ها شناسایی و تشخیص داده شوند و برنامه‌ریزی، قوانین، نظام‌نامه‌ها و دستورالعمل‌هایی به‌منظور کاهش آن پیش‌بینی شود. کاهش در تعداد و شدت این حوادث، باعث کاهش در هزینه، افزایش ایمنی و دیگر تبعات منفی ناشی از این مخاطرات خواهد شد.

تونل انتقال آب سبزکوه به طول ۱۰٦۱۷ متر با شیب معادل یک در هزار (۰/۰۰۱) در ایران در حال ساخت است. روش اجرای این تونل بر مبنای حفاری مکانیزه با ماشین تونل‌زنی[۱] (TBM) است. بر اساس اطلاعات حاصل از برداشت‌های صحرایی، انجام بررسی‌های ژئوتکنیک و ژئوفیزیک در بخش ابتدایی (T1)، مشخص شد که جنس زمین تا حدود ۳۹۰ متری خروجی تونل، آبرفتی است (شکل ۱) [۱]. بنا بر این، از آن‌جا که نوع ماشین حفاری تونل، از نوع سپری دوبل یونیورسال[۲] (DSU) است و این نوع دستگاه، قابلیت حفاری در چنین زمین‌هایی را ندارد، بخش ابتدایی تونل (T1)، به‌روش جدید اتریشی[۳] در حال حفاری است. در بخش ابتدایی تونل (T1)، مهندسان طراح و زمین‌شناس، بر این باور بودند که با توجه به نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی و حساسیت و پارامترهای ژئومکانیکی خاک، جبهه‌کار حفاری پایدار و با مشکل خاصی روبه‌رو نخواهد شد. پس از ۳۵ متر حفاری تونل، مواجه با شرایط پیش‌بینی نشده و پیچیدهٔ زمین، برخورد به یک سطح لغزش و عدم رعایت گام حفاری باعث ریزش در تونل شد. ادامه این ریزش‌ها، باعث گسیختگی ترانشه دهانهٔ تونل شد [۲].



شکل ۱. پروفیل زمین‌شناسی تونل سبزکوه [۳]

۱. Tunnel Boring Machine ۲. Double Shield Universal ۳. NATM

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]

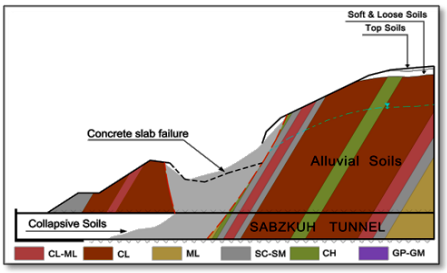
با بررسی و مطالعهٔ سازوکار ریزش‌های مشابه و با لحاظ کردن ملاحظات فنی و اقتصادی، روش چتری[۱] از سوی طراحان پیشنهاد شد. این روش شامل نصب لوله‌هایی به‌صورت موازی با محور تونل و زاویهٔ مشخص است که در صورت زیاد بودن فشارهای وارده می‌توان با تزریق و تسلیح، مقاومت لوله‌ها را افزایش داد. این آرایش، چتری محافظ و ایمن در بالای ناحیهٔ حفاری ایجاد می‌کند. اما با توجه به لزوم تأمین ماشین‌آلات و تجهیزات خاص اجرای لوله و در اختیار نداشتن آن‌ها در کارگاه و هم‌چنین تسریع در علاج‌بخشی و عبور از ناحیه ریزشی به‌منظور جلوگیری از توسعهٔ حفره و ناپایداری ترانشه، استفاده از تیرآهن به‌جای لوله در دستور کار قرار گرفت. در این روش با توجه به مقاومت زیاد تیرآهن‌ها، نیازی به تزریق نیست.

مدل زمین‌شناسی

پژوهش‌های زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی جای‌گاه ویژه‌ای در طراحی و اجرای پروژه‌های تونل‌زنی دارند. این پژوهش‌ها به‌عنوان اولین مرحله در شناسایی پتانسیل ذاتی ریزش بسیار اهمیت دارد. به‌طوری که نتایج به‌دست آمده از بررسی‌ها در فرآیند طراحی و ساخت، تونل‌زنی را می‌تواند در شرایط سخت زمین‌شناسی با موفقیت به انجام رساند. این در حالی است که مسائل پیش‌بینی نشده در مدل زمین‌شناسی علاوه بر افزایش ریسک تونل‌زنی، منجر به تأخیرهای پرهزینه و تجدید نظر در طراحی و ساخت می‌شود [٤]–[٨].



شکل ۲. تصویری از دهانهٔ تونل سبزکوه و حفره ریزشی



شکل ۳. پروفیل زمین‌شناسی ابتدای تونل (بعد از ریزش)

۱. Umbrella Method

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]

شواهد زمین‌شناسی تا پیش از ریزش نشان داد که مشخصات ژئوتکنیکی خاک اعم از چسبندگی، زاویهٔ اصطکاک و مدول الاستیسیته خاک به تناوب تغییر می‌کند و به‌دلیل تکتونیک فعال منطقه، ادامه مسیر پیچیدگی فراوانی در مدل زمین‌شناسی دارد.

در متراژ ۳۵ تونل، برخورد به یک سطح لغزش، چسبندگی کم مصالح خاکی تونل، نفوذ آب و عدم رعایت گام حفاری باعث ریزش در تونل شد. ریزش‌ها در ابتدا به‌صورت موضعی از سینه‌کار آغاز شد (شکل ٤ الف)، به‌طوری که در مدت کوتاهی (٤ ساعت) به تمام مقطع گسترش پیدا کرده (شکل ٤ ب) و در مدت ۸ ساعت، این ریزش به تاج تونل ادامه پیدا کرد (شکل ٤ ج). توالی این ریزش‌ها باعث ایجاد حفرهٔ دودکش مانند در بالای تونل و توسعهٔ آن منجر به ریزش بخشی از ترانشه شد (شکل ۲). در مدت یک ماه، ٦ بار ریزش در حجم زیاد، باعث ورود ۳۸۰۰ مترمکعب خاک به تونل شد.



الف ب ج

شکل ٤. سازو کار گسیختگی: مرحلهٔ اول) گسیختگی موضعی سینه‌کار، مرحلهٔ دوم) گسیختگی سقف و کل سینه‌کار، مرحلهٔ سوم) گسیختگی دودکش مانند

طراحی سیستم تیرآهن‌رانی

در سال‌های اخیر پژوهش‌های زیادی روی رفتار روش‌های چتری انجام شده است. ابراهیم در سال ۲۰۰۸، نتایج رفتارنگاری میدانی از پروژه‌های تونل‌زنی با استفاده از این تکنیک را ارائه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]

کرده است. مطابق با این یافته‌ها، با استفاده از این تکنیک، پایداری جبهه‌کار حفاری تونل در شرایط ژئوتکنیکی ضعیف بهبود می‌یابد و حرکت زمین به‌طور مؤثری کاهش پیدا می‌کند [۹]. یوو در سال ۲۰۰۲ پژوهشی پارامتری روی اثرات الگو و جانمایی سیستم تسلیح در رفتار تغییر شکل جبهه‌کار تونل و ادراک یک نتیجه به‌منظور طرح بهینه برای کاهش تغییر شکل تونل برای هندسه و شرایط زمین‌شناسی مختلف انجام داد [۱۰]. چنگ در سال ۱۹۹۹ بر اساس تئوری تیر فونداسیون وینکلر به تحلیل این روش پرداخت [۱۱]. با توجه به اثر تأخیری پوشش اولیه و اصلاح مدل فونداسیون ارتجاعی وینکلر، ونگ و جیا در سال ۲۰۰۸، رفتارهای مکانیکی سیستم چتری را براساس تئوری تیر فونداسیون ارتجاعی پسترناک بررسی کرده‌اند. نتایج این محاسبات اثبات می‌کند که مدل پسترناک روش بهتری برای دریافت ساز و کار تسلیح و بهبود عمل‌کرد سیستم است [۱۲]. هیساتک و اوهنو در سال ۲۰۰۸، دسته‌ای آزمایش‌های سانتریفیوژ را به‌منظور شفاف‌سازی اثرات سیستم‌های پیش‌نگه‌داری و روش حفاری روی تغییر مکان زیاد جبهه‌کار حفاری انجام داد. نتایج این آزمایش‌ها کاهش چشم‌گیری در جابه‌جایی‌ها را نشان می‌داد [۱۳]. شین و همکاران در سال ۲۰۰۸، آزمایشی در مقیاس بزرگ را روی سیستم چتری در خاک‌های دانه‌ای به‌منظور درک ساز و کار تسلیح و بهبود شیوه طراحی انجام داده است [۱٤].

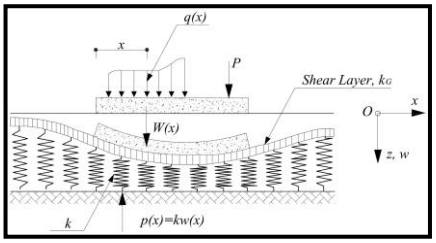
با توجه به تجارب بالا در زمینه سیستم‌های چتری، در این مقاله به بررسی‌های تئوری و تجربی روش تیرآهن‌رانی به‌عنوان تکنیک کمکی پیش تسلیح که برای اولین بار در گذر از ناحیهٔ ریزشی تونل سبزکوه استفاده شده است، پرداخته می‌شود.

۱. مدل تحلیلی

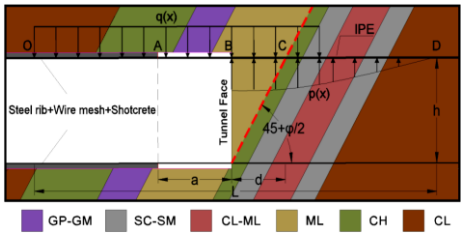
تحلیل روش تیرآهن‌رانی به‌صورت یک تیر مدفون در بستر ارتجاعیی پسترناک انجام شد (شکل ۵). این مدل با فرض وجود اندرکنش برشی بین فنرهای مدل وینکلر ارائه شد. پیوستگی در این مدل از طریق اتصال فنرها به لایه‌ای که در جهت قائم تراکم‌پذیر نیست و تنها در اثر برش عرضی تغییر شکل می‌دهد، تأمین می‌شود.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]

فرآیند حفاری در روش تیرآهن‌رانی به چهار بخش مطابق با حالت‌های تنش در مقاطع مختلف تقسیم‌بندی می‌شود: مقطع تحکیم شده (OA)، مقطع تحکیم نشده (AB)، مقطع آشفته (BC) و مقطع غیرآشفته (CD). شکل ٦ فرآیند این نوع حفاری را با استفاده از روش تیرآهن‌رانی تشریح می‌کند. به‌منظور پایدارسازی مدل مکانیکی، نکته‌های کلیدی در ایده‌آل‌سازی این روش لازم است که در ادامه شرح داده می‌شوند.



شکل ۵. تیر بر بستر ارتجاعی پسترناک



شکل ٦. شماتیک مدل تحلیلی تکنیک تیر آهن‌رانی در تونل

۱) فرض می‌شود که تیرآهن‌ها به‌صورت یک تیر مدفون در یک بستر ارتجاعی پسترناک، بار یک‌نواخت $q(x)$ را تحمل می‌کنند. در این مدل بار $p(x)$ و جابه‌جایی قائم $\omega(x)$ در یک نقطهٔ اختیاری مرز پایینی تیر نگه‌داری شده از این رابطه به‌دست می‌آید:

$$P(x) = k\omega(x) - G_p \frac{\partial^2 \omega(x)}{\partial x^2} \qquad (۱)$$

که k و G_p به‌ترتیب سختی فنر و سختی برشی هستند [۱۵].

۲) فشار روباره در بالای پروفیل فولادی IPE می‌تواند با تئوری ترزاقی محاسبه شود. معادلات استفاده شده در برآورد $q(x)$ بدین‌صورت محاسبه می‌شود [۱٦]:

$$P = \frac{\gamma b_1 - c}{k_0 \tan\phi}\left[1 - \exp\left(-\frac{K_0 H \tan\phi}{b_1}\right)\right] + q\exp\left(-\frac{K_0 H \tan\phi}{b_1}\right) \qquad (۲)$$

$$q(x) = P\delta \qquad (۳)$$

که در آن $b_1 = b + h\tan(45^\circ - \phi/2)$ و b نصف عرض حفاری، γ وزن مخصوص سازندهای زمین‌شناسی، K_0 ضریب فشار خاک در حالت سکون و H عمق روباره، h

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]

ارتفاع حفاری، c چسبندگی خاک، φ زاویهٔ اصطکاک داخلی خاک، q سربار و δ فاصلهٔ بین IPEها است.

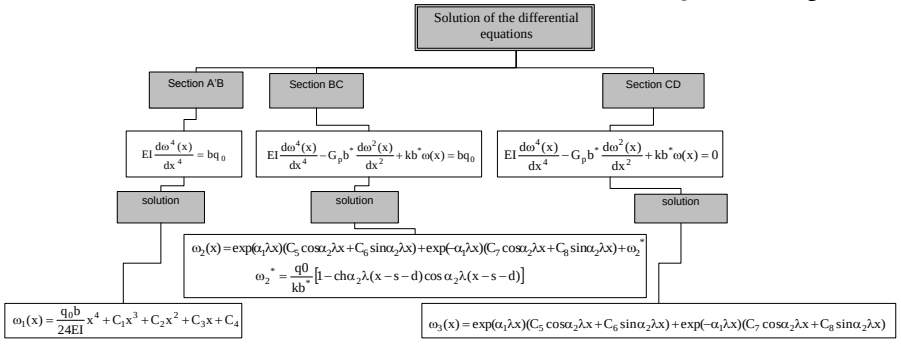
۳) حالت گسیختگی فعال در سینه کار تونل، مطابق تئوری رانکین فرض شده است. بنابر این طول مقاطع پروفیل‌هایی که فشار سربار را در بالای سینه کار تونل تحمل می‌کند برابر است با $d = h\tan(٤٥ - \phi/٢)$.

٤) لحاظ کردن اثر تأخیر در پوشش اولیه. ناحیهٔ نگه‌داری شده (OA) به انتهای گیردار با $W0$ جابه‌جایی قائم در $٠/٥a$ قبل از نقطه A و $W0$ نشست تاج تونل در این نقطه ساده‌سازی می‌شود.

معادلهٔ دیفرانسیل جابه‌جایی قائم برای پروفیل IPE براساس تئوری ارتجاعی را می‌توان بدین‌صورت به‌دست آورد [۱۷]، [۱۸]:

$$EI\frac{d\omega^{٤}(x)}{dx^{٤}} - G_p b\frac{d\omega^{٢}(x)}{dx^{٢}} + kb^{*}\omega(x) = bq(x) \qquad (٤)$$

که در آن $b^{*} = b\left[١ + (G_p/k)^{١/٢}/b\right]$ و b عرض تیر بر بستر ارتجاعی پسترناک، E مدول الاستیسیته پروفیل IPE، I لنگر اینرسی پروفیل IPE و $\omega(x)$ جابه‌جایی قائم پروفیل IPE است. معادلات دیفرانسیل پروفیل IPE در مقاطع مختلف در فلوچارت شکل۷ خلاصه می‌شود:



شکل ۷. فلوچارت حل معادلات دیفرانسیل جابه‌جایی قائم برای پروفیل IPE

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]

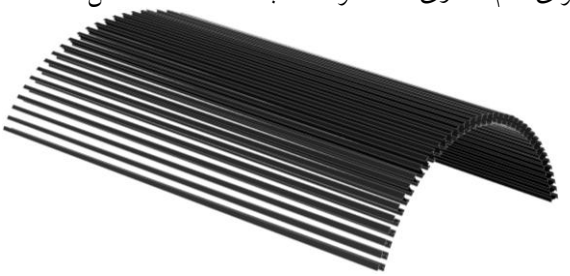
که در آن $C_1 \sim C_8$ ضرایب تعیین نشده‌اند، $\alpha_1 = \left[1+(G_P\lambda^2)/k\right]^{1/2}$، $\alpha_2 = \left[1-(G_P\lambda^2)/k\right]^{1/2}$، $\lambda^4 = \dfrac{kb^*}{4EI}$ و ω_4^* راه حل دقیق معادله دیفرانسیل تحت این شرایط مرزی است:

$$\omega_2\big|_{x=s+d} = \omega_3\big|_{x=s+d} \;،\; \omega_2^{(1)}\big|_{x=s+d} = \omega_3^{(1)}\big|_{x=s+d} \;.$$

شرایط مرزی در این حالت: $\omega_3\big|_{x\to\infty} = 0$، $\theta_3\big|_{x\to\infty} = 0$، به‌دلیل جابه‌جایی قائم و زاویهٔ دوران در نقطهٔ A به‌ترتیب برابر ω_0 و صفر هستند. شرایط مرزی در این نقطه عبارتند از: $\omega_1\big|_{x=0} = \omega_0$، $\theta_1\big|_{x=0} = \omega^{(1)}\big|_{x=0} = 0$، شرایط پیوسته در نقطهٔ C باید برآورده شود، بنا بر این شرایط مرزی در این نقطه عبارتند از $\omega_1^{(1)}\big|_{x=s} = \omega_2^{(1)}\big|_{x=s}$، $\omega_1^{(2)}\big|_{x=s} = \omega_2^{(2)}\big|_{x=s}$، $\omega_1^{(3)}\big|_{x=s} = \omega_2^{(3)}\big|_{x=s}$.

۲. تحلیل به‌روش اجزاء محدود

به‌طور کلی انتخاب و اجرای تکنیک تیرآهن‌رانی به شرایط زمین‌شناسی پیرامون تونل، ارتفاع روباره، روش‌های حفاری و نگه‌داری، عمق تونل، مشخصات خاک، گام حفاری و سختی سیستم نگه‌داری بستگی دارد. در این پژوهش، پارامترهای طراحی برای دست‌یابی به اندازهٔ بهینه پروفیل فولادی IPE با توجه به شرایط اجرایی تکنیک تیرآهن‌رانی با نرم‌افزار SAP ۲۰۰۰ بررسی شده است. چهار مقطع مختلف پروفیل (H) از طول ٦ تا ۹ متر بررسی و تحلیل شده است. برای بحرانی‌ترین شرایط وزن مخصوص $\gamma = 21 KN/m^3$ فرض شده است. فشار سربار (P) و خصوصیات ارتجاعی خاک (k, G_p) برای عمق تونل، کیفیت تودهٔ خاک و سختی سیستم نگه‌داری ارائه شده است. ارتفاع حفاری، (h)، برابر $5m$ در نظر گرفته شده و تغییر شکل قائم پروفیل IPE در تاج تونل و در انتهای پروفیل نسبت به مشخصات ارتجاعی مختلف خاک و برای گام حفاری ۰/۵ متر محاسبه شده است (شکل ۸).



شکل ۸. مدل تحلیل به‌روش اجزاء محدود تیرآهن‌رانی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]

اندازهٔ پروفیل

در شکل ۹ چگونگی نسبت تغییر شکل- مقطع پروفیل $(\omega-H)$ در فشار سربار (P)، گام حفاری (s) با توجه به خصوصیات ارتجاعی خاک (K)، برای طول‌های مختلف پروفیل با استفاده از روش اجزاء محدود، تشریح شده است. چنان‌که انتظار می‌رفت، روند عمومی کاهش تغییر شکل قائم در انتهای پروفیل و دهانهٔ آزاد تونل با افزایش اندازهٔ پروفیل IPE بدیهی است.

اثر مشخصات ارتجاعی خاک روی نسبت $(\omega-D)$ نشان می‌دهد که با افزایش خصوصیات ارتجاعی خاک، تغییر شکل قائم IPE کاهش می‌یابد. هنگامی که مقادیر اندازهٔ پروفیل افزایش می‌یابد، هرگونه افزایش بیش از اندازهٔ مقادیر از IPE۱۸۰ و IPE۲۰۰ پروفیل‌های فولادی، تأثیر زیادی در کاهش تغییر شکل قائم پروفیل ندارد. بنا بر این اندازه‌های ارائه شده به‌عنوان اندازه‌های بحرانی مقطع IPE برای شرایط تونل‌سازی هستند. این نتایج پیشنهاد می‌کند که اندازهٔ بهینه و بحرانی پروفیل مقطع IPE ۱۸۰ است.

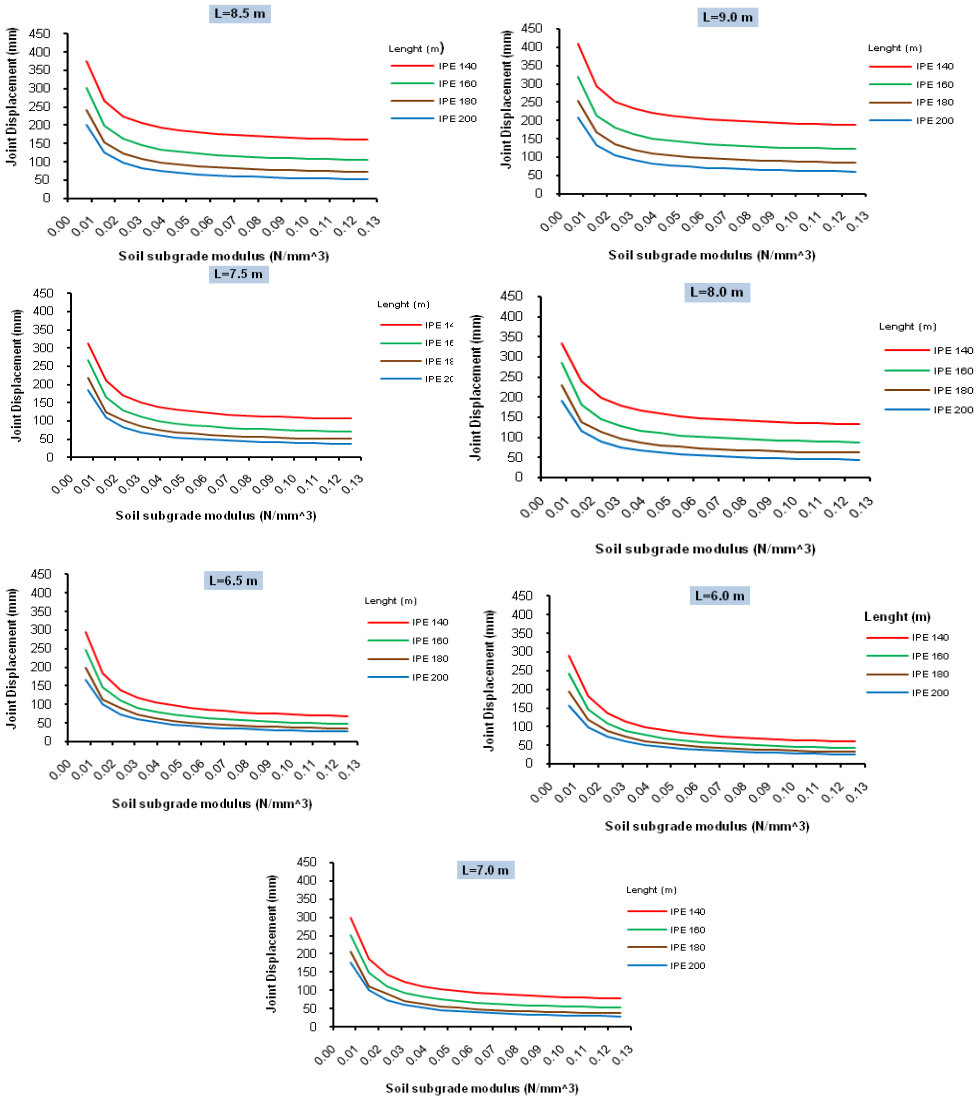
در حالتی که طول پروفیل افزایش می‌یابد تغییر شکل قائم پروفیل نیز در تاج تونل افزایش پیدا می‌کند. از این شکل‌ها در می‌یابیم که تغییر شکل قائم پروفیل با افزایش سربار و گام حفاری افزایش می‌یابد، اما با افزایش خصوصیات ارتجاعی خاک و سختی سیستم تحکیم کاهش می‌یابد. بنا بر این طول لوله بلندتر از ۷/۵ متر تأثیر چشم‌گیری در کاهش تغییر شکل ندارد. بنا بر این، مقدار بحرانی طول لوله در حدود $(۱/۵h)$ ۷/۵ متر است و اگر طول لوله بیش‌تر از $(۱/۵h)$ باشد مزایای سازه‌ای ناشی از افزایش در طول، قابل توجه نیست.

طول هم‌پوشانی

در بخش قبلی دریافتیم، هنگامی که L=۱/۵ h باشد، تیرآهن‌رانی تقریباً در امتداد خط فعال تئوری رانکین (خط گسیختگی) تشریح شده در شکل ٦ است و هر افزایش بیش‌تر از آن، تأثیر چشم‌گیری ندارد. بنا بر این نظر به ماهیت تکراری تکنیک تیرآهن‌رانی، فاصلهٔ افقی میان سینه‌کار تونل و خط گسیختگی می‌تواند به‌عنوان معیاری برای انتخاب اندازهٔ حداقل طول

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]

هم‌پوشانی (Le) مورد نیاز بین دو مرحله نصب موفقیت‌آمیز این سیستم باشد. مقدار بحرانی طول هم‌پوشانی برابر $htg(٤٥-\phi/٢)$ است. این دلالت به این دارد که ارتفاع حفاری و نوع



شکل ۹. نمودار تغییر مکان- مدول بستر خاک مدل به‌روش اجزاء محدود

خاک روی طول هم‌پوشانی پروفیل IPE مؤثر است. بنا بر این طول هم‌پوشانی IPE باید با لحاظ کردن این ضرایب انتخاب شود. این بررسی نشان می‌دهد که عمق پوشش تونل تأثیر

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]

چشم‌گیری روی طول هم‌پوشانی ندارد. این روند در این بخش معلول این است که در کارهای تحقیقاتی، طول IPE در تاج تعریف می‌شود و اصولاً طول IPE در پاطاق تا تاج یک‌سان است. اگر شرایط گسیختگی فعال در سینه‌کار تونل فرض شود، به‌منظور بهینه‌سازی طرح، طول IPE در پاطاق می‌تواند به‌طور تخمینی با رابطه $tg(45-\varphi/2)(h/2+LSin\theta)$ کاهش پیدا کند.

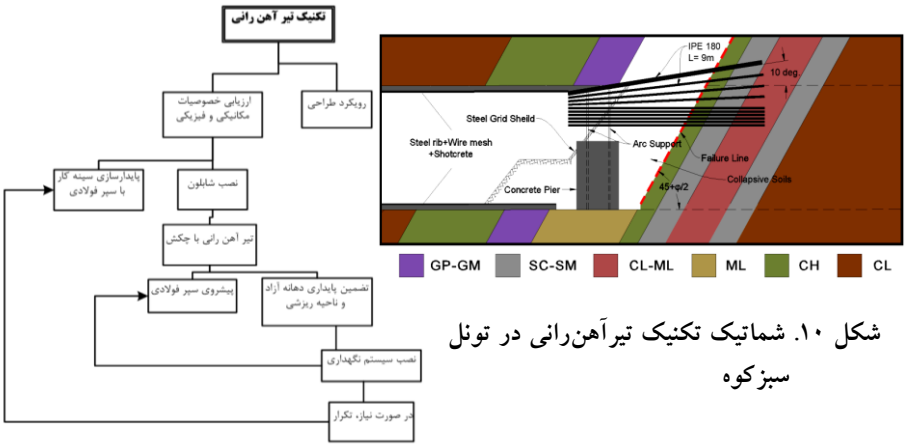
۱. روش ساخت

در طراحی تکنیک تیرآهن‌رانی نیاز به طراحی طول، اندازهٔ پروفیل، زاویهٔ نصب، فاصلهٔ بین تیرآهن‌ها، طول هم‌پوشانی و ... است. به‌طورکلی زاویهٔ نصب (θ) برابر ۱۰ تا ۱۵ درجه است و فاصلهٔ بین پروفیل‌ها از نتایج تحلیل عددی مشخص می‌شود. در شکل ۱۰ شماتیک اجرای تکنیک تیرآهن‌رانی نشان داده شده است. در حالت‌های زیادی تعیین طول پروفیل (L) و اندازهٔ پروفیل (D) مهم‌ترین بخش در طراحی تکنیک تیرآهن‌رانی است. از مهم‌ترین مزایای این روش می‌توان به این موارد اشاره کرد:

- این روش در پهنه‌های ریزشی با طول کم‌تر از ۱۰ متر مناسب است.
- پایداری سینه کار حفاری را با سپر فولادی یا پلاگ کردن می‌توان تأمین کرد.
- در این روش نیاز به تزریق و پایدار سازی خاک نیست.
- اجرای تکنیک تیرآهن‌رانی، یک پوشش محافظتی در محدودهٔ ریزشی تونل ایجاد می‌کند.
- پیش‌رانی تیرآهن‌ها با چکش بیل مکانیکی به سادگی اجرا می‌شود.
- اجرای شابلون مناسب برای مهاربندی و هدایت تیرآهن و هم‌چنین چرب کردن تیرآهن، باعث کاهش نیروی مقاوم در برابر حرکت و افزایش نیروی پیش‌ران می‌شود.

با توجه به موارد اشاره شده در بالا می‌توان فلوچارت طراحی و اجرای تکنیک تیرآهن‌رانی را بدین‌صورت ارائه کرد (شکل ۱۱):

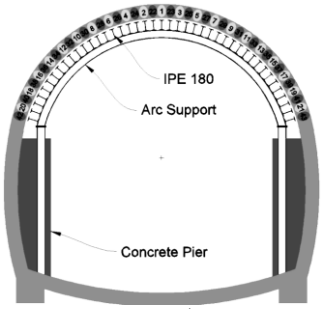
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]



شکل ۱۰. شماتیک تکنیک تیرآهن‌رانی در تونل سبزکوه

شکل ۱۱. فلوچارت طراحی و اجرای تکنیک تیراهن‌رانی

برای عبور از ناحیهٔ ریزشی در بخش T1 تونل سبزکوه، با توجه به الزامات طراحی و اجرای تکنیک تیرآهن‌رانی و نتایج تحلیل به‌روش اجزاء محدود، از IPE۱۸۰ با فاصله‌داری ۱۵ سانتی‌متر و به‌طول ۷/۵ متر استفاده شد (شکل ۱۲). برای این منظور در ابتدا سینه‌کار ناحیهٔ ریزشی با استفاده از سپر فولادی و بتن پاشی پایدار شد، تا از حرکت آن در حین اجرای تیرآهن‌رانی جلوگیری شود. در مرحلهٔ بعد دو عدد شابلون و در فاصلهٔ ۲/۵ متری از سینه‌کار به‌منظور تنظیم زاویهٔ و هم‌چنین تأمین تکیه‌گاه مناسب پروفیل‌ها اجرا شد (شکل۱۳). تیرآهن‌رانی با چکش بیل مکانیکی و به‌واسطهٔ غلاف فولادی از سمت چپ آغاز و به‌صورت یک نیم‌قوس در سمت راست کامل شد. به‌منظور عبور از این ناحیهٔ پایه‌های شمع بتنی- فولادی در طرفین اجرا و قاب‌های فولادی نیز در زیر تیرآهن‌رانی و با گام حفاری نیم‌متر روی پایه‌های بتنی نصب شد. لازم به ذکر است که مهار سینه‌کار حین پیش‌روی و قاب‌گذاری با استفاده از سپر فولادی تأمین شد (شکل ١٤).



شکل ۱۲. مراحل تیر آهن‌رانی در تونل سبزکوه

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]



شکل ۱۳. اجرای شابلون



شکل ١٤. تکمیل تیر آهن‌رانی و عبور از ناحیهٔ ریزشی

نتیجه‌گیری

یکی از چالش‌های پیش‌رو حفاری در زمین‌های نرم، وجود پهنه‌های ریزشی و تکنیک‌های عبور از این نواحی است. شرایط زمین، حجم و گستردگی ریزش اتفاق افتاده در تونل سبزکوه، حاکی از مدل زمین‌شناسی پیچیده‌ای در منطقه بود که شناسایی، تحلیل و رفتارسنجی مداوم و مستمر حرکت تودهٔ خاک پیرامونی را برای دست‌یابی به اقتصادی‌ترین و پایدارترین روش حفاری و نگه‌داری در شرایط مواجهه با وضعیت‌های متفاوت تونل و عبور از نواحی ریزشی، اجتناب‌ناپذیر می‌کرد.

استفاده از سیستم‌های پیش‌نگه‌داری، ریسک حفاری را کاهش و ایمنی را افزایش می‌دهد. از این تکنیک‌ها می‌توان با توجه به شرایط موجود در عبور از نواحی ریزشی نیز استفاده کرد. تکنیک تیرآهن‌رانی یکی از روش‌های چتری است که برای اولین بار در تونل سبزکوه اجرا شد.

کارایی سیستم تکنیک تیرآهن‌رانی وابستگی زیادی به پارامترهای مهمی هم‌چون شرایط زمین‌شناسی پیرامون تونل، ارتفاع روباره، روش‌های حفاری و نگه‌داری، عمق تونل، مشخصات خاک، گام حفاری، سختی سیستم نگه‌داری، اندازهٔ IPE، طول IPE و طول هم‌پوشانی دارد. مقادیر بحرانی موجود این پارامترها اثر بالقوه‌ای را می‌توانند داشته باشند.

امکان‌سنجی و بهینه‌یابی استفاده از این سیستم با استفاده از تحلیل به‌روش اجزاء محدود انجام شده است. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد تغییر شکل قائم پروفیل با افزایش سربار و

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]

گام حفاری افزایش می‌یابد، اما با افزایش خصوصیات ارتجاعی خاک و سختی سیستم تحکیم کاهش می‌یابد.

مقدار بحرانی طول لوله در حدود $۱/۵h$ است، اگر طول لوله بلندتر از $۱/۵h$ باشد، مزایای سازه‌ای ناشی از افزایش در طول لوله تأثیر چشم‌گیری ندارد.

فاصلهٔ افقی میان سینه‌کار تونل و خط فعال تئوری رانکین (خط گسیختگی) می‌تواند به‌عنوان معیاری برای انتخاب اندازه حداقل طول هم‌پوشانی (Le) مورد نیاز بین دو سیکل نصب موفقیت‌آمیز این سیستم باشد. مقدار بحرانی طول هم‌پوشانی برابر $htg(٤٥-\phi/٢)$ است. به این دلیل است که ارتفاع حفاری و نوع خاک روی طول هم‌پوشانی پروفیل IPE مؤثر است. هم‌چنین عمق پوشش تونل تأثیر چشم‌گیری روی طول هم‌پوشانی ندارد.

تقدیر و تشکر

از مدیران محترم پروژه سامانه انتقال آب سبزکوه به چغاخور، آقایان علی اصغر ایزدی، عباس بیات سرمدی و امیر حسین حسینی تشکر و قدردانی می‌کنیم.

منابع

1. Eftekhari A., Taromi M., Saeidi M., "Complexity of the Ground Conditions and Non Compliance with Basic Assumptions in the Trench Stability Analysis: a Case Study in Iran", 7th SASTech 2013, Iran, Bandar-Abbas, 14-15 March (2013).
2. Saeidi M., Eftekhari A., Taromi M., "Evaluation of Rock Burst Potential in Sabzkuh Water Conveyance Tunnel, IRAN: a Case Study", 7th Asian Rock Mechanics Symposium, ARMS 2012, 15-19 October (2012) Seoul, Korea.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]

3. Taromi M., Eftekhari A., Saeidi M., "Adoption of an Appropriate Excavation Method in construction process (Case Study: Sabzkuh Tunnel, Iran)", International Conference on Civil Engineering, Architecture & Urban Sustainable Development, 27&28 November (2013) Tabriz, Iran.
4. Bickal J. O., Kuesel T. R., (eds), "Tunnel Engineering Handbook", Van Nostrand Reinhold Co. (1982).
5. Whittaker B. N., Frith R. C., "Tunneling Design, Stability and Construction", The Institution of Mining and Metallurgy, London (1990).
6. Hoek E., Brown E. T., "Underground Excavations in Rock", Institution of Mining and Metallurgy, London (1982).
7. Kolymbas D., "Tunnlling and Tunnel Mechanics, A Rational Approach to Tunneling", Springer Berlin Heidelberg New York, April (2005).
8. Eftekhari A., Khademi Hamidi J., "Geological Hazard in TBM Tunnlling-a Case Study from Zagros Long Tunnel", 8th Iranian Tunneling conference, Tehran-IRAN (2009).
9. Ibrahim O., "Control of surface settlements with umbrella arch method in second stage excavations of Istanbul Metro", Tunneling and Underground Space Technology, 23(6) (2008) 674-681.
10. Yoo C. S., "Finite-element analysis of tunnel face reinforced by longitudinal pipes", Computers and Geotechnics, 29 (1) (2002) 73-94.
11. Chang S.D., "Research on pre-brace mechanism of pipe umbrella method", Chengdu: Southwest Jiaotong University, (in Chinese) (1999).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]

12. Wang H. T., Jia J. Q., "Analytical method for mechanical behaviors of pipe roof reinforcement", International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering. Taipei: IEEE Computer society (2008) 352-357.
13. Hisatake M., Ohno S., "Effects of pipe roof supports and the excavation method on the displacements above a tunnel face", Tunneling and Underground Space Technology, 23(2) (2008) 120-127.
14. Shin J. H., Choi Y. K., Kwon O. Y., "Model testing for pipe-reinforced tunnel heading in a granular soil", Tunneling and Underground Space Technology 23(3) (2008) 241-250.
15. Kerr A. D., "Elastic and Viscoelastic Foundation Models", J. of Appl. Mech., 31, 3 (1964) 491-498.
16. "FHWA Road Tunnel Design Guidelines", U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, January (2004).
17. Timoshenko S. P., Goodier J. N., "Theory of Elasticity", 3rd ED., McGraw-Hill Book Co., Inc., New York (1970).
18. Bowles J. E., "Foundation Analysis and Design", Third Edition, McGraw -Hill Book Co., Inc., New York (1982).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-02]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1394.9.1.1.4]
[DOI: 10.18869/acadpub.jeg.9.1.2559]