

روش طراحی سگمنت‌های پیش ساخته بتن الیافی در تونل با استفاده از روش تحلیل تیر- فنر (مطالعه موردی: تونل خط ۲ متروی شیراز)

مقاله پژوهشی

محمد رضا عدل پرور^{*}، دانشیار، دانشکده فنی، دانشگاه قم، قم، ایران

محمد حسین تقوی پارسا، دانشجوی دکتری، دانشکده فنی، دانشگاه قم، قم، ایران

^{*} پست الکترونیکی نویسنده مسئول: adlparvar@stu.qom.ac.ir

دریافت: ۹۸/۰۷/۰۸ - پذیرش: ۹۸/۱۱/۰۵

صفحه ۸۰-۶۷

چکیده

گسترش استفاده از ماشین‌های حفاری مکانیزه تونل در پروژه‌های تونل‌سازی باعث استفاده روزافزون از سگمنت‌های پیش ساخته بتنی شده است. امکان استفاده از بتن الیافی به عنوان یک جایگزین برای بتن مسلح شده با آرماتور با توجه به بهبود عملکرد بتن با الیاف و همچنین صرفه اقتصادی آن، موضوعی مطرح در مهندسی عمران است. آرماتورهای مسلح کننده در برابر تنش‌های نقطه‌ای سگمنت‌های بتنی، مانند نیروهای اعمالی متمرکز که در طول مراحل ساخت به سگمنت وارد می‌شود، موثرند. از طرفی بتن‌های الیافی در برابر تنش‌های گسترده مانند تنش‌هایی که ناشی از فشار زمین و آب زیرزمینی به سازه وارد می‌شود، عملکرد بهتری دارند. به دلیل وجود هر دو نیروی متمرکز و گسترده، سگمنت‌های پیش ساخته تونل می‌تواند به صورت ترکیبی از آرماتور و الیاف ارائه شود. در این پژوهش، با توجه به روش مطرح شده در دستورالعمل *ACI 544.7R* به مدل‌سازی با روش تیر-فنر به صورت دوبعدی در نرم‌افزار *SAP2000* و طراحی سازه تونل سگمنتی تحت بارهای گذرا و مراحل تولید سگمنت، بارهای گذرا در مراحل ساخت و بارهای دائمی در مرحله بهره‌برداری پرداخته شده است. با توجه به مشخصات پروژه در نظر گرفته شده و بارهای اعمالی بر آن، سگمنت بتنی با ۵٪ درصد الیاف فولادی به تنهایی پاسخگوی بارهای وارده نبود و از آرماتور برای حیران مقاومت استفاده شد و سگمنت بتنی پیش ساخته با ترکیب آرماتور و الیاف فولادی برای طراحی پیشنهاد شد. در نهایت مدل پیشنهادی منجر به کاهش ۳۰ درصدی مصرف آرماتورهای فولاد گردید.

واژه‌های کلیدی: بتن الیافی، تونل، سگمنت پیش ساخته بتنی، روش تیر-فنر

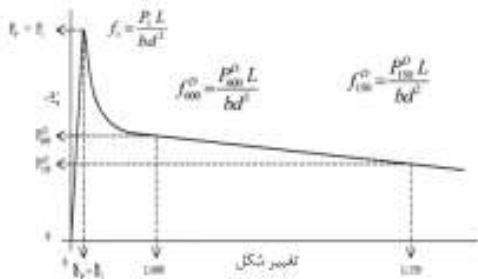
۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از سگمنت‌های پیش ساخته بخصوص زمانی که از ماشین حفار تونل برای حفاری تونل استفاده می‌شود، متداول شده است (کارتلی و همکاران، ۲۰۱۲). سگمنت‌های بتنی پیش ساخته برای اطمینان از پایداری خاک حفاری شده در خاک نرم و سنگ‌های ضعیف، حین حفاری تونل بوسیله ماشین حفار تونل نصب می‌شوند. این سگمنت‌ها معمولاً برای مقاومت در برابر بارهای دائمی زمین و آب‌های زیرزمینی و بارهای غیردائمی مراحل ساخت، انتقال و نصب طراحی می‌شوند (دلافونته و همکاران، ۲۰۱۳). امکان استفاده از بتن الیافی به عنوان یک جایگزین برای بتن مسلح شده با آرماتور، یکی از موضوعات مطرح در مهندسی عمران است. استفاده از بتن الیافی مزیت‌هایی در مقابل استفاده از آرماتور دارد. استفاده از الیاف باعث بهبود عملکرد بتن در مقابل کشش، سختی و کنترل ترک می‌شود، همچنین استفاده از الیاف رفتار بعد از ترک را بهبود می‌بخشد (اشنیتجن، ۲۰۱۳). بعلاوه استفاده از الیاف در ترکیب بتن، باعث بهبود قابل توجه تحمل خستگی و ضربه می‌شود. عموماً استفاده از بتن الیافی با ترک‌های کوچک‌تر و با عرض کم‌تر و دوام بیش‌تر به دلیل توزیع یکنواخت الیاف در سگمنت همراه است (دلافونته و

در سال‌های اخیر، استفاده از سگمنت‌های پیش ساخته بخصوص زمانی که از ماشین حفار تونل برای حفاری تونل استفاده می‌شود، متداول شده است (کارتلی و همکاران، ۲۰۱۲). سگمنت‌های بتنی پیش ساخته برای اطمینان از پایداری خاک حفاری شده در خاک نرم و سنگ‌های ضعیف، حین حفاری تونل بوسیله ماشین حفار تونل نصب می‌شوند. این سگمنت‌ها معمولاً برای مقاومت در برابر بارهای دائمی زمین و آب‌های زیرزمینی و بارهای غیردائمی مراحل ساخت، انتقال و نصب طراحی می‌شوند (دلافونته و همکاران، ۲۰۱۳). امکان استفاده از بتن الیافی به عنوان یک

۲-۱- روش طراحی

طبق دستورالعمل ACI-544.7R سگمنت‌های پیش‌ساخته با بتن الیافی با استفاده از مقاومت فشاری مشخصه f_c' مقاومت مشخصه کششی پسماند پس از ترک σ_p طراحی می‌شود. طبق این دستورالعمل تحلیل و طراحی به این گونه است که سگمنت جهت مقاومت در برابر تمامی بارهای موقت و دائمی که در حین ساخت و عمر طراحی به سازه اعمال می‌شود، مقاومت کند (باشکی، ۲۰۱۶-۲۰۰۹). مقاومت مشخصه فشاری f_c' مشابه بتن بدون الیاف با استفاده از استاندارد ASTM C39/C39M به دست می‌آید. جهت محاسبه مقاومت خمشی یا کششی این مقاطع از پارامتری تحت عنوان مقاومت خمشی غیرالاستیک در حالت نهایی (ULS) استفاده می‌شود. این پارامتر f_{150D} نام دارد که در شکل نشان داده شده و بر اساس مقاومت پسماند در تیر استاندارد مطابق با دستورالعمل ACI 544.7R با تغییر مکان خالص وسط دهانه برابر $L/150$ تحت آزمایش خمش ۴ نقطه‌ای تعیین می‌شود (دلافونته و همکاران، ۲۰۱۳). جهت طراحی سگمنت‌های با بتن الیافی تحت خمش و کشش می‌توان از پارامترهای مقاومت خمشی پسماند استاندارد ASTM C1609/1609M با اعمال ضریب تعدیل 0.33 تا 0.37 استفاده کرد. این ضریب جهت تبدیل پارامترهای مقاومت خمشی به مقاومت پسماند کششی برای طراحی است (دلافونته و همکاران، ۲۰۱۳).



شکل ۱. پارامترهای مقاومت خمشی پسماند در تیر با بتن الیافی

طبق ASTM C1609/1609M

۲-۲- طراحی برای حالت گذرا و مراحل تولید سگمنت

بارهای وارده در زمان ساخت، به بارهایی که از زمان ساخت تا زمانی که سگمنت از ماشین حفار بیرون می‌آید،

همکاران، ۲۰۱۳). بتن الیافی به صورت قابل توجهی مقاومت در برابر تنش‌های برستینگ و اسپالینگ را افزایش می‌دهد (پلیزاری و همکاران، ۲۰۰۶). استفاده از بتن الیافی هزینه‌ها هم در ساخت بتن و هم در نیروی کار کاهش می‌یابد (رومالدی و همکاران، ۲۰۰۹). آرماتورهای مسلح‌کننده در برابر تنش‌های نقطه‌ای سگمنت‌های بتنی مانند نیروهای اعمالی متمرکز که در طول مراحل ساخت به سگمنت وارد می‌شود، موثر هستند. از طرفی بتن‌های الیافی در برابر تنش‌های گسترده مانند تنش‌هایی که ناشی از فشار زمین و آب زیرزمینی به سازه وارد می‌شود عملکرد بهتری دارند. به دلیل وجود هر دو نیروی متمرکز و گسترده، سگمنت‌های پیش‌ساخته بتنی تونل‌ها می‌تواند به صورت ترکیبی از آرماتور و الیاف ارایه شود (والرین، ۱۹۹۹ و کرنیکا، ۱۹۹۵). لاغری در تونل‌های سگمتهی که با پارامتر (λ) بیان می‌گردد، با توجه به نسبت طول منحنی سگمنت به ضخامت آن تعریف می‌شود. طبق دستورالعمل انجمن بتن امریکا ACI-544، زمانی که این نسبت بزرگ‌تر از ۱۰ می‌شود و قطر تونل بیش‌تر از ۷ متر است، استفاده از ترکیب آرماتور و الیاف برای سگمنت‌های پیش‌ساخته پیشنهاد می‌گردد. مزیت مقاله حاضر با توجه به آنکه روش تحلیل و طراحی کامل یک پروژه مهندسی در مقالات معتبر علمی بررسی نشده آن است که در این پژوهش، با توجه به روش مطرح شده در دستورالعمل انجمن بتن امریکا ACI 544.7R به وسیله طراحی تحلیلی و نیز مدل‌سازی عددی با روش تیر-فنر به صورت دوبعدی در نرم‌افزار SAP2000 و سازه تونل سگمتهی بتنی تحت بارهای گذرا و مراحل تولید سگمنت، بارهای گذرا در مراحل ساخت و بارهای دائمی در مرحله بهره‌برداری پرداخته شده است.

۲- طراحی سگمنت‌های پیش‌ساخته در تونلسازی

در این پژوهش، پروسه طراحی سگمنت‌های پیش‌ساخته بتنی در تونلسازی با استفاده از آئیننامه‌های معتبر اروپایی و دستورالعمل ACI 544.7R و آیین‌نامه ACI 318 بررسی شده است (باشکی، ۲۰۱۶-۲۰۰۹ و دپریسکو، ۲۰۰۹-۲۰۰۴).

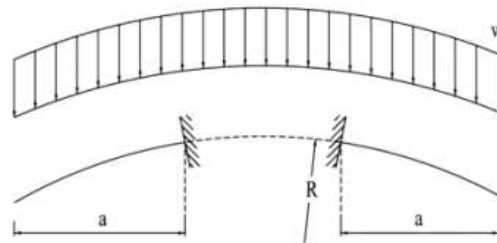
گفته می‌شود. بارهای مرحله ساخت و انتقال غالباً خمشی هستند و نیروی محوری در سگمنت ایجاد نمی‌شود.

۲-۲-۱- بار قالب برداری

در این مرحله، سگمنت پس از فرآیند بخاردهی مطابق شکل از درون قالب خارج می‌شود. در این فرایند با توجه به سن کم بتن (بین ۶ تا ۱۰ ساعت) و اعمال فشار از جرثقیل سقفی بر سگمنت، این قطعات باید توانایی تحمل لنگر خمشی منفی ایجاد شده مطابق شکل در مقطع بحرانی ناشی از وزن و نیروی فشاری دو کشک که به لبه سگمنت وارد می‌شود را داشته باشد (باشکی، ۲۰۱۶-۲۰۰۹).



شکل ۲. قالب برداری در کارخانه



شکل ۳. بار گذاری قالب برداری سگمنت

بر اساس آزمایش‌های انجام شده، مقاومت خمشی پسماند f_{150}^D برای بتن در عمر ۸ ساعته برابر ۲۹/۱ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع است. با استفاده از ضریب ۰/۳۴ این پارامتر به مقاومت پسماند کششی σ_p تبدیل خواهد شد. با توجه به استفاده از روش LFRD از ضریب کاهش مقاومت ۰/۷ استفاده می‌گردد. با اعمال ضرایب فوق مقاومت کششی پسماند ۶/۹۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به دست می‌آید.

$$Mu = 1.4 \frac{\left(w_{sp} \times \left(9 \left(\frac{L_p}{20} \right) \right)^2 \right)}{2} \quad (1)$$

$$\phi M_n = \frac{\sigma_p b h^2}{2} \quad (2)$$

در روابط فوق M حداکثر لنگر ایجاد شده در مقطع، w_{sp} وزن سگمنت در واحد طول تصویر شده روی افق، مقاومت کششی مصالح بتن الیافی (σ_p)، L_p طول سگمنت، γ نصف ضخامت سگمنت و I ممان اینرسی سگمنت است.

۲-۲-۲- بار ۲: دپو

پس از خارج کردن سگمنت از قالب، قطعات مربوط به یک رینگ جهت عمل‌آوری تا رسیدن به مقاومت ۲۸ روزه مطابق شکل روی هم قرار می‌گیرند. مطابق دستورالعمل انجمن بتن امریکا با اعمال خروج از مرکزیت (e) ۲۰۰ میلی‌متری تکیه‌گاه‌ها و با احتساب وزن تمامی سگمنت‌ها و با مدل‌سازی سگمنت به صورت تیر دو سر ساده لنگر خمشی ایجاد شده مطابق شکل ۵ در سگمنت تحتانی با رابطه ۳ محاسبه شده و با لنگر مقاوم مقطع مقایسه می‌شود (بورگس، ۲۰۰۷).



شکل ۴. انبار کردن سگمنت‌ها

$$M = Max \begin{cases} w \left(\frac{L^2}{8} - \frac{S^2}{2} \right) + F_{1e} \\ w \left(\frac{S^2}{2} \right) + F_{1e} \end{cases} \quad (3)$$

پارامترهای رابطه بالا در شکل ۵ نشان داده شده است.

بر اساس آزمایش‌های انجام شده، مقاومت خمشی پسماند f_{150}^D ۲۸ روزه بتن برابر ۳۹/۲ کیلوگرم بر

نحوه بارگذاری در این مرحله مشابه حالت دپو است.

۲-۲-۴ بار ۴: هندلینگ سگمنت

پس از انتقال سگمنت به تونل، این قطعات باید در محل خود در جداره تونل قرار گیرند. مطابق شکل ۷ این عملیات با استفاده از یک شفت حلزونی شکل انجام می‌گیرد. این شفت در مرکز سگمنت پیچیده می‌شود و این قطعات را بلند و در جداره تونل پشت دستگاه قرار می‌دهد. بار اعمالی این مرحله مشابه حالت خارج کردن سگمنت از قالب است با این تفاوت که در این مرحله مطابق پیشنهاد AASHTO DCRT-1 ضریب دینامیکی ۲ برابری اعمال می‌شود (دوال، ۲۰۰۰).

$$M = \frac{wa^2}{2} \quad (۴)$$

در این مرحله لنگر خمشی ایجاد شده در مقطع با رابطه فوق برابر با ۳/۸۲ تن.متر است.



شکل ۷. دستگاه لیفت

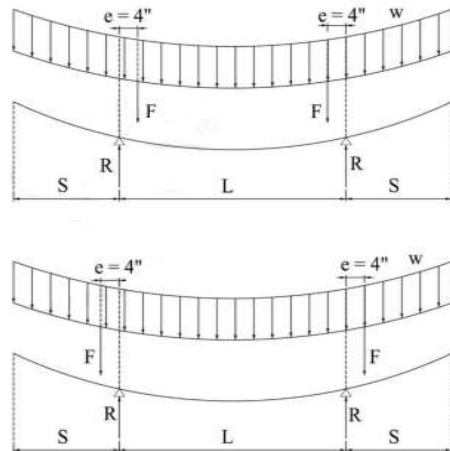
۲-۳-۲ طراحی برای مراحل ساخت تونل

بارهای مرحله ساخت تونل شامل بارهایی است که در این مرحله، جک‌های دستگاه با نیروی بسیار زیادی از طریق کفشک‌های تعبیه شده، بر جداره سگمنت وارد می‌کنند. این نیرو علاوه بر ایجاد تنش‌های لهیدگی در محل کفشک با جداره سگمنت، تنش‌های کششی قابل ملاحظه‌ای را در عمق سگمنت به وجود می‌آورد.

۲-۳-۱ بار ۵: نیروی تراست جک‌های TBM

پس از فرایند نصب قطعات در جداره تونل و تکمیل یک رینگ کامل، دستگاه TBM با اعمال فشار جک بر جداره آن رینگ اقدام به پیشروی و حفاری تونل می‌کند. در

سانتی‌متر مربع است. با استفاده از ضریب ۰/۳۴ این پارامتر به مقاومت پسماند کششی σ_p تبدیل شد. با توجه به استفاده از روش LRFD از ضریب کاهش مقاومت ۰/۷ استفاده شد. با اعمال ضرایب فوق مقاومت کششی پسماند ۹/۳۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع به دست می‌آید.



شکل ۵. بارگذاری دپو سگمنت‌ها

۲-۲-۳ بار ۳: جابه‌جایی سگمنت

پس از رسیدن به مقاومت ۲۸ روزه و انجام فرآیندهای جانبی نظیر نصب گسرها و کنترل کیفی، این قطعات مطابق شکل جهت نصب به کارگاه منتقل می‌شوند. در حین مسیر، در طول زمان حمل قطعات تحت انواع بارهای دینامیکی قرار می‌گیرند. این قطعات به صورت ۳ تایی روی هم قرار می‌گیرند. مطابق پیشنهاد دستورالعمل، با اعمال ضریب دینامیکی ۲ و خروج از مرکزیت ۲۰۰ میلی‌متری تکیه‌گاه‌ها، لنگر موجود در سگمنت مانند تیر دو سرمفصل محاسبه می‌شود (دوال، ۲۰۰۰).



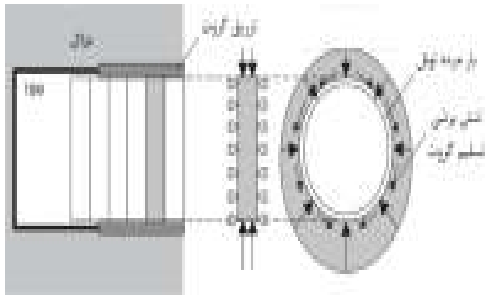
شکل ۶. جابجایی سگمنت‌ها

می‌آید. این فضای خالی با تزریق گروت پر می‌شود. فرایند تزریق گروت به فضای خالی پشت سگمنت منجر اعمال بارگذاری به سازه تونل می‌شود. فشار بسیار زیاد گروت در پشت سگمنت که منجر به ایجاد این بارگذاری می‌شود، جهت کنترل و مقابله با نشست زمین در بالای تونل و همچنین اطمینان از اتصال کامل جداره تونل با لاینینگ و پر شدن تمامی حفرات موجود ایجاد می‌گردد. جهت برآورد فشار گروتینگ بر جداره لاینینگ با استفاده از رابطه تعادل میان مؤلفه‌های افزایشی ناشی از فشار گروت، وزن لاینینگ و مؤلفه مماسی ناشی از تنش برشی ایجاد شده توسط گروت، وزن مخصوص معادل گروت ρ_{eq} مطابق رابطه ۶ محاسبه می‌گردد (دی پریسکو و همکاران، ۲۰۰۹). این نیروها به صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است:

$$\frac{\pi}{4} b \rho_{eq} D_e^2 = \pi D_e h b \rho_{conc} + 2 D_e b \tau_{yield} \quad (6)$$

$$\Delta P = \rho_{eq} D_e \quad (7)$$

در این روابط D_e قطر حفاری تونل و b پهنای هر رینگ، h ارتفاع و τ_{yield} تنش برشی تسلیم گروت است. همچنین ρ_{conc} وزن مخصوص بتن است.



شکل ۲. نیروها و پارامترهای مربوط به بار ۶

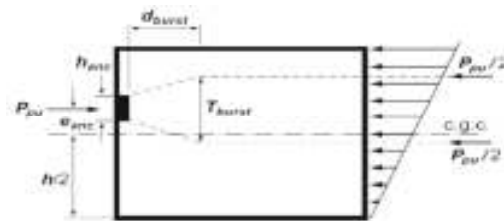
۳-۲-۳- بار ۷: فشار بار گروتینگ ثانویه

بار متمرکز گروتینگ پشت سگمنت که به بار گروتینگ ثانویه یا گروتینگ چک معروف است، از طریق سوراخ‌های تعبیه شده در سگمنت اعمال می‌شود. سگمنت‌ها با گروتینگ از طریق حفره‌های تعبیه شده، در جای خود فیکس می‌شوند. از این روش برای پرکردن پشت سگمنت‌ها هم

طی این فرایند جک‌های دستگاه نیروی بسیار زیادی را از طریق کفشک‌های تعبیه شده بر جداره سگمنت وارد می‌کند. این نیرو علاوه بر ایجاد تنش‌ها لهیدگی در محل تماس کفشک با جداره سگمنت، تنش‌های کششی قابل ملاحظه‌ای را در عمق سگمنت بوجود می‌آورد. این تنش‌ها که به تنش‌های برستینگ معروف است، به دلیل انتشار نیرو در جهت عرضی درون سگمنت ایجاد شده و منجر به ترک خوردگی و خرابی بتن در عمق سگمنت می‌شود. علاوه بر تنش‌های برستینگ، تنش‌هایی تحت عنوان تنش اسپالینگ درون سگمنت و در محلی بین دو جک مجاور به وجود می‌آید. با توجه به نوع خاک می‌توان نیروهای ایجاد شده را تخمین زد. برای هر نوع خاک روش‌های مختلفی برای این کار وجود دارد (دی پریسکو و همکاران، ۲۰۰۹). این نیروها و پارامترها و نحوه توزیع نیرو و ایجاد تنش‌های کششی در عمق مقطع، در شکل ۱ نشان داده شده است. برای محاسبه نیروی برستینگ T_{burst} و فاصله مرکزی از بیرون مقطع $dburst$ ، ACI318 استفاده از روابط زیر را پیشنهاد می‌دهد (باشکی، ۲۰۰۹).

$$T_{burst} = 0.25 P_u \left(1 - \frac{h_{anc}}{h} \right) \quad (8)$$

$$d_{burst} = 0.5(h - 2e_{anc}) \quad (9)$$



شکل ۱. نیروهای کششی برستینگ و پارامترهای مربوطه

در این روابط خروج از مرکزیت محل قرارگیری کفشک دستگاه نسبت به صفحه مرکزی سگمنت با e_{anc} نشان داده شده است.

۳-۲-۲- بار ۶: فشار گروتینگ پشت سگمنت

در حفاری مکانیزه با استفاده از دستگاه TBM با توجه به اینکه رینگ‌های تونل درون سپر انتهایی دستگاه مونتاژ می‌شود، قطر حفاری تونل مقداری بیشتر از قطر خارجی یک رینگ کامل است. بنابراین، پس از اجرای رینگ و پیش روی دستگاه یک فضای خالی میان جداره تونل و لاینینگ بوجود

با توجه به اینکه محیط اطراف تونل از خاک تشکیل شده است در صورتی که تغییر مکان سازه منفی باشد، ضریب عکس العمل فشار برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر، به دلیل اینکه مقاومت کششی بین پوششی بتنی و محیط اطراف تونل برابر صفر است، ضریب عکس‌العمل فدر در این حالت برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس، از فنهایی که فقط قادر به تحمل نیروی فشاری باشند، برای مدل سازی محیط اطراف تونل استفاده می‌شود. لازم به ذکر است با توجه به استفاده از فنه‌های مذکور لازم است تحلیل به صورت استاتیکی غیرخطی انجام شود. مطابق روابط موجود تئوری الاستیسیته، برای تخمین ضریب عکس العمل زمین از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$K_s = \frac{E_s}{R(1+\nu_s)} \quad (8)$$

در این رابطه E_s مدول الاستیسیته خاک، R شعاع تونل و ν_s ضریب پواسون زمین است. به دلیل یکپارچه نبودن سگمنت و وجود اتصال بین سگمنت‌ها با استفاده از روش پیشنهادی، رینگ به صورت صلب با اینرسی اصلاح شده مدل می‌گردد. اصلاح ممان اینرسی مقطع به دلیل در نظر گرفتن اثر درزها در محل اتصال قطعات سگمنت است. مطابق این روش با استفاده از رابطه زیر ضریب اصلاح به دست می‌آید (عباس و همکاران، ۲۰۱۴):

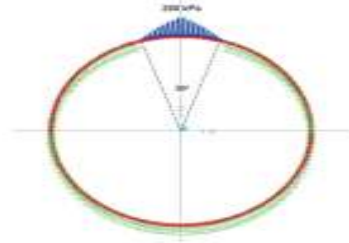
$$I_e = I_j + \left(\frac{4}{n}\right)^2 I \quad (9)$$

در این رابطه I_e ممان اینرسی اصلاح شده، I_j ممان اینرسی موثر در محل درزها (در جهت اطمینان صفر در نظر گرفته شد)، I ممان اینرسی مقطع کامل و n تعداد قطعات یک رینگ است.

۴-۱- صحت سنجی

برای اطمینان از روش مدل‌سازی صحیح سازه تونل، پروژه تحقیقاتی بخشی و همکاران (بخشی و همکاران، ۲۰۱۰) که یک تونل تونل سگمندی بتن الیافی طراحی شده بر اساس روش ACI 544-7R است، مورد راستی‌آزمایی قرار گرفته است. تونل مطرح شده در این مقاله یک تونل با سایز متوسط با سگمنت‌های پیش‌ساخته بتن الیافی است. قطر داخلی ۵٫۷۴ متر و هر رینگ از ۵ سگمنت بزرگ بعلاوه یک سگمنت

می‌توان استفاده نمود. این بار با استفاده از روش راهنمای ITA WG2 به صورت نیروی نشان داده شده در شکل ۱۰ اعمال می‌شود. در این روش بار گروتینگ ثانویه به ۰/۱ تاج تونل وارد می‌شود (دی پریسکو و همکاران، ۲۰۰۹).



شکل ۳. مدل‌سازی بار گروتینگ متمرکز

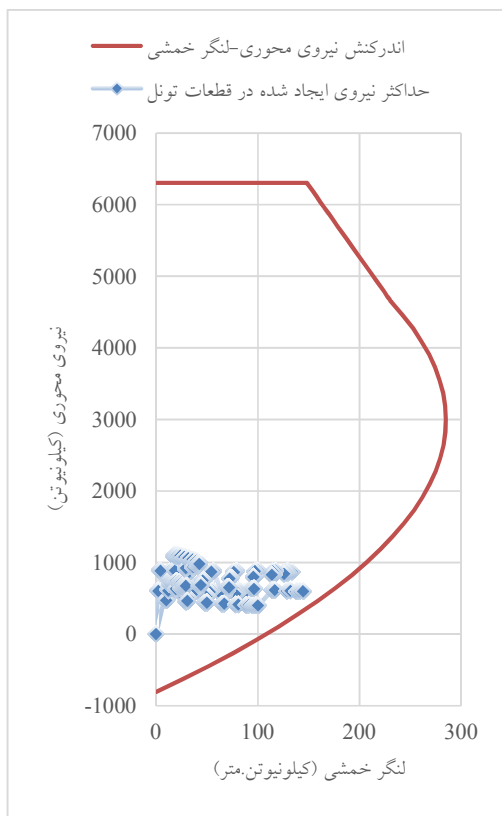
۳-۴- طراحی برای حالت بهره‌برداری

در این مرحله مقاومت سازه تونل در برابر بارهای طولانی مدت مانند: بار زمین، آب زیرزمینی، سربار و بار ناشی از تردد وسایل نقلیه بالای زمین، بار قطار و بار زلزله است. در این مرحله حداکثر نیروی داخلی با استفاده از نرم‌افزارهای مدل‌سازی نظیر SAP2000 به سازه اعمال شده و در ترکیبات بارگذاری مختلف با نیروی مقاوم مقطع مقایسه می‌گردد.

۳-۴-۱- بار ۸: فشار زمین، آب زیرزمینی و سربار خاک بارهای اعمالی این بخش شامل بار مرده، بار خاک، بار آب زیرزمینی، بار کاربری بالای تونل، بار ترافیک روی سطح زمین و بار زنده ناشی از تردد قطار است که با توجه به مشخصات محل احداث تونل در نظر گرفته می‌شوند.

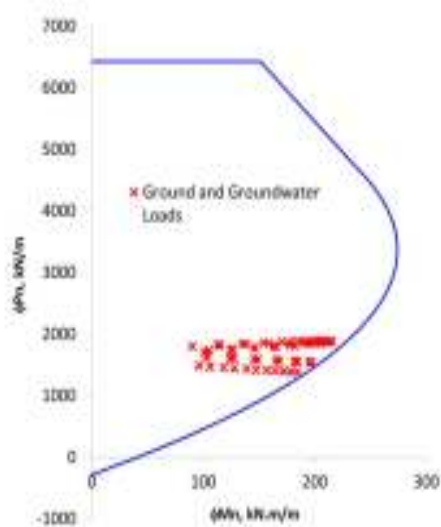
۴- تحلیل عددی

جهت تحلیل عددی یک تونل متروی شهری در نرم‌افزارهای موجود نظیر SAP2000 از روش تحلیلی تیر-فدر در نرم‌افزار استفاده شده است. روش تیر-فدر توسط AASHTO DCRT-1 ارایه شده است. این روش بیان می‌کند که تونل می‌تواند به صورت دوبعدی در یک صفحه مدل شود [۲۱]. در این روش اندرکنش بین سگمنت و زمین با مدل‌سازی فنر الاستیک وینکلر در جهت شعاعی انجام می‌گیرد و سختی این فنرها با توجه به پارامترهای ژئوتکنیکی محیط در برگیرنده پوشش بتنی به دست می‌آید. تغییر شکل فنرها نیز برابر تغییر مکان محیط اطراف سازه تونل است.



شکل ۱۱. نمودار نتایج صحت سنجی

کوچک به عنوان کلید (۱/۳ اندازه سگمنت بزرگ) ساخته شده است. پهنا، ضخامت و پهنای منحنی هر سگمنت به ترتیب ۱،۵، ۰،۳ و ۳،۴ متر است. با استفاده از ضریب ۰،۳۴ مقاومت مشخصه باقی مانده کششی یا خمشی (σ_p) حاصل شد. مقاومت بتن تازه و ۲۸ روزه ۲،۵ و ۴ مگاپاسکال و مقاومت فشاری مشخصه بتن تازه و ۲۸ روزه به ترتیب ۱۵ و ۴۵ مگاپاسکال است. همچنین تونل در خاک نرم ساخته شده است. با توجه به این که در مقاله نوع بارگذاری انجام شده ذکر نشده، بارهای معمول بر روی تونل قرار گرفت. برای این منظور ارتفاع سربار خاک را ۱۰ متر با خاک با چگالی ۲ تن بر مترمکعب و بار مرده بتن ۲،۵ تن بر مترمکعب در نظر گرفته شد. همانطور که از شکل ۱۱ و مقایسه آن با شکل ۱۲ مشخص است، نمودار اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی دقیقاً مطابق با نتایج بخشی و همکاران حاصل شد. نیروهای ایجاد شده در مقاطع تونل در صحت سنجی و مقاله با هم تفاوت دارد که به دلیل عدم اطلاعات کافی درباره بارگذاری و جنس دقیق خاک است.



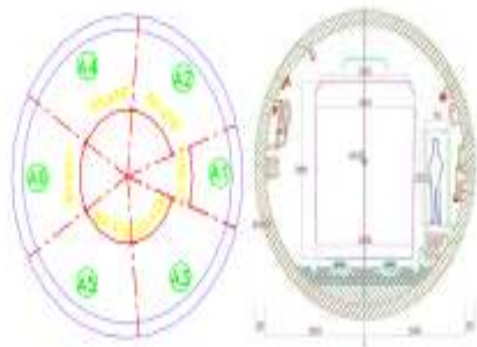
شکل ۱۲. نمودار اندرکنش و نیروهای مقطع تونل بخشی

۴-۲- مطالعه موردی (خط ۲ متروی شهر شیراز)

۴-۲-۱- مشخصات پروژه

هر رینگ از ۶ سگمنت تشکیل شده که یکی از آن‌ها سگمنت کلید است. بر اساس اطلاعات موجود در این تونل از سگمنت‌های چهاروجهی به عرض ۱/۴ متر استفاده شد. با توجه به آنکه در این پروژه سگمنت‌های بتن مسلح استفاده شده است. در طراحی‌های صورت گرفته سگمنت‌های استفاده شده در پروژه با سگمنت‌های طراحی شده با الیاف فولادی دو سرقلاب با درصد حجمی ۰/۵ و نیز سگمنت‌های ترکیبی آرماتور-الیاف بررسی شده است.

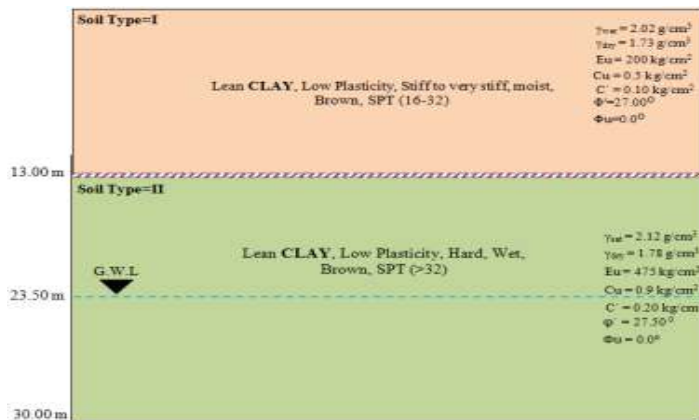
در این پژوهش سگمنت‌های پیش ساخته مسیر خط ۲ قطار شهری شیراز از میدان سعدی در شمال شیراز شروع شده و بعد از با مشخصات نشان داده شده در شکل ۱۳ به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است. با توجه به تراز بالای تونل در ایستگاه‌های مختلف، حداکثر سربار تونل در مقاطع مفروض برای طراحی این پروژه ۱۶ متر است و طراحی برای این سربار انجام شده است. مقطع تونل حفاری شده با ماشین حفاری تونل (TBM) مطابق شکل ۱۳ دارای قطر داخلی ۶ متر و ضخامت ۳۰ سانتی‌متر است.



شکل ۱۳. مقطع عمومی تونل

ژئوتکنیکی در نظر گرفته شده برای خاک منطقه، مدول الاستیسیته ۴۷۵ کیلوگرم بر سانتیمترمربع و ضریب پواسون ۰/۴۸ است.

مشخصات ژئوتکنیکی مقطع روباره تونل در این قطعه، بر اساس گزارش ژئوتکنیک و خدمات مهندسی مطابق شکل ۱۴ در نظر گرفته شده است. همچنین با توجه به مشخصات



شکل ۱۴. مقطع ژئوتکنیک قطعه مورد نظر

۴-۳- مدل‌سازی عددی

خمش ۲۸ روزه بتن الیافی استفاده می‌گردد. با اعمال ضرایب کاهش مقاومت ۰/۷ و ضریب تبدیل ۰/۳۴، لنگر مقاوم ۵/۸۷ تن. متر به دست آمد که از لنگر بار نصب بیش‌تر است. برای فشار گروت با توجه به روابط ۶ و ۷ با جایگذاری مقدار این پارامترها در روابط بالا، مقدار اختلاف فشار عمودی در بالا و پایین تونل برابر ۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع به دست می‌آید. مطابق دستورالعمل ACI 544.7R فشار گروتینگ بایستی به صورت یک فشار شعاعی بر جداره لاینینگ که به صورت خطی از حداقل فشار در تاج تونل به حداکثر فشار در پایین آن افزایش می‌یابد، در نظر گرفته شود. می‌توان این فشار ناشی از تزریق گروت را با احتساب این اختلاف فشار بر جداره تونل وارد کرد. مطابق دستورالعمل ACI 544.7R در این مرحله بارگذاری، وزن لاینینگ و فشار گروتینگ به عنوان تنها عوامل ایجاد فشار بر جداره تونل به حساب می‌آیند. بار این مرحله در نرم‌افزار SAP2000 لحاظ شده است. با توجه به مقطع موجود با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر و پهنای ۱،۴ متر، استفاده از ۲ آرماتور در هر گوشه‌ی سگمنت و مجموعاً ۸ آرماتور ۱۴ برای مدل الیاف-آرماتور در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ و ۲ آرماتورهای طراحی در هر یک از سگمنت‌ها آمده است.

مدلسازی عددی سگمنت‌ها در نرم‌افزار SAP2000 با استفاده از المان frame انجام گرفته و کلیه بارها به سازه اعمال گردید و اثرات تکیه‌گاهی خاک نیز با استفاده از فنرهای فشاری وینکلر در جهت شعاعی شبیه‌سازی گرفته است. در این تحقیق ضریب اصلاح رابطه ۹ با وجود ۱+۵ سگمنت در هر رینگ و ممان اینرسی موثر ۰/۴۴ ممان اینرسی کل است. با توجه به روابط (۱) و (۲)، لنگر مقاوم مقطع (۴/۳۶ تن. متر) بزرگ‌تر از لنگر ناشی از بارگذاری (۱/۹۱ تن. متر) است و رابطه زیر برقرار است.

$$\phi M_n > M_u \quad (10)$$

همچنین با توجه به رابطه (۳) مطابق محاسبات انجام شده مقدار لنگر برابر ۲/۹۳ تن. متر است و لنگر مقاوم مقطع برابر ۴/۳۶ تن. متر است؛ که نشان می‌دهد الیاف به تنهایی پاسخگوی لنگر مرحله دیو است. در خصوص بار حمل، با محاسبه لنگر مطابق رابطه (۳)، حداکثر لنگر برابر ۳/۷۵ تن. متر به دست آمد و از لنگر مقاوم مقطع که برابر ۵/۸۸ تن. متر است، عدد بزرگ‌تری حاصل می‌شود که نشان می‌دهد؛ الیاف به تنهایی توانایی مقاومت در برابر بار این مرحله را دارد. برای بار هندلینگ سگمنت، لنگر خمش ایجاد شده در مقطع با رابطه (۴) مقداری برابر با ۳/۸۲ تن. متر دارد. در این مرحله با توجه به این که فرایند نصب سگمنت در مقاومت ۲۸ روزه آن انجام می‌شود از پارامترهای مقاومت

جدول ۱. آرماتور طراحی سگمنت بتن مسلح در هر رینگ

عرضی	طولی	آرماتور	سگمنت
۱۴	۲۸	آرماتور ۱۴	A1 (alfa=37.457 , l=1.96)
۱۰	۱۴	آرماتور ۸	
۲۲	۲۸	آرماتور ۱۴	A2,3,4,5 (alfa=65.478 , l=3.43)
۱۰	۲۴	آرماتور ۸	
۲۰	۲۸	آرماتور ۱۴	A6 (alfa=60.631 , l=3.17)
۱۰	۲۲	آرماتور ۸	

۴-۴- تحلیل نتایج

جدول ۱ تشکیل شده است که طراحی مراحل ساخت و تولید، به دلیل اندازه بزرگ‌تر برای سگمنت A2, A3, A4, A5

با مقایسه دو روش طراحی، هر رینگ کامل بتنی تونل در این پژوهش از شش سگمنت بتنی پیش‌ساخته با مشخصات

سرعت تولید و به تبع آن سرعت اجرای پروژه افزایش می‌یابد. غیر از صرفه اقتصادی استفاده بتن الیافی به عنوان جایگزین بتن ساده موجب بهبود عملکرد سگمنت و افزایش طول عمر آن به دلیل خصوصیات بتن الیافی خواهد شد. پس از طراحی و آنالیز سگمنت‌های مدلسازی شده، نتایج در شکل ۱۵ برای مقایسه سه حالت مختلف بتن الیافی، بتن الیافی با آرماتور و بتن ساده با آرماتور ارائه شد. همانطور که از شکل مشخص است، دو حالت طراحی بتن ساده با ۲۸ آرماتور ۱۴ و بتن الیافی با ۰٫۵ درصد الیاف فولادی و ۱۰ آرماتور ۱۴ در برابر طراحی پاسخگو هستند.

انجام شد. همچنین طراحی برای مرحله بهره برداری بر روی رینگ کامل انجام شد. جدول ۳ مربوط به خلاصه طراحی انجام شده در دو حالت استفاده از بتن ساده و بتن الیافی و آرماتور تقویتی است. در این جدول مقدار فولاد مصرفی با توجه به آرماتورگذاری انجام شده در راستای طولی، عرضی و خاموت‌ها و درصد حجمی استفاده از الیاف فولادی در یک رینگ تونل در دو روش با هم مقایسه شد. با مقایسه میزان فولاد مصرفی در دو روش طراحی کاهش ۳۳ درصدی میزان مصرف فولاد مشاهده شد، که باعث صرفه‌جویی در منابع ملی خواهد شد. ضمن آن که در صورت استفاده از آرماتور کم‌تر، با کاهش زمان موردنیاز جهت بافت میلگرد،

جدول ۲. آرماتور طراحی سگمنت بتن مسلح و الیاف در هر رینگ

عرضی	طولی	آرماتور	سگمنت
۱۴	۲۸	آرماتور ۱۴	A1 (alfa=37.457 , l=1.96)
۱۰	۱۴	آرماتور ۸	
۲۲	۲۸	آرماتور ۱۴	A2,3,4,5 (alfa=65.478 , l=3.43)
۱۰	۲۴	آرماتور ۸	
۱۰	۸	آرماتور ۱۴	A6 (alfa=60.631 , l=3.17)
۱۰	۲۲	آرماتور ۸	

جدول ۳. مقایسه میزان فولاد مصرفی دو روش طراحی

روش طراحی	مقدار آرماتور طولی	مقدار آرماتور عرضی	مقدار خاموت	مقدار الیاف	کل فولاد مصرفی (Kg)
بتن مسلح با الیاف	۱۱۳/۸۵	۹۸/۲۵	۸۰/۶۴	۳۲۶/۱۱	۶۱۸/۸۵
بتن مسلح با آرماتور	۶۳۸/۳۰	۲۱۶/۱۶	۸۰/۶۴	۰	۹۳۵/۱۰



شکل ۱۵. مقایسه حالت‌های مختلف طراحی سگمنت پیش ساخته

جویی شد. از طرفی به دلیل کاهش وزن میلگرد مورد استفاده به کمتر از ۵۰ درصد، هزینه مربوط به نیروی انسانی جهت

علاوه بر صرفه جویی در نیروی کار، همانطور که از جدول ۴ مشخص است در مقدار مصرف فولاد ۳۰ درصد صرفه

بافت شبکه میلگرد به همین مقدار کاهش می‌یابد. قیمت‌های سال ۱۳۹۶ شمسی می‌باشد. در نظر گرفته شده به مبالغ زمان احداث پروژه در

جدول ۴. مقایسه هزینه آرماتور طراحی مدل‌های مختلف سگمنت

مدل سگمنت	وزن میلگرد در هر رینگ (کیلوگرم)	وزن الیاف در هر رینگ (کیلوگرم)	هزینه تامین میلگرد (ریال)	هزینه تامین الیاف (ریال)	مجموع
طرح بتن مسلح	۸۹۶,۶۳	۰	۲۱۵۱۹۱۲۰	۰	۲۱۵۱۹۱۲۰
طرح الیاف-آرماتور	۲۹۲,۷۴	۳۲۶,۱۱	۷۰۲۵۷۶۰	۱۳۶۹۶۶۲۰	۲۰۷۲۳۳۸۰

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، به بررسی روش طراحی سگمنت‌های تونل‌های قطار شهری پرداخته شد. همچنین ضمن یک مطالعه عددی بر روی تونل خط ۲ مترو شیراز، یک طراحی مجددی برای حالتی که سگمنت تونل از جنس بتن الیافی باشد، بر اساس دستورالعمل انجمن بتن امریکا ACI544.7R و با توجه به بارهای وارده در سه بخش، حالت گذرا و مراحل تولید سگمنت، مراحل ساخت تونل و حالت دائمی و بارهای بهره‌برداری انجام گرفت. سپس در بخش طراحی با توجه به پیشنهاد گزارش طراحی سومی با استفاده از آرماتور و بتن الیافی به عنوان جایگزین مناسبی برای بتن ساده و آرماتور مطرح شد. در انتها نیز میزان فولاد مصرفی در هر حالت با هم مقایسه شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

۱- با توجه به مطالعه موردی انجام شده، استفاده از بتن الیافی با آرماتور در تونل‌های با لاغری زیاد، جایگزین مناسبی برای بتن ساده با آرماتور است.

۲- با توجه به مطالعه موردی انجام شده، در صورتی که در سگمنت‌های این خط مترو از بتن الیافی و آرماتور استفاده می‌شد، طرح منجر به صرفه‌جویی ۳۳ درصدی در فولاد مصرفی می‌گشت.

۳- استفاده از بتن الیافی با آرماتور، علاوه بر صرفه اقتصادی باعث بهبود عملکرد بتن نسبت به بتن ساده می‌شود.

۶- مراجع

-A. De La Fuente, A. Blanco, P. Pujadas, and A. Aguado, (2013), "Advances on the use of fibres in precast concrete segmental linings," in Proceedings of international fib symposium engineering a concrete future: technology, modelling and construction. Tel Aviv, 2013, pp. 691-4.

-ASTM C39 Standard, (2010), "Standard Test Methods for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens".

-ACI Committee, (1999), "Building code requirements for structural concrete:(ACI 318) and commentary (ACI 318R-99)," American Concrete Institute.

-B. Schnitgen, (2003), "Design of precast steel fibre reinforced tunnel elements," in PRO 31: International RILEM Workshop on Test and Design Methods for Steel Fibre Reinforced Concrete-Background and Experiences, Vol. 31, pp. 145-146.

-U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, (2009), "Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels — Civil Elements", National Highway Institute, New York.

-SAP2000 Software Manual, California, (2005), "Structural Analysis Program".

-G. Plizzari, G. J. T. Tiberti, and U. S., (2006), "Technology ,Steel fibers as reinforcement for precast tunnel segments", Vol. 21, No. 3, pp. 438-439.

-A. Caratelli, A. Meda, and Z. J. S. C. Rinaldi, (2012), "Design according to MC2010 of a fibre-reinforced concrete tunnel in Monte Lirio, Panama," Vol. 13, no. 3, pp. 166-173.

- M. Bakhshi and V. Nasri, (2009), "Tunnel Segmental Lining Geometry, Tolerance and Measurement", manual for design and construction of road tunnels–civil elements.
- R. Burgers, J. Walraven, G. Plizzari, and G. Tiberti, (2007), "Structural behavior of SFRC tunnel segments during TBM operations," in World Tunnel Congress ITA-AITES, pp. 1461-1467.
- R. G. A. de Waal, (2000), "Steel fibre reinforced tunnel segments-for the application in shield driven tunnel linings", TU Delft, Delft University of Technology.
- S. Abbas, A. Soliman, and M. Nehdi, (2014), "Structural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete tunnel lining segments," in FRC 2014 Joint ACI–fib International Workshop. Fibre Reinforced Concrete Applications.
- M. Bakhshi, D. Antioli (2010), "Analyze and design of shield tunnel lining in line 7 tehran subway" Vol. 15, No. 3, pp. 303-331.
- J. Romualdi and G. B. Batson, (2008), "Mechanics of crack arrest in concrete," 0870312693.
- J. Walraven, (1999), "The evolution of concrete", Structural Concrete, P1, No. 1, pp. 3-12.
- J. N. Cernica, (1995), "Geotechnical engineering: soil mechanics", Wiley, New York.
- 12- ASTM C1609 / C1609M - 19a Standard Test Method, (2010), "Standard test method for flexural performance of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading).
- M. Bakhshi and V. Nasri, (2016), "ACI Guideline on Design and Construction of Precast Concrete Tunnel Segmental Lining," in ITA World Tunnel Congress (WTC), pp. 22-28.
- M. Di Prisco, G. Plizzari, L. J. M. (2009), "Vandewalle, and structures, Fibre reinforced concrete: new design perspectives," Vol. 42, No. 9, pp. 1261-1281.
- M. Di Prisco, G. Plizzari, and R. J. B. (2004), Felicetti, France: RILEM Publications, "6th RILEM symposium on fibre reinforced concretes.

Study and Design of Prefabricated Fiber Concrete Segments of Metro Tunnels Using with the Beam-Spring Method

Mohamma Reza Adlparvar, Associate Professor, Faculty of Engineering, Civil Group, University of Qom, Qom, Iran.

Mohammad Hossein Taghavi Parsa, Ph.D., Student, Faculty of Engineering, Civil Group, University of Qom, Qom, Iran.

E-mail: adlparvar@qom.ac.ir

Received: September 2019-Accepted: February 2020

ABSTRACT

The extension of used tunneling mechanized drilling machines (TBMs) in tunneling projects has led to the increased use of prefabricated concrete segments. The use of fiber concrete as a substitute for concrete reinforced concrete with regard to the improvement of concrete fiber performance and its cost-effectiveness is a subject in civil engineering. Arming reinforcements are effective against the stresses of concrete segments, such as concentrated forces that enter the segment during the construction process. On the other hand, fiber reinforced concrete is able to perform well against widespread stresses such as stresses caused by ground pressure and underground water. Due to the presence of both concentrated and extensive force, the pre-fabricated tunnel segments can be presented as a combination of reinforcement and fiber. In this research, according to the method presented in the ACI 544.7R instruction, the two-dimensional beam-spring modeling in the SAP2000 and the design of the structure of the tunnel under the transient loads and the segment's production stages, the transient loads in the steps Construction and permanent loads have been dealt with in the exploitation phase. According to the specifications of the project and the load applied to it, the concrete segment with 0.5% of the steel fibers alone was not responsive to the loads involved and the reinforcement was used to compensate for the resistance and the prefabricated concrete segment with the combination of reinforcement and steel fibers for designing it was proposed. Finally, the proposed model led to a 30% reduction in steel reinforcement consumption.

Keywords: Fiber Concretes, Tunnels, Concrete Prefabricated Segments, Beam-Spring Method