




Investigation and Analysis of Fiber Concrete Lining of Tunnel Opening Under the Effect of Thermal Load

A. M. Charaghkhani  , S. Peyman  * , M. H. Tagvi Parsa 

*Assistant Professor, Faculty of Passive Defense, Imam Hossein Comprehensive University, Tehran, Iran

(Received: 13/06/2023, Revised: 01/07/2023, Accepted: 07/08/2023, Published: 23/09/2023)

DOR: 20.1001.1.20086849.1402.14.3.8.2

ABSTRACT

Examining the thermal behavior of concrete lining of tunnels against thermal loads is of special practical importance. The purpose of this research is to investigate the behavior of fiber concrete lining tunnels with rectangular, semicircular and horseshoe sections under the effect of thermal load in a specific time history. In this regard, numerical simulations have been carried out using Abaqus finite element software. Stress-time and deformation-time graphs in fiber concrete coating under the effect of thermal loads have been investigated. Fiber concrete in this research, which is considered as cover in tunnel sections, is of steel fiber concrete type with a volume percentage of 0.5 to 1.5. Also, in addition to the common design loads, the sections are subjected to thermal loading conditions. According to the obtained results, the strength of the investigated sections depends on the amount of steel fibers in the concrete in addition to the appearance. Investigations show that the cross-section with horseshoe shape has the best performance against thermal load and the increase of fibers up to 1.5 volume percent of concrete compared to tunnel linings with a lower volume percentage of fibers leads to stability in a longer period of time.

Keywords: Tunnel, Fiber Concrete Lining, Finite Elements, Nonlinear Analysis, Thermal Load

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

 Authors



* Corresponding Author Email: speyman@ihu.ac.ir



نشریه علمی دانش غیرمعمول

سال چهاردهم، شماره ۳، پیاپی ۱۴۰۲، (پیاپی ۵۵): صص ۱۰۳-۹۱

علمی- پژوهشی

شاپای چاپی: ۶۹۴۹-۲۰۰۸ | شاپای الکترونیکی: ۲۹۸۰-۸۰۳۰



بررسی رفتار پوشش بتن الیافی دهانه تونل تحت اثر بار حرارتی

امیرمحمد چراغ خانی^۱، صفا پیمان^{۲*}، محمدحسین تقوی پارسا^۳

DOR: 20.1001.1.20086849.1402.14.3.8.2

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

چکیده

بررسی رفتار حرارتی پوشش بتنی تونل‌ها در برابر بارهای حرارتی از اهمیت کاربردی ویژه‌ای برخوردار است. هدف از این پژوهش بررسی رفتار پوشش بتن الیافی تونل‌های با مقطع مستطیلی، نیم‌دایره و نعل اسبی تحت اثر بار حرارتی در یک تاریخچه زمانی مشخص می‌باشد. در این راستا شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس انجام گرفته است. نمودارهای تنش- زمان و تغییر شکل- زمان در پوشش بتن الیافی تحت اثر بارهای حرارتی بررسی شده است. بتن الیافی در این تحقیق که به‌عنوان پوشش در مقاطع تونلی در نظر گرفته شده از نوع بتن الیاف فولادی با درصد حجمی ۰/۵ تا ۱/۵٪ است. همچنین مقاطع علاوه بر بارهای متداول طراحی تحت شرایط بارگذاری بار حرارتی قرار گرفته است. مطابق نتایج به‌دست آمده، مقاومت انواع مقاطع موردبررسی علاوه بر شکل ظاهری به میزان الیاف فولادی در بتن نیز بستگی دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقطع با شکل نعل اسبی دارای بهترین عملکرد در برابر بار حرارتی بوده و افزایش الیاف تا ۱/۵٪ حجمی بتن نسبت به پوشش‌های تونلی با درصد حجمی کمتر الیاف منجر به پایداری در مدت‌زمان بیشتری می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تونل، پوشش بتن الیافی، اجزاء محدود، تحلیل غیرخطی، بار حرارتی.

^۱دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران
^۲استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران - speyman@ihu.ac.ir - نویسنده مسئول
^۳دانشجوی دکتری عمران گرایش سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه قم، قم، ایران



* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

نویسندگان ©

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

آتش‌سوزی‌های اخیر در تونل‌های راه و مترو در سراسر جهان توجه به حفاظت از سازه تونل‌ها در برابر آتش و پاره‌های حرارتی را بالا برده است، از دست دادن مقاومت بتن به علت آتش‌سوزی در فضاهای محصور مانند تونل‌ها، نه تنها می‌تواند منجر به فروپاشی سازه شود، بلکه ممکن است در بلندمدت موجب انسداد عبور و مرور گردد. در سال‌های اخیر پژوهش‌هایی برای بررسی رفتار سازه‌های بتنی تحت اثر بارهای حرارتی انجام شده است [۱].

چن و همکاران [۲] به بررسی مقاومت فشاری بتن‌های حاوی الیاف فولادی تحت دماهای بالا پرداختند. در پژوهش آن‌ها درصد الیاف فولادی به نسبت حجمی بتن ۰/۵ و ۱/۵٪ می‌باشد. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که تا دمای ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد ۸۵٪ مقاومت بتن حفظ می‌شود و تا دمای ۴۰۰ و ۶۰۰ درجه ۵۹٪ و ۳۱٪ از مقاومت بتن نسبت به حالتی که تحت دما قرار ندارد کاهش یافته است.

فی تائو [۳] در تحقیق خود به مدل‌سازی و تحلیل تأثیر دما بر پوشش بتن الیافی تونل‌های دایره‌ای عمیق در زمین الاستیک پرداخته است. او در این پژوهش تلاش کرده که یک فرمول کلی برای یک تونل دایره‌ای در عمق بسیار بالا در داخل زمین برای بارگذاری حرارتی ارائه نماید. استخراج کردن راه‌حل‌های تحلیلی برای تنش‌ها و جابجایی‌های ناشی از بار حرارتی برای یک تونل دایره‌ای در داخل زمین که در آن محور ناهمسانگردی زمین با جهت انباشته شدن منطبق است از دیگر دستاوردهای پژوهش فی تائو می‌باشد.

استاد حسین و همکاران [۴] به تحلیل عددی تأثیر آتش‌سوزی بر کاهش مقاومت و زمان فروریزش تیر بتن مسلح پرداختند. مهم‌ترین نتیجه تحقیق آن‌ها را می‌توان این‌گونه بیان نمود که گسیختگی و فروریزش تیر بتنی هنگامی اتفاق می‌افتد که دمای میلگرد به بالاتر از ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد برسد.

انصاری و فرزاد [۵] به بررسی تأثیر حرارت و آتش‌سوزی بر رفتار سگمنت‌های بتنی تونل‌های مترو پرداختند. در پژوهش آن‌ها مقاومت بتن سگمنت‌های تونل مترو با پوشش لایه‌ای محافظ در برابر آتش با رفتار سگمنت‌های بتنی تونل بدون پوشش لایه‌ای محافظ، مقایسه شده است.

ژی گوین و همکاران [۶] به بررسی آزمایشگاهی رفتار پوشش بتن مسلح با الیاف فولادی در معرض دماهای بالا پرداختند. آن‌ها در تحقیق خود نتایج آزمایش‌های تجربی جامعی را در مورد رفتار بتن مسلح (RC) و بتن مسلح با الیاف فولادی ارائه نمودند. نتایج تجربی در تحقیق آن‌ها نشان می‌دهد که توزیع دمای غیریکنواخت غیرخطی درون پوشش‌های بتنی باعث انبساط حرارتی غیریکنواخت قابل توجه و تخریب خواص مواد می‌شود.

بررسی مقاطع تونل تحت اثر بارهای غیرمتداول از جمله انفجار و حرارت مدت‌هاست توسط محققان انجام گرفته است. [۶-۱۰] با مراجعه و مطالعه مقالاتی که در زمینه پوشش بتن الیافی توسط پژوهشگرانی نظیر حاجتی و همکاران [۱۱]، قربانی [۱۲] عدل‌پرور و تقوی پارسا [۱۳] صورت گرفته این نتیجه‌گیری حاصل شد که بتن الیافی با درصد حجمی ۰/۵، ۱ و ۱/۵٪ دارای کارایی و دوام بیشتری بوده و از نظر اقتصادی به صرفه نیز می‌باشد.

پیمان و تقوی پارسا [۳۳] در تحقیق خود به تحلیل اثرات انفجاری بر روی تونل‌های زیر زمینی پرداختند. در تحقیق آن‌ها از روش شبیه‌سازی عددی برای تحلیل و شبیه‌سازی اثر انفجار سطحی روی تونل مدفون استفاده شده است. شبیه‌سازی عددی با استفاده از هیدروکد توانمند LS-DYNA انجام گردیده است. به منظور ارزیابی پاسخ دینامیکی سازه در برابر انفجار تحلیل ابعادی شامل اثر وزن خرج انفجاری و عمق سازه مدفون انجام گرفته و موج فشاری پیش‌رونده در خاک، تنش موثر ون مایسز و شتاب بر روی دیواره بررسی گردیده است. برای صحت‌سنجی نتایج به دست آمده از حل عددی با پاسخ‌های حاصل از روابط تحلیلی و آیین‌نامه ای مقایسه شده است.

با وجود پژوهش‌های انجام شده هنوز رفتار پوشش بتن الیافی تونل‌ها بطور کامل روشن نشده است و تحقیقات تجربی و عددی بیشتری نیاز دارد. در این پژوهش با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی رفتار پوشش بتنی تونل‌های بتن الیافی با شکل مقطع‌های مستطیلی، دایره‌ای و نعل اسبی و با درصد الیاف ۰/۵ و ۱/۵٪ تحت اثر بار حرارتی تاریخچه زمانی بررسی شده است. تحلیل پوشش بتنی همراه با محیط پیرامونی سنگ یا خاک دربرگیرنده پوشش بتنی از ویژگی‌های مهم این پژوهش می‌باشد.

۲- مشخصات مصالح و مدل رفتاری مواد

۲-۱- الیاف

رفتار ضد انفجاری و مقاوم در برابر آتش‌سوزی و حرارت بتن الیافی و قابلیت جذب انرژی بالای این نوع بتن خاص به راحتی می‌تواند اهمیت استفاده از این نوع بتن را آشکار سازد.

کامپوزیت‌های سیمانی یا بتن مسلح الیافی به صورت موادی مرکب با دو مؤلفه اصلی شامل الیاف و ملات تعریف می‌شوند. ملات، صرف‌نظر از اینکه خمیر یا بتن باشد، شامل سنگ‌دانه‌ها و مواد افزودنی ویژه است. الیاف نیز دومین مؤلفه اصلی تشکیل کامپوزیت است.

گروه‌های اصلی الیافی که در بتن سازه‌ها استفاده می‌شوند، بر اساس جنس به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

۱- الیاف فولادی با اشکال و قطرهای مختلف و نیز میکرو الیاف فولادی

۲- الیاف شیشه‌ای

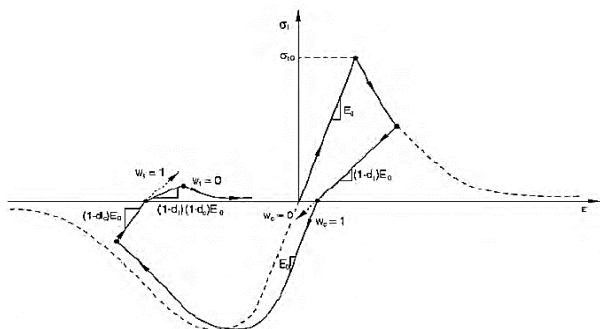
۳- الیاف مصنوعی ساخته شده با مواد مختلف مثل پلی پروپیلن؛

پلی اتیلن، پلی وینیل الکل

۴- الیاف کربن، اکریلونیتریل و ...

الیاف و ملات به سبب وجود پیوستگی با یکدیگر کار می‌کنند که منجر به تشکیل یک کامپوزیت قوی می‌گردد. نقش اصلی الیاف کوتاه پراکنده در کامپوزیت، کنترل بازشدگی و گسترش ترک در ماتریس است. در شکل (۱) رفتار انواع مختلف بتن‌های الیافی و معمولی تحت کشش نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که رفتار سخت‌شوندگی بتن توانمند الیافی، وجه تمایز آن نسبت به سایر بتن‌ها است.

آغاز می‌شود و بتن تحت فشار، خرد می‌شود.



شکل (۲): منحنی تنش-کرنش بتن معمولی و بتن الیافی تحت بارهای کششی و فشار [۱۶]

منحنی تنش-کرنش بتن الیافی در فشار و کشش همانند بتن معمولی است. معادله‌های (۱) و (۲) مربوط به تنش و کرنش بتن هستند:

$$\sigma_t = (1 - d_t) E_0 (\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{PL}) \quad (1)$$

$$\sigma_c = (1 - d_c) E_0 (\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{PL}) \quad (2)$$

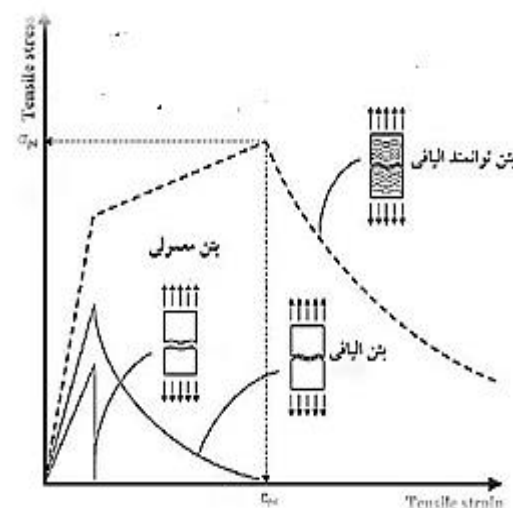
که در آن‌ها ε_c و ε_t کرنش فشاری و کرنش کششی، d_c و d_t ضرایب کاهش مدول کشسانی بتن تحت فشار و کشش، $\tilde{\varepsilon}_c^{PL}$ و $\tilde{\varepsilon}_t^{PL}$ کرنش پلاستیک بتن تحت کشش و فشار، σ_c و σ_t تنش کل بتن تحت فشار و کشش است. E_0 نیز نشان‌دهنده مدول کشسانی بتن قبل از تحمل خسارت است.

۲-۲-۱- مدل رفتاری آسیب پلاستیک بتن (CDP)

معیار گسیختگی در محدوده پلاستیک ماده تحت تنش‌های ترکیبی بیان می‌شود. این معیار به دودسته عمده بر اساس پاسخگویی ماده به فشار هیدرو استاتیک تقسیم‌بندی می‌شود. در اکثر مواد، رفتار شکل‌پذیر بانام وابسته به فشار هیدرو استاتیک شناخته می‌شوند و مواد غیرفلزی مانند خاک، سنگ‌ها و بتن از این دسته بوده و وابسته به فشار هستند. حالت آسیب پلاستیک بتن^۱ یکی از مدل‌های ترکیبی می‌باشد که توسط کاجانوف^۲ ارائه شد و تکمیل بیشتر آن توسط رایوتنوف^۳ و همکاران انجام گرفت. معادله میزان آسیب به شکل زیر است.

$$\sigma = (1 - d) D_0^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{PL}) = D^{el} : (\varepsilon - \varepsilon^{PL}) \quad (4)$$

در این فرمول σ عامل تنش کاجی (Cauchy) می‌باشد، d سنجش‌گر میزان افت سختی متغیر می‌باشد، به همین ترتیب کرنش، D^{el} سختی الاستیک اولیه (آسیب نرسیده) مواد می‌باشد، در



شکل (۱): مقایسه رفتار کششی بتن‌های مختلف [۱۶]

۲-۲-۲- رابطه تنش-کرنش برای بتن

منحنی تنش-کرنش بتن تحت کشش از یک رابطه‌ی خطی تا رسیدن به تنش σ_{t0} (مقاومت کششی نهایی) پیروی می‌کند. از این نقطه به بعد با شروع ترک‌خوردگی‌ها در بتن، شاخه نرم شونده منحنی آغاز می‌شود که با موضعی شدن تنش‌ها و افزایش عرض ترک در یک صفحه همراه است. منحنی تنش-کرنش بتن در فشار نیز تا تنش σ_{c0} (تسلیم اولیه) به صورت خطی پیش می‌رود، سپس مرحله غیرخطی و افزایش منحنی شروع می‌شود و تا نقطه مربوط به تنش σ_{cu} (تنش نهایی) ادامه می‌یابد که همان نقطه‌ی مقاومت فشاری بتن است. از این نقطه به بعد شاخه‌ی نرم شونده‌ی منحنی

¹Concrete Damage Plasticity (CDP)

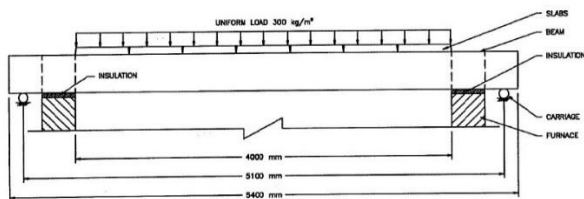
² Kachanov

³ Rabotnov

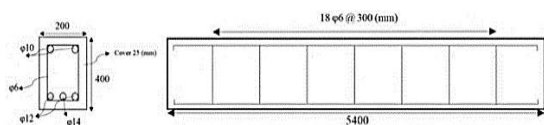
۳- صحت سنجی

برای بررسی اعتبارسنجی نتایج، پاسخ‌های به‌دست‌آمده از تحلیل عددی با نرم‌افزار آباکوس با نتایج تحقیق استاد حسین و همکاران مقایسه می‌گردد [۴]. در شکل‌های (۴) و (۵) مشخصات تیر همراه با شرایط مرزی آن نشان داده شده است.

ابعاد تیر ۲۰۰×۴۰۰×۵۴۰ میلی‌متر می‌باشد. نحوه اتصال تیر با تکیه‌گاه‌های مفصلی و غلتکی در نظر گرفته شده است. فولاد استفاده‌شده در این مطالعه دارای تنش تسلیم ۲۴۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۳۸۰ مگاپاسکال است. بتن به‌کاررفته دارای مقاومت فشاری ۲۰ مگاپاسکال بوده است. در این یک‌بار گسترده به میزان ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمربع از نیم ساعت قبل از شروع آتش‌سوزی تا انتهای آتش‌سوزی بر روی تیرها قرار گرفته شده است. تیر از سه وجه بالا و زیرین و جانبی در معرض آتش قرار گرفته‌اند. در هنگام شروع آتش‌سوزی درجه حرارت محیط برابر با ۲۰ درجه سانتی‌گراد اندازه‌گیری شده است.

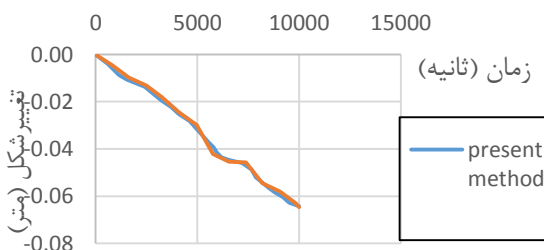


شکل (۴): نحوه بارگذاری و شرایط تکیه‌گاه تیر مورد آزمایش و مدل‌سازی [۴]



شکل (۵): هندسه تیر مورد آزمایش و مدل‌سازی [۴]

در تحلیل‌های انجام‌شده در این پژوهش، مقاومت فشاری بتن ۲۰ مگاپاسکال و گرمای ویژه حجمی برای بتن معمولی برابر با مقدار ثابت ۲/۶ مگاژول بر مترمکعب بر درجه کلون لحاظ گردیده است. همچنین در این پژوهش، مدل رفتاری بتن مدل ترکیبی پلاستیک-خسارت بتن انتخاب شده است.



شکل (۶): تصویر خروجی جابه‌جایی _ زمان

حالی که $D^{el} = (1 - d)D_0^{el}$ به‌عنوان میزان سختی الاستیک افت کرده می‌باشد. تنش مؤثر به شرح زیر تعریف شده است:

$$\bar{\sigma} = D^{el} : (\epsilon - \epsilon^{PL}) \quad (5)$$

در این فرمول ϵ^{PL} کرنش پلاستیک می‌باشد. در فرمول‌بندی لازم است که تغییرات میزان افت مدنظر قرار گیرد.

$$d_c = d(\bar{\sigma}, \epsilon^{PL}) \quad (6)$$

وضعیت ترک در حالت کشش و فشار به‌طور مستقل به دو نوع متغیرهای سختی تقسیم‌بندی می‌شوند $\tilde{\epsilon}_t^{PL}$ و $\tilde{\epsilon}_c^{PL}$ که به ترتیب به کرنش پلاستیک در حالت کشش و فشار عطف می‌شود.

$$\tilde{\epsilon}^{PL} = \begin{bmatrix} \tilde{\epsilon}_c^{PL} \\ \tilde{\epsilon}_t^{PL} \end{bmatrix}, \quad \tilde{\epsilon}^{PL} = h(\bar{\sigma}, \tilde{\epsilon}^{PL}) \cdot \tilde{\epsilon}^{PL} \quad (7)$$

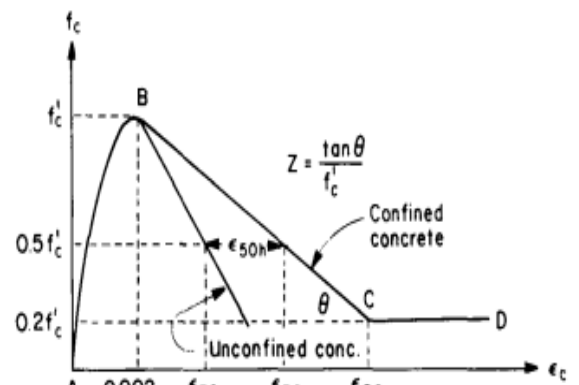
ترک‌خوردگی (کشش) و خوردگی (فشار) نشان داده شده در بتن با افزایش مقادیر سخت‌کننده‌ها (نرم‌کننده‌ها) متغیر می‌باشد. این متغیرها میزان رشد حاصله در سطح جاری‌شدگی و افت‌های ایجادشده در میزان سختی الاستیکی را کنترل می‌نماید.

۳-۲- مدل کنت- پارک برای بتن

جهت مدل‌سازی بتن در تیرها و تونل‌ها از مدل رفتاری بتن محصور و غیر محصور کنت- پارک استفاده می‌گردد. در شکل (۳) نحوه تعریف منحنی رفتار بتن در دو حالت بتن محصور و بتن غیر محصور نشان داده است. رابطه این مدل به‌صورت معادله (۳) است.

$$\sigma_c = f'_c \left[\gamma \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right) - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (3)$$

که در این رابطه σ_c و ϵ_c به ترتیب تنش و کرنش فشاری f'_{CO} و ϵ'_{CO} به ترتیب مقاومت فشاری نمونه استوانه‌ای بتن غیر محصور و کرنش متناظر با آن است که در آن f'_{CO} برابر ۰/۰۲ فرض شده است. برای مدل‌سازی رفتار کششی بتن، مقاومت کششی ده درصد مقاومت فشاری فرض شده است. [۲۷]

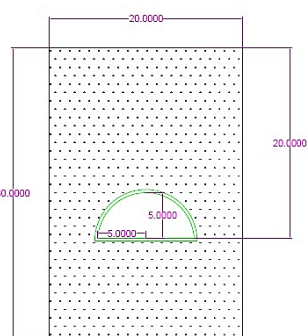


شکل (۳): نمایی از مدل Kent & Park برای بتن غیر محصور و محصور

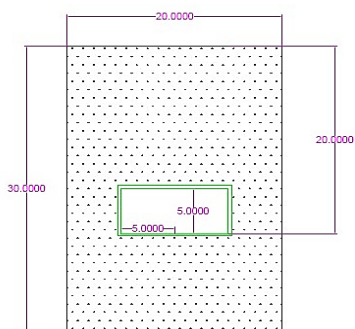
با توجه به نتایج شکل‌های (۷) و (۸) مشخص می‌گردد که عایق تأثیر بسزایی در به تأخیر افتادن افزایش دمای میلگرد دارد. با توجه به این مسئله که افزایش درجه حرارت باعث افت سریع مقاومت فولاد می‌شود استفاده از عایق می‌تواند به نحوه چشمگیری باعث به تأخیر افتادن زمان تخریب اعضا شود.

۴- مشخصات هندسی و مکانیکی

در شبیه‌سازی هندسه‌ی مقطع تونل از المان‌های سه‌بعدی و در شبیه‌سازی خاک از المان سه‌بعدی توپر استفاده شده است. مطابق شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱)، ابعاد المان خاک مستطیلی به ارتفاع ۳۰ متر، طول ۲۰ متر و عمق ۲ متر فرض شد. در پژوهش حاضر، مرکز تونل در عمق ۲۰ متری سطح زمین و تاج تونل در عمق ۱۵ متری سطح زمین فرض شده است. همچنین در این پژوهش ۳ مقطع نعل اسبی و نیم‌دایره و همچنین مستطیلی برای مدل‌سازی تونل انجام شده است تا تأثیر دما بر تونل با پوشش بتن الیافی و همچنین تأثیرگذاری شکل تونل بر دوام آن بررسی شود. دوره زمانی که مدل تحت بار حرارتی است به مدت ۳ ساعت می‌باشد. جهت شبیه‌سازی مصالح خاک در پژوهش حاضر از معیار Clay Plasticity بهره‌جویی گردید. پارامترهای ورودی لازم جهت تحلیل المان‌های شبیه‌سازی شده با این مدل شامل پارامترهای چگالی، ضریب پواسون، چسبندگی، مدول الاستیسیته می‌باشد.



شکل (۹): تونل با مقطع مستطیلی



شکل (۱۰): تونل با مقطع مستطیلی

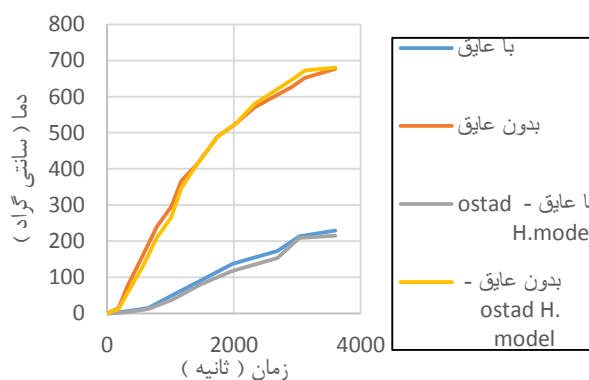
مطابق با شکل (۶) تا زمان ۱۲۰۰ ثانیه رفتار تیر تحت تأثیر نیروی بار گسترده و از آن به بعد به علت تغییر خصوصیات مصالح و افزایش سریع دما، رفتار تیر تحت تأثیر دما و آتش‌سوزی قرار می‌گیرد. همان‌طور که از نتایج بالا مشاهده می‌شود تیر بتن مسلح در نهایت در زمان یکسان شکسته شده است. مهم‌ترین عامل در مسائل آتش‌سوزی زمان شکست و فروپاشی سازه است.

۳-۱- بررسی تأثیر استفاده از عایق در میزان درجه حرارت در تیر بتن مسلح

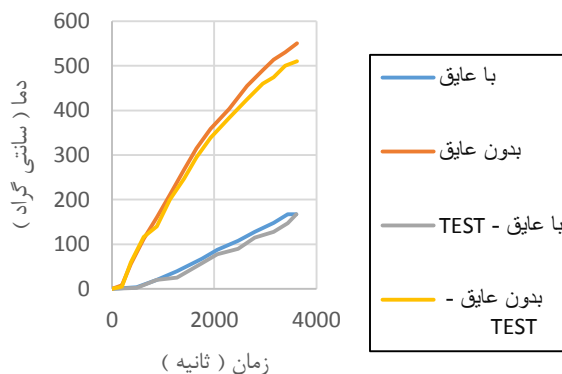
در این قسمت یک‌لایه از عایق پلیمری با خصوصیات مطابق با جدول (۱) و با ضخامت ۵ سانتیمتر استفاده شده است. مقایسه میزان درجه حرارت برای میلگردهای کناری پایینی در هنگام حضور عایق و در هنگام نبود عایق در شکل (۷) و مقایسه میزان درجه حرارت در هنگام عایق‌بندی و غیر عایق‌بندی برای میلگرد وسطی بدون عایق در شکل (۸) نشان داده شده است.

جدول (۱): خصوصیات حرارتی عایق [۴]

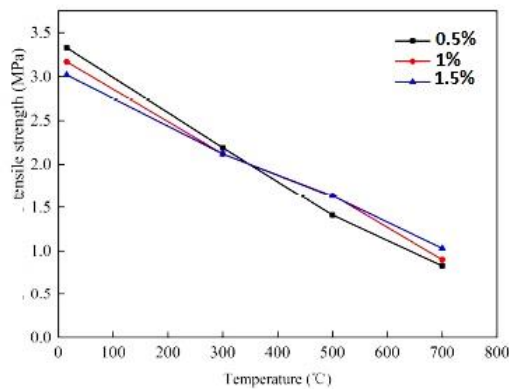
نوع پوشش	چگالی (Kg/m^3)	ضریب هدایت حرارتی ($W/m.K$)	گرمای ویژه ($J/kg.K$)
بتن الیافی	۳۰۰	۰/۱	۱۰۵۰



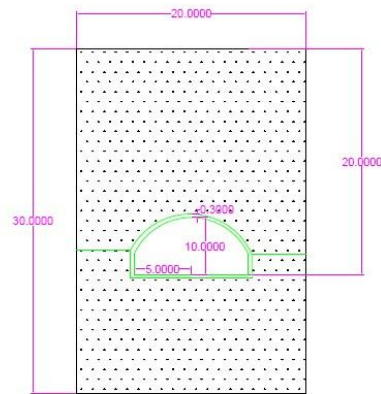
شکل (۷): مقایسه میزان درجه حرارت برای میلگردهای وسطی



شکل (۸): مقایسه میزان درجه حرارت برای میلگردهای کناری پایینی

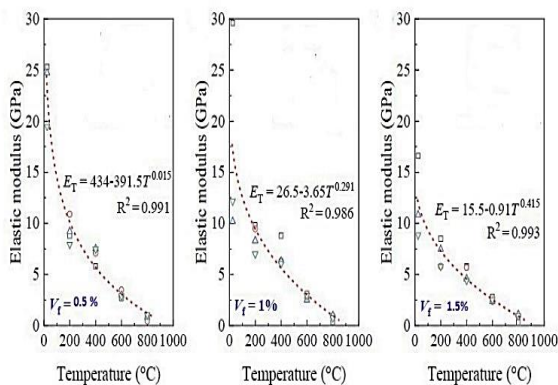


شکل (۱۳): منحنی مقاومت کششی بتن الیافی برحسب دما [۳۲]



شکل (۱۱): تونل با مقطع مستطیلی

اثر دما بر ارتباط مدول الاستیسیته بتن بر اساس روابطی که توسط کنت و همکاران به دست آمده و همچنین در مقاله‌ای که توسط لیانگ لی و همکاران جمع‌آوری شده است در شکل (۱۴) نشان داده شده است.



شکل (۱۴): نمودار مدول الاستیسیته بتن-دما [۳۱]

در جدول (۲) مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل خسارت پلاستیک بتن آورده شده است.

جدول (۲): مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل خسارت پلاستیک

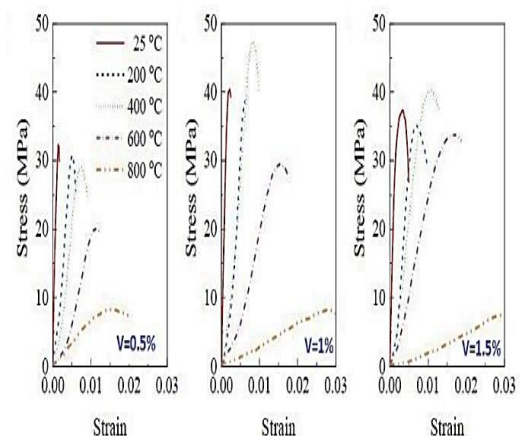
بتن [۳۱]

پارامتر ویسکوزیته	K	f_{b0}/f_{c0}	خروج از مرکزیت	زاویه اتساعی
۰/۰۰۱	۰/۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۰

شکل (۱۵) که نمودار دما _ زمان می‌باشد برگرفته از تحقیق استاد حسین و همکاران [۴] می‌باشد که به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار جهت تأثیر بر المان‌ها اعمال می‌شود.

۱-۴- مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن الیافی

مشخصات فیزیکی و مکانیکی بتن در تحلیل مکانیکی حرارتی باید به صورت تابعی از دما بیان گردد، از مراجع مختلف جمع‌آوری شده و به صورت نمودار یا روابط مربوطه در این بخش ارائه شده است. مشخصات بتن الیافی مدل‌سازی شده برگرفته از شکل‌های (۱۲) و (۱۳) می‌باشد که به صورت ورودی به نرم‌افزار داده شده است. در این اشکال مشخصات مصالح بتن الیافی ۰/۵، ۱ و ۱/۵٪ در پژوهش حاضر جهت شبیه‌سازی المان تونل بیان شده است. شکل (۱۲) میزان مقاومت فشاری نمونه‌های بتن الیافی بر اساس مقاله لیانگ لی و همکاران و برحسب تغییرات دما می‌باشد.



شکل (۱۲): منحنی تنش-کرنش بتن الیافی فولادی تحت فشار برحسب

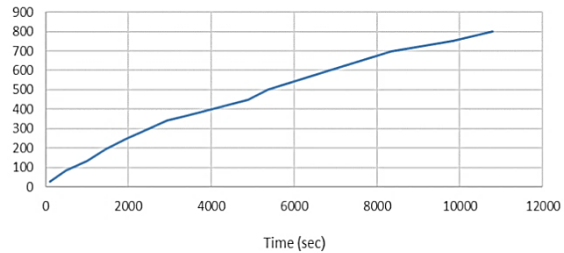
دما [۳۱]

شکل (۱۳) میزان مقاومت کششی نمونه‌های بتن الیافی بر اساس مقاله ژانگ و همکاران و برحسب تغییرات دما می‌باشد.

شروع آتش سوزی درجه حرارت محیط برابر با ۲۰ درجه سانتی گراد اندازه گیری شده است.

۵-۱- مش بندی

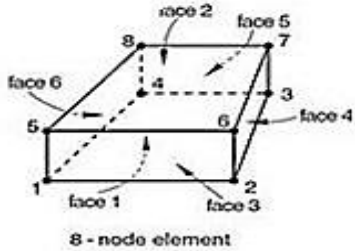
در این تحقیق نوع مش بندی به صورت ۸ گره ای در نظر گرفته شده است.



شکل (۱۵): نمودار زمان - دما جهت اعمال بار حرارتی [۴]

۴-۲- مشخصات ژئوتکنیک خاک اطراف تونل

در این تحقیق برای اعمال مشخصات خاک اطراف تونل از تحقیق عدل پرور و پارسا در خصوص تحلیل و طراحی تونل با پوشش بتن الیافی و مطالعه موردی بر روی تونل خط ۷ مترو استفاده شده است که این اطلاعات در جدول (۳) به نگارش درآمده است.



شکل (۱۶): المان سه بعدی ۸ گره ای solid

جدول (۳): مشخصات ژئوتکنیک خاک اطراف تونل [۱۳]

چسبندگی (Kpa)	زاویه اصطکاک داخلی	نسبت پواسون	مدول الاستیسیته (Gpa)	وزن مخصوص خشک (kg/m3)
۳۱	۲۸	۰/۳۵	۳۵	۱۷۰۰

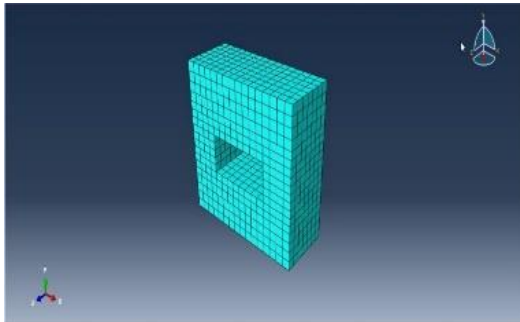
برای تعیین اندازه مش های نمونه ابتدا چند نمونه مش برای مدل تونل با مقطع نعل اسبی مورد ارزیابی قرار گرفته و این نتیجه حاصل شد که هر چه ابعاد مش بزرگ تر باشند خروجی های تحلیل دارای دقت کمتری بوده و نمونه در حالت بحرانی تری قرار خواهد گرفت و هر چه ابعاد مش ریزتر باشد تحلیل دقیق تر خواهد بود. این شرایط برای تونل با مقاطع مستطیلی و نیم دایره نیز صدق می کند. به همین منظور برای مقاطع نعل اسبی و مستطیلی و نیم دایره در این پژوهش ابعاد مش بندی را ۲۰ سانتی در نظر گرفته شده است.

۴-۳- اشکال تونل مدل سازی

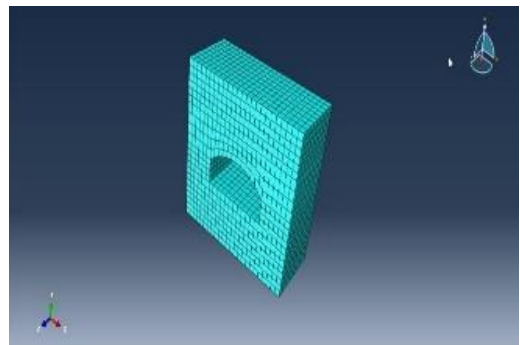
در این تحقیق به بررسی ۳ مقطع تونل با پوشش بتن الیافی برای ۱/۵، ۱ و ۰/۵٪ حجمی الیاف فولادی و تأثیر آن به همراه حرارت بر مقاومت بتن الیافی پرداخته شده است. ابعاد تونل برگرفته از مقاله ای با موضوع تعیین ضریب رفتار پوشش بتنی سازه های زیرزمینی تحت بارگذاری انفجاری که توسط پیمان و همکاران [۲۶] به نگارش درآمده است، می باشد.

۳ مقطعی که در این پژوهش برای تونل ها در نظر گرفته شده است عبارت است از:

- ۱- تونل نیم دایره ای
- ۲- تونل مستطیلی
- ۳- تونل نعل اسبی



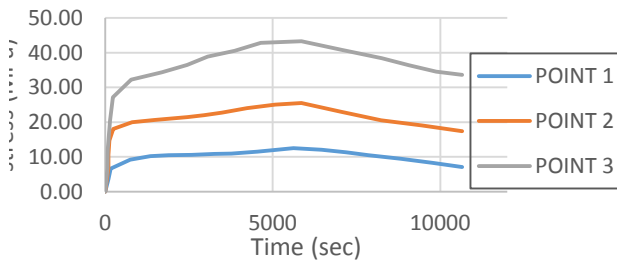
شکل (۱۷): تونل با مقطع مستطیلی



شکل (۱۸): تونل با مقطع نعل اسبی

۵- تعریف بار گذاری

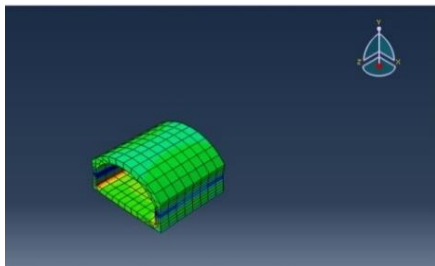
با توجه به امکان عبور و مرور ماشین آلات از کف تونل بار گسترده ای با شدت ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در قسمت داخلی تونل به کف مقطع وارد شده است. همچنین یک بار حرارتی بر اساس بار حرارت - زمان به بدنه داخلی نمونه تونل وارد می شود. این بار حرارتی از ۲۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۳ ساعت بر اساس نمودار تاریخیچه دما_ زمان وارد می شود. همچنین در هنگام



شکل (۲۱): نمودار تنش _ زمان

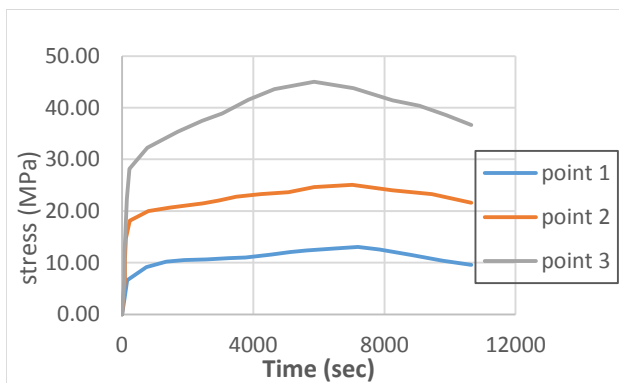
۶-۱-۲- تونل با مقطع نعل اسبی

در شکل (۲۲) نمایی از تونل با مقطع نیم‌دایره به نمایش درآمده که در آن ۳ نقطه در محل‌های محیط جانبی (دیواره‌ی تونل)، کف تونل و نقطه بحرانی (فوقانی) در نظر گرفته شده است تا تأثیر حرارت بر آن‌ها بررسی شود.

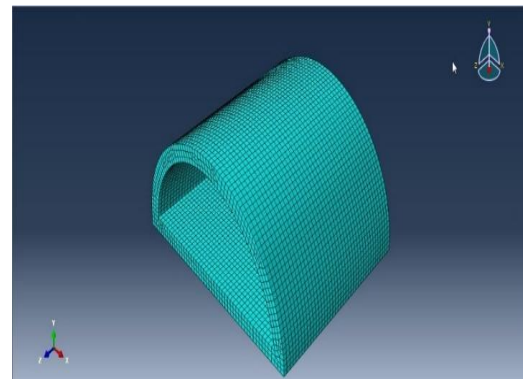


شکل (۲۲): تصویر شماتیک از تونل با مقطع نعل اسبی

در شکل (۲۳) تنش وارد شده به ۳ نقطه فوقانی مقطع، دیواره مقطع و کف مقطع در دماهای مختلف نشان داده شده است. در تونل با شکل نعل اسبی و با پوشش بتن الیافی همان‌طور که مشاهده می‌شود باگذشت زمان و افزایش حرارت؛ تنش افزایش می‌یابد و در حالت بحرانی از زمان ثانیه‌ی ۷۰۰۰ به بعد این تنش در تمامی نقاط دچار یک توقف شده و به‌صورت خطی و نزولی می‌شود.



شکل (۲۳): نمودار تنش _ زمان



شکل (۱۹): تونل با مقطع نیم دایره

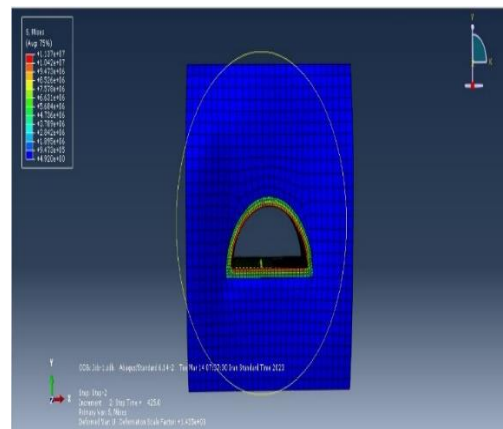
۶-آنالیز نتایج حاصل از خروجی نرم‌افزار

در ابتدا تونل با پوشش ۱/۵٪ حجمی الیاف فولادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مرحله ۳ تونل با مقاطع مختلف تحت بار حرارتی و نیروی استاتیکی قرار می‌گیرد.

۶-۱- تونل با مقاطع مختلف

۶-۱-۱- تونل با مقطع نیم‌دایره‌ای

در شکل (۲۰) نمایی از تونل با مقطع نیم‌دایره به نمایش درآمده که در آن ۳ نقطه در محل‌های محیط جانبی (دیواره‌ی تونل)، کف تونل و نقطه بحرانی (فوقانی) در نظر گرفته شده است تا تأثیر حرارت بر آن‌ها بررسی شود.

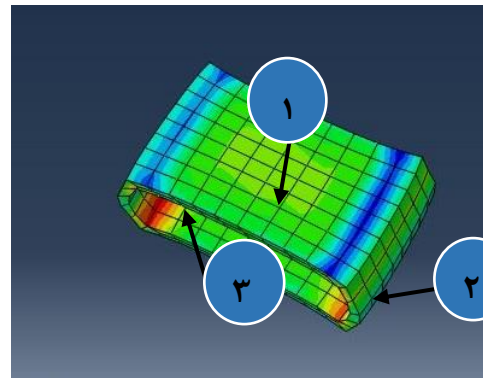


شکل (۲۰): تصویر شماتیک از تونل نیم‌دایره‌ای

در شکل (۲۱) تنش وارد شده به ۳ نقطه فوقانی مقطع، دیواره مقطع و کف مقطع در دماهای مختلف نشان داده شده است. در تونل با شکل نیم‌دایره و با پوشش بتن الیافی همان‌طور که مشاهده می‌شود باگذشت زمان و افزایش حرارت؛ تنش افزایش می‌یابد و در حالت بحرانی از زمان تقریباً ثانیه‌ی ۶۰۰۰ یعنی بعد از ۱۰۰ دقیقه به بعد این تنش در تمامی نقاط دچار یک توقف شده و به‌صورت خطی می‌شود.

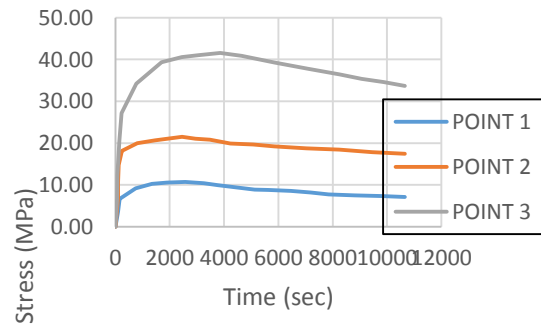
۳-۱-۶- تونل با مقطع مستطیلی

در شکل (۲۴) نمایی از تونل با مقطع نیم‌دایره به نمایش درآمده که در آن ۳ نقطه در محل‌های محیط جانبی (دیواره‌ی تونل)، کف تونل و نقطه بحرانی (فوقانی) در نظر گرفته شده است تا تأثیر حرارت بر آن‌ها بررسی شود.

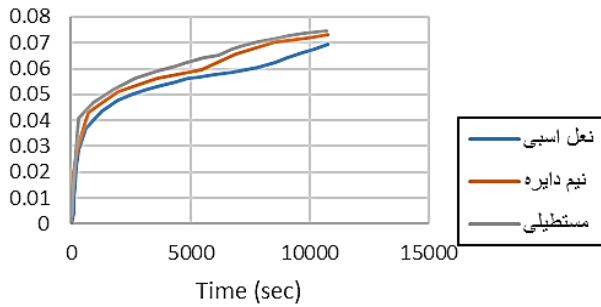


شکل (۲۴): تصویر شماتیک از تونل با مقطع مستطیلی

همان‌طور که در شکل (۲۵) نشان داده شده است در این نمودار تنش‌ها به ترتیب حالت بحرانی و سپس دیواره‌های تونل و در نهایت کف تونل و شرایط افزایشی و صعودی دارند و تا حدود ۶۵ دقیقه این شرایط به طول می‌انجامد اما پس‌از این زمان نمودار کاهش‌ی و شرایط مقاومتی را بتن تقریباً از دست می‌دهد.



شکل (۲۵): نمودار تنش برحسب زمان



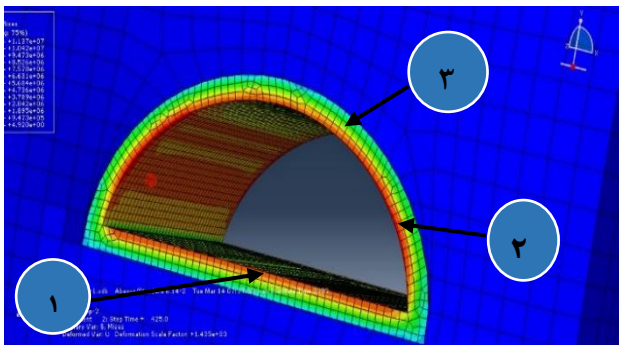
شکل (۲۶): جابه‌جایی _ زمان

۲-۶- تونل با درصد حجمی ۱ درصد

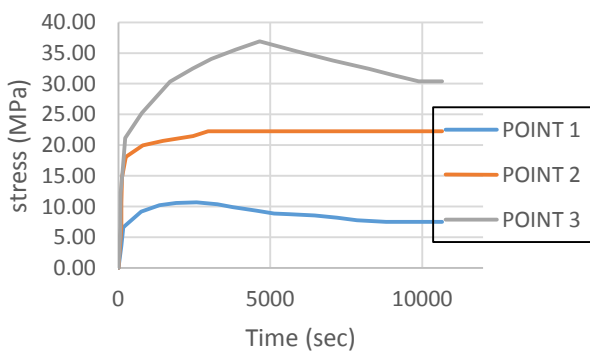
تونل با پوشش ۱ درصد حجمی الیاف فولادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ۳ تونل با مقاطع مختلف تحت بار حرارتی و نیروی استاتیکی قرار می‌گیرد.

۱-۲-۶- تونل با مقطع نیم‌دایره‌ای

در شکل (۲۷) تونل با شکل نیم‌دایره و با پوشش بتن الیافی و ۳ نقطه بر روی آن در دماهای مختلف نشان داده شده است. در شکل (۲۸) باگذشت زمان و افزایش حرارت؛ تنش افزایش می‌یابد و در حالت بحرانی از زمان تقریباً ثانیه‌ی ۵۰۰۰ یعنی بعد از ۸۰ دقیقه به بعد این تنش در تمامی نقاط دچار یک توقف شده و به‌صورت نزولی و سپس خطی می‌شود.



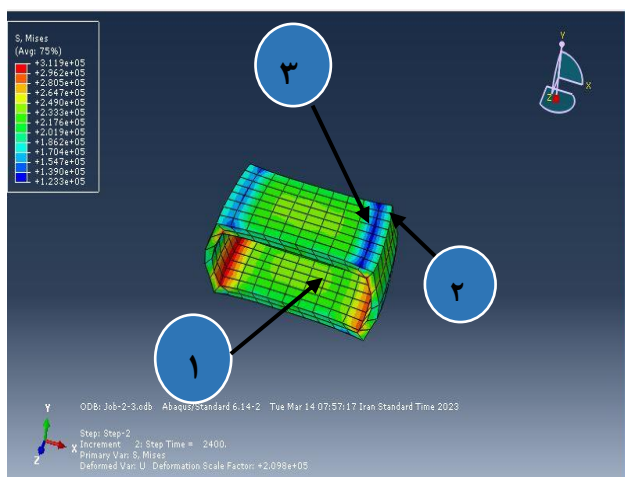
شکل (۲۷): تونل با مقطع نیم‌دایره



شکل (۲۸): نمودار تنش _ زمان

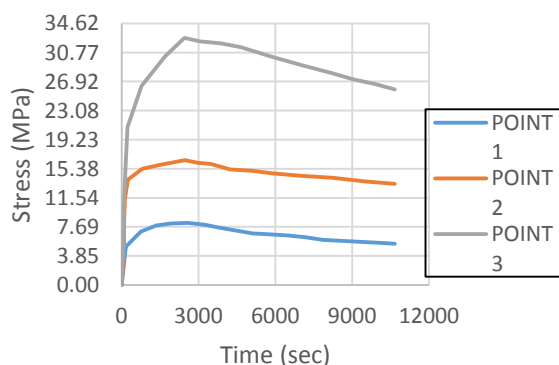
۴-۱-۶- مقایسه نمودارهای جابه‌جایی _ زمان بین مقاطع مختلف تونل

در شکل (۲۶) برای تونل با پوشش بتن الیافی با ۳ شکل نعل اسبی، نیم‌دایره و مستطیلی با درصد حجمی ۱/۵٪ نمودار جابه‌جایی _ زمان در نقطه فوقانی تونل‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲۶) نشان داده شده است میزان تغییر شکل نقطه ماکسیمم در حالت بحرانی در شکل مستطیلی بیشتر از شکل نیم‌دایره و شکل نیم‌دایره بیشتر از شکل نعل اسبی است و این تأثیر شکل بر مقاومت تونل با پوشش بتن الیافی را نشان می‌دهد.



شکل (۳۱): تصاویر شماتیک از مدل سازی تونل

در شکل (۳۲) نمودار تنش‌ها به ترتیب حالت بحرانی و سپس دیواره‌های تونل و در نهایت کف تونل می‌باشد و تا حدود ۵۰ دقیقه شرایط به صورت صعودی به طول می‌انجامد اما پس از این زمان نمودار کاهش و شرایط مقاومتی را بتن تقریباً از دست می‌دهد.



شکل (۳۲): نمودار تنش بر حسب زمان

۳-۶- تونل با درصد حجمی ۰/۵ درصد

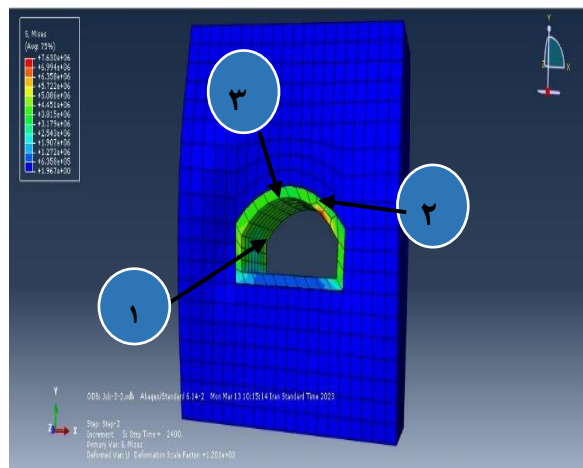
تونل با پوشش ۰/۵ درصد حجمی الیاف فولادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. ۳ تونل با مقاطع مختلف تحت بار حرارتی و نیروی استاتیکی قرار می‌گیرد.

۳-۶-۱- تونل با مقطع نیم‌دایره‌ای

در شکل (۳۳) برای تونل با مقطع نیم‌دایره‌ای ۳ نقطه به ترتیب در محل‌های محیط جانبی (دیواره‌ی تونل)، کف تونل و نقطه بحرانی (فوقانی) در نظر گرفته شده است تا تأثیر حرارت بر پارامترها بررسی شود.

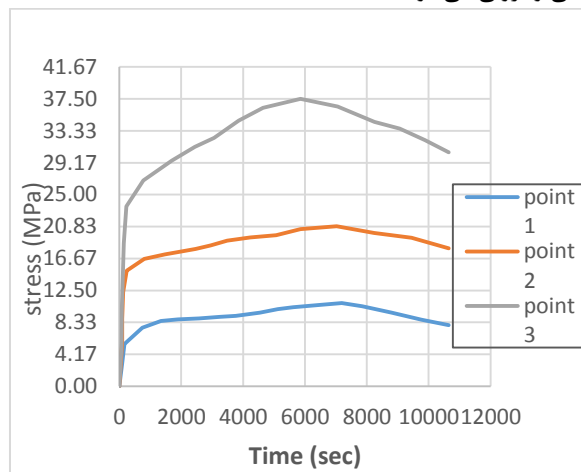
۳-۶-۲- تونل نعل اسبی

در شکل (۲۹) تونل با شکل نیم‌دایره و با پوشش بتن الیافی و ۳ نقطه بر روی آن در دماهای مختلف نشان داده شده است.



شکل (۲۹): نقاط انتخابی تونل با مقطع نعل اسبی

در شکل (۳۰) تنش وارد شده به ۳ نقطه در دماهای مختلف نشان داده شده است. در تونل با شکل نعل اسبی و با پوشش بتن الیافی همان‌طور که مشاهده می‌شود با گذشت زمان و افزایش حرارت؛ تنش افزایش می‌یابد و در حالت بحرانی از زمان ثانیه‌ی ۵۵۰۰ به بعد این تنش در تمامی نقاط دچار یک توقف شده و به صورت خطی و نزولی می‌شود.

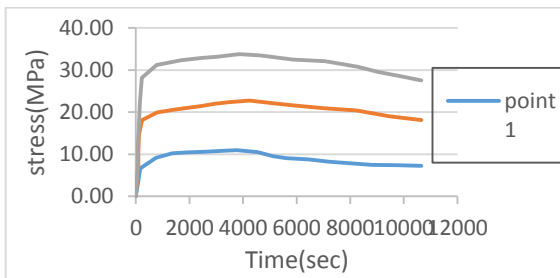


شکل (۳۰): نمودار تنش _ زمان

۳-۶-۳- بررسی تونل با مقطع مستطیلی

در شکل (۳۱) تونل با شکل نیم‌دایره و با پوشش بتن الیافی و ۳ نقطه بر روی آن در دماهای مختلف نشان داده شده است.

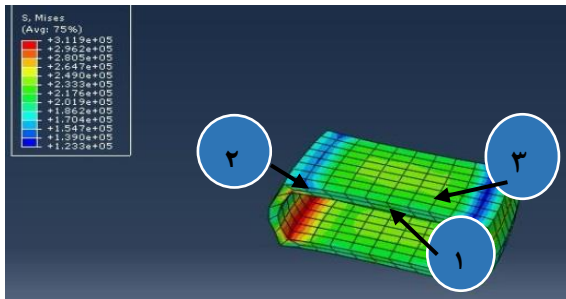
در شکل (۳۶) در تونل با شکل نعل اسبی و با پوشش بتن الیافی همان‌طور که مشاهده می‌شود با گذشت زمان و افزایش حرارت؛ تنش افزایش می‌یابد و در حالت بحرانی از زمان ثانیه‌ی ۴۰۰۰ به بعد این تنش در تمامی نقاط دچار یک توقف شده و به صورت خطی و نزولی می‌شود.



شکل (۳۶): نمودار تنش _ زمان

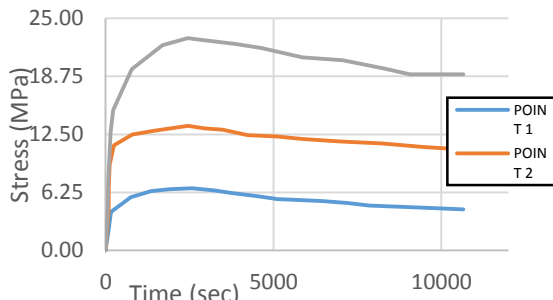
۶-۳-۳- تونل با مقطع مستطیلی

در شکل (۳۷) برای تونل با مقطع نیم‌دایره‌ای ۳ نقطه به ترتیب در محل‌های محیط جانبی (دیواره‌ی تونل)، کف تونل و نقطه بحرانی (فوقانی) در نظر گرفته شده است تا تأثیر حرارت بر پارامترها بررسی شود.

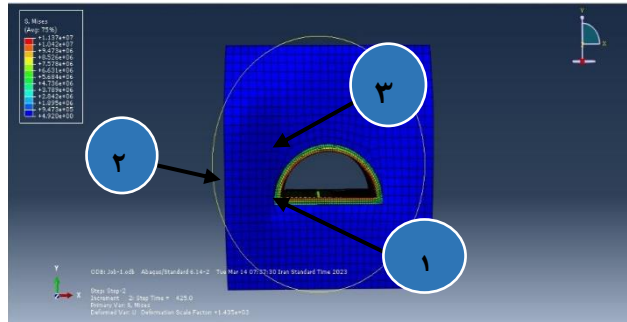


شکل (۳۷): تصاویر نقاط تونل با مقطع مستطیلی

در شکل (۳۸) نمودار تنش‌ها به ترتیب حالت بحرانی و سپس دیواره‌های تونل و در نهایت کف تونل شرایط افزایشی و صعودی دارند و تا حدود ۴۵ دقیقه این شرایط به طول می‌انجامد اما پس‌از این زمان نمودار کاهش می‌شود.

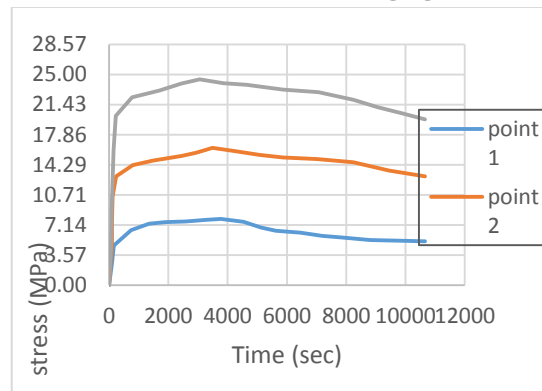


شکل (۳۸): نمودار تنش برحسب زمان



شکل (۳۳): تصاویر شماتیک از مدل‌سازی تونل

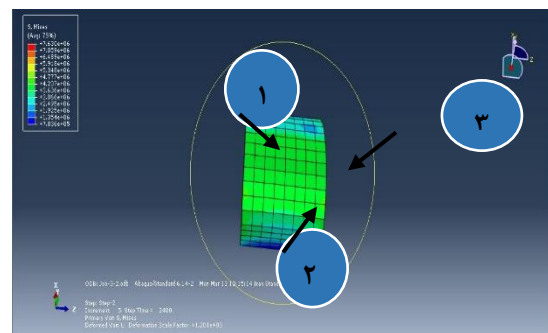
در شکل (۳۴) تنش وارد شده به ۳ نقطه در دماهای مختلف نشان داده شده است. در تونل با شکل نیم‌دایره و با پوشش بتن الیافی همان‌طور که مشاهده می‌شود با گذشت زمان و افزایش حرارت؛ تنش افزایش می‌یابد و در حالت بحرانی از زمان تقریباً ثانیه‌ی ۳۵۰۰ یعنی بعد از ۵۵ دقیقه به بعد این تنش به صورت نزولی و سپس خطی می‌شود.



شکل (۳۴): نمودار تنش _ زمان

۶-۳-۲- تونل با مقطع نعل اسبی

در شکل (۳۵) برای تونل با مقطع نیم‌دایره‌ای ۳ نقطه به ترتیب در محل‌های محیط جانبی (دیواره‌ی تونل)، کف تونل و نقطه بحرانی (فوقانی) در نظر گرفته شده است تا تأثیر حرارت بر پارامترها بررسی شود.



شکل (۳۵): تصاویر شماتیک از مدل‌سازی تونل

۷ - نتیجه گیری

در این تحقیق رفتار مقاومت بتن سگمنت های تونل بتن الیافی در برابر آتش با شکل های نعل اسبی، نیم دایره و مستطیلی مورد بررسی گرفته است و مدل سازی به وسیله روش اجزا محدود با استفاده از نرم افزار ABAQUS انجام شده است و مقایسه را در قالب نمودارهای تنش-زمان، نشان می دهد. در این تحقیق از مشخصات پوشش بتن الیاف فولادی با درصد حجمی ۱/۵٪ استفاده شده است. همچنین در مدل سازی از ویژگی های الیاف فولادی با درصد حجمی ۱ و ۰/۵٪ هم جهت مقایسه با نمونه ۱/۵٪ استفاده شده است و شرایط تأثیر بار حرارت و میزان درصد حجمی الیاف فولادی بر دوام بتن مورد بررسی قرار گرفته است.

طبق نتایج حاصل از نمودارهای شکل های ۲۱-۳۸ هر چه میزان الیاف فولاد در بتن افزایش می یابد مقاومت و دوام بتن در برابر حرارت افزایش می یابد و این نشان از تأثیر مستقیم میزان درصد حجمی فولاد در بتن است.

۱- شکل مقطع بتن کاملاً در مقاومت آن تأثیرگذار می باشد. بهترین نوع شکل مقطع تونل با شکل نعل اسبی می باشد.

۲- در این پژوهش طبق بررسی نمودارها و بر اساس خروجی نمودار شکل (۱۶) با سایر نمودارها این نتیجه گیری حاصل شد که بتن با مقطع نعل اسبی و با پوشش ۱/۵ درصد حجمی فولاد بیشترین مقاومت را دار است.

۳- نتایج تحلیل نشان می دهد همان طور که پیش بینی می شد ضریب انبساط حرارتی بتن الیافی با توجه به ساختار بسیار متراکم آن بیش از بتن معمولی می باشد. بزرگ تر بودن ضریب انبساط حرارتی در بتن الیاف فولادی با ۱/۵ درصد الیاف نسبت به بتن با ۱ درصد الیاف و ۰/۵ درصد الیاف نکته حائز اهمیت می باشد و به نظر می رسد این اختلاف ناشی از تأثیر میزان فولاد مصرفی (الیاف) در بتن می باشد. به عبارت دیگر بیشتر بودن میزان الیاف در بتن باعث افزایش ضریب انبساط حرارتی بتن شده است.

۸ - مراجع

- [3] Tao, Fei, "Effect of temperature on deep lined circular tunnels in isotropic and transversely anisotropic elastic ground" 2016.
- [4] V. Jafari Deligani, H. Ustadhossein, and A. Baghbani, "the effect of fire on the reduction of strength and collapse time of reinforced concrete beams," 12th National Engineering Congress Imran, Tabriz, 2019.
- [5] M. Farzam and I. Ansari, "Examining the effects of fire on the behavior of subway tunnel segments," International conference on civil engineering, architecture and urban planning of contemporary Iran, 2016. In Persian.
- [6] Zhi-guo Yan, He-hua Zhu, J. Woody Ju "Behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete shield TBM tunnel linings exposed to high temperatures", 2012
- [7] F. Pesavento, M. Pachera, B. A. Schrefler. "Coupled numerical simulation of fire in Tunnel", 2018.
- [8] Marcos Martínez, Nathaniel Huygen, John Sanders, Sez Atamturktur, "Thermo-fluid dynamic analysis of concrete masonry units via experimental testing and numerical modeling", Journal of Building Engineering 19 (2018) 80-90.
- [9] Kim, Jang-Ho Jay. Lim, Yun Mook. Won, Jong Pil. Park, Hae Geun. Fire resistant behavior of newly developed bottom-ash-based cementitious coating applied concrete tunnel lining under RABT fire loading. Construction and Building Materials, Journal of science direct, (2010).
- [10] F. Kigha, J. A. Sadeeq, O. S. Abejide, "Effects of Temperature and Concrete Cover Thickness on Residual Strength Characteristics of Fire Exposed Reinforced Concrete Beams," Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH), vol. 34, no. 3, pp. 429 - 437, July 2015,
- [11] S. Hajjati, M. S. Miraalemi, and H. Alizadeh Najd, "experimental and numerical investigation of the behavior of fiber concrete parts used in tunnels," 2019. In Persian.
- [12] A. Ghorbani, "Laboratory and analytical investigation of the effect of steel fibers on the mechanical properties and efficiency of fiber self-compacting concretes," 2021. In Persian.
- [13] M. R. Adel Parvar and M. H. Tagvi Parsa, "Analysis and Design of Tunnel Covered with Fiber Reinforced Concrete Composite Parts- Line 7 Tunnel of Tehran Metro," Transportation infrastructure engineering, 6th year, 2019. In Persian.
- [14] M. R. Kafash Bazari, and S. Behrosh, and S. M. Adham Hashemi, "Evaluation of resistance of steel industrial buildings exposed to fire," 2021. In Persian.
- [15] F. Shamsizadeh, and A. Abu, "Hope of fire modeling in tunnels, 2nd Iran Combustion Conference," Mashhad, 2006, In Persian.
- [16] F. Omid Nasab and M. Afrouznia, "Numerical investigation of the behavior of weak one-way slabs strengthened using reinforced fiber reinforced concrete sheets under blast load," 2019. In Persian
- [1] ACI 544. 7R-16, "Report on design and construction of fiber-reinforced precast concrete tunnel segments," American Concrete Institute, 2016.
- [2] G. M. Chen, Y. H. He, H. Yang, J. F. Chen, and Y. C. Guo, "Compressive behavior of steel fiber reinforced recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures," Construction and Building Materials, vol. 71, pp. 1-15, 30 November 2014..

- [24] M. Naderi and S. Esmalizadeh, "numerical modeling of concrete beams reinforced with CFRP in high temperature conditions," 2018. In Persian
- [25] S. Rahimian and R. Murshid, "Investigation of the effect of thermal loading on the shell of cooling towers", Amirkabir Civil Engineering Journal, (2018), In Persian.
- [26] S. Peyman, M. H. Taqvi Parsa, A. Babaei, and A. Akbari, "Determining the behavior coefficient of concrete cover of underground structures under explosive loading," Amirkabir Civil Engineering Journal, vol. 52, no. 10, pp. 2515 - 2825, 2019, In Persian.
- [27] D. C. Kent and R. Park, "Flexural members with confined concrete," ASCE, Journal of the structural Division,
- [28] H. A. Bassuni Othmna, "Performance of Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete Plates under Impac Loads," Ph.D. Thesis, Ryerson University, Toronto, Canada1971, (2016).
- [29] Long T. Phan, Therese P. McAlliste, John L. Gross, Morgan J. Hurley, "NIST Technical Note 1681," Best Practice Guidelines for Structural Fire Resistance Design of Concrete and Steel Buildings, 2010.
- [30] M. R. Javadizad, "Evaluation of the performance of steel bending frame against fire", Kashan University, 2015, In Persian.
- [31] Liang Li, Renbo Zhang, Liu Jin, Xiuli Du, Jun Wu, Wenhui Duan, "Experimental study on dynamic compressive behavior of steel fiber reinforced concrete at elevated temperatures," Construction and Building Materials, Volume 210, 2019, Pages 673-684,
- [32] Zhang, Luoyi Kang, Juan Wang, Jinjun Guo, Shaowei Hu, and Yifeng Ling, " Mechanical Properties and Explosive Spalling Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Exposed to High Temperature Peng,"
- [33] S. Peyman, M. H. Taghavi Parsa. "Passive Defense Quarterly", 8, 1, 1-12, 2017.
- [17] M. Bandar and A. H. Javadi, and A. Taherian, "Reinforcement of concrete beams using FRP composite fibers," 11th National Conference on Urban Planning, Architecture, Construction and Environment, Shirvan, 2019, In Persian.
- [18] M. Naderi and S. Esmalizadeh, "Ultimate strength of concrete beams reinforced with CFRP under high temperature and freezing conditions," Amirkabir Civil Engineering Journal, 48 (1), pp. 39-52, 2015. In Persian.
- [19] D. Kachlakev, T. Miller, S. Yim, K. Chansawat, and T. Potisuk, "Finite element modeling of reinforced concrete structures strengthened with FRP laminates", Final Report SPR 316, Oregon Department of Transportation & Federal Highway Administration, USA, 2001.
- [20] M. Curbach and F. Jeese, "High-performance Textile-reinforced Concrete," Struct. Eng. Int. 9, 91–289, Reinhardt, W.; Krüger M.; H, GroBe C.; U. (2003). Concrete Restressed with Textile Fabric. Adv. Conc. Technol.1, 9–231.
- [21] A. Hemmati, A. Kheyroddin, and M. K. Sharbatdar, Using HPFRCC for Increasing the Capacity of a R.C. Frame. Sci. J. Manag. Syst. 29–2(3), pp. 97–106, 2013. In Persian
- [22] L. Lim, A. H. Buchanan, P. J. Moss, and J-M. Franssen, "Computer Modeling of Restrained Reinforced Concrete Slabs in Fire Conditions," ASCE Journal of Structural Engineering 130:12 (December 2004) 1964-1971, 2004.
- [23] Ling Zhi Li, Chang Jiu Jiang, Bo Zhou Liu, Zhou Dao Lu, "Shear strengthening of fire-damaged reinforced concrete beams using bolted-side plating," 6th International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading, Guangzhou (Canton), China. Procedia Engineering 210 (2017) 186–195.