



مقاله پژوهشی

مدل‌سازی عددی اثر آتش‌سوزی بر پوشش بتنی تونل با استفاده از روش اجزاء محدود

سید امیررضا صفوی^۱، مهدی حسینی^{۱*}، هانیه خلیلی^۱

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران

(دریافت: خرداد ۱۴۰۲، پذیرش: تیر ۱۴۰۳)

چکیده

حین آتش‌سوزی دمای تونل در مدت کوتاهی به حدود ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد رسیده که منجر به تغییرات زیاد عملکرد در اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای تونل‌ها شده و در نتیجه پایداری تونل را به خطر می‌اندازد. در این پژوهش سعی شد تا با کمک‌گیری از تحلیل عددی به روش اجزاء محدود در نرم‌افزار اباکوس، نحوه رفتار پوشش بتنی تونل در هنگام قرارگیری در شرایط آتش‌سوزی بررسی گردد. پژوهش حاضر پوشش بتنی تونل را تحت تأثیر آتش‌سوزی قرار داده و دمای آن را به حدود ۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد رسانده و رفتار آن را در دمای مذکور بررسی کرده است. سپس با توجه به توصیه آیین‌نامه‌ها در استفاده از بتن‌های الیافی برای کاهش اثرات ناشی از آتش‌سوزی، بتن الیافی از نوع بتن الیاف فولادی، بتن الیاف شیشه و بتن الیاف پلی‌پروپیلن در شرایط آتش‌سوزی مدل‌سازی شده است. با توجه به اثر آتش‌سوزی بر روی تغییر شکل ناشی از کاهش مقاومت کششی بتن، تمرکز پژوهش حاضر بر روی تأثیر آتش‌سوزی بر تنش حرارتی درونی بتن و در نتیجه تغییر شکل دائمی بتن و آسیب ناشی از آن بوده و رفتار آن در چنین شرایطی با رفتار همان بتن در شرایط غیر آتش‌سوزی مقایسه گردیده است. نتایج این پژوهش نشان داد که بهترین عملکرد در مقابل آتش‌سوزی را بتن الیاف فولادی از خود نشان داد. تغییر شکل بتن الیاف فولادی نسبت به بتن فاقد الیاف ۷۵ درصد کاهش یافت. تغییر شکل بتن الیاف پلی‌پروپیلن نسبت به بتن فاقد الیاف کاهش ۱۵ درصدی داشت. تغییر شکل بتن الیاف شیشه نسبت به بتن فاقد الیاف کاهش ۱۰ درصدی نشان داد.

کلمات کلیدی

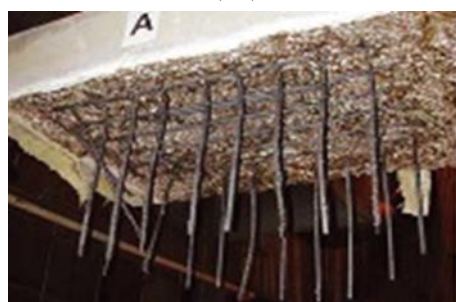
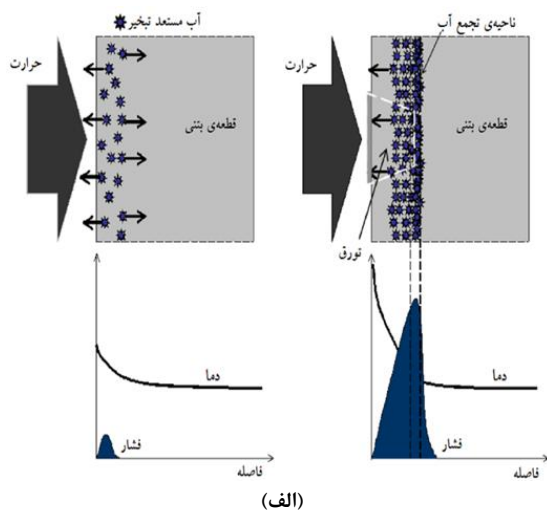
نرم‌افزار Abaqus، آتش‌سوزی، بتن معمولی، بتن الیافی

*عهده‌دار مکاتبات: meh_hosseini18@yahoo.com

DOI: 10.22034/ANM.2024.20194.1597

۱- مقدمه

بخار آب گردد. با شکل‌گیری لایه‌های اشباع از بخار آب یا مخلوطی از بخار آب و آب و به تدریج با هجوم بخار آب از قسمت‌های گرم‌تر بتن، فشار حفره‌ای در این ناحیه از بتن شروع به شکل‌گیری و توسعه می‌کند و به تبع آن تنش‌های کششی در آن قسمت از بتن شکل می‌گیرد. تا جایی که با افزایش میزان حرارت و نفوذ بخار آب در بتن، فشار حفره‌ای و تنش‌های کششی در ناحیه تجمع آب و بخار آب، از حد مقاومت کششی بتن فراتر رفته و منجر به جدا شدن آن قسمت از بتن از قطعه بتنی می‌گردد. شکل ۱ (الف)، نحوه توسعه فشار حفره‌ای، تنش‌های کششی ناشی از افزایش دمای حریق و شکل ۱ (ب) پدیده تورق یا جداشدگی بتن را به نمایش می‌گذارد [۳].



(ب)

شکل ۱: تورق در بتن [۳].

با توجه به گستره آتش‌سوزی در سازه‌ها، راهنمایی‌ها و دستورالعمل‌هایی جهت به حداقل رساندن آسیب‌های ناشی از حریق علی‌الخصوص تورق بتن ارائه شده است. دستورالعمل‌ها اضافه کردن الیاف را به عنوان پیشنهادی جهت بهبود رفتاری این قطعات پیشنهاد کرده‌اند. الیاف در صورتی که به صورت یکنواخت در مخلوط بتنی قرار گیرد، نقش فعالی را در افزایش مقاومت قطعات بتنی سازه‌های

به دلیل تأثیر عظیم تونل‌ها در اقتصاد کشورها وقوع آتش‌سوزی در این سازه‌ها منجر به چالش‌های زیرساختی عظیمی شده که در نتیجه خسارت‌های اقتصادی و جانی فراوان را به دنبال دارد. نرخ افزایش حرارت بالا و میزان رطوبت اولیه زیاد در تونل نسبت به سایر سازه‌ها ریسک ریزش پوشش بتنی را به طور چشمگیری افزایش می‌دهد. خواص مکانیکی بتن نظیر مدول الاستیسیته، ضریب پواسون و همچنین خواص حرارتی مانند هدایت حرارتی، ظرفیت گرمایی، ضریب انبساط حرارتی با افزایش دما کاهش می‌یابند. کاهش خواص مکانیکی در دمای بالا منجر به کاهش مقاومت فشاری و کششی بتن شده که در نتیجه تورق بتن را به دنبال دارد [۱]. برای شناخت پدیده تورق در پوشش بتنی که در اثر آتش‌سوزی اتفاق می‌افتد تجهیزات رفتارسنجی در تونل‌های سراسر دنیا نصب شده‌اند [۲].

در حالت کلی، در بتن دو فاز از مواد مشهود است که فاز جامد آن شامل ترکیبی از سیمان و دیگر مصالح سنگی و افزودنی‌هاست و فاز مایع آن شامل آبی است که در حفرات بتن وجود دارد. با اعمال حریق بر قطعات بتنی علاوه بر واکنش‌هایی که در فاز جامد بتن رخ می‌دهد، در فاز مایع بتن نیز تغییراتی رخ داده و به تدریج فاز گاز در بتن که شامل بخار آب موجود در حفرات است، شکل می‌گیرد. در ساخت قطعات بتنی تونل‌ها عمدتاً از بتن با مقاومت فشاری زیاد استفاده می‌گردد که افزایش مقاومت فشاری بتن کاهش نفوذپذیری و تخلخل بتن را به دنبال دارد. با کاهش نفوذپذیری بتن، فضای عبوری برای سیال آب و بخار آب در بتن کاهش یافته و بتن تحت تأثیر بیشتری از حریق قرار می‌گیرد. معمولاً شروع تبدیل آب موجود در حفره‌های بتن به بخار آب، از دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد شروع شده و به تدریج و با گذر از دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، تمام آب موجود در حفره‌های آن قسمت از بتن، تبدیل به بخار آب شده و شروع به جریان در قسمت‌های داخلی سردتر بتن کرده و در آنجا تجمع می‌کند. با ادامه یافتن حریق و افزایش دما در بتن، نرخ شکل‌گیری و تبدیل آب به بخار آب و در ادامه، مهاجرت بخار آب به لایه‌های داخلی افزایش می‌یابد؛ تا جایی که ذرات بخار آب، قسمتی از درپچه‌های نفوذ بتن را به تسخیر خود درآورده و با اشباع کردن حفرات در آن قسمت از بتن سدهایی ایجاد می‌کنند که مانع از عبور بیشتر

تونل ها بازی می کند. سه نوع الیاف پلی پروپیلن، الیاف شیشه و الیاف فولادی از جمله الیاف های پر کاربرد در صنعت تونل سازی می باشند. اضافه کردن الیاف پلی پروپیلن به بهبود رفتار در برابر حریق بتن کمک قابل توجهی خواهد کرد. الیاف پلی پروپیلن در دمای ۵۰ درجه سانتی گراد خواص مکانیکی خود را از دست داده و در دمای ۱۶۵ درجه سانتی گراد ذوب می شود. دمای ذوب پایین الیاف پلی پروپیلن سبب افزایش منافذ داخلی بتن شده و در نتیجه باعث کاهش فشار منفذی و در نتیجه جلوگیری از تورق بتن می شود [۲]. افزودن الیاف فولادی به بتن، مقاومت فشاری آن را در دمای محیط افزایش می دهد. پس از آتش سوزی مقاومت فشاری باقیمانده بتن به خاطر افزودن الیاف، کاهش می یابد اما انرژی شکست پس از آتش سوزی به طور قابل توجهی بیشتر از مقدار آن، قبل از گرم شدن است. الیاف فولادی، مقاومت کششی را افزایش می دهد که می تواند به کاهش ریسک تورق بتن کمک کند [۱]. الیاف شیشه با عبور دادن بخار آب از درون خود سبب افزایش مقاومت بتن در برابر آتش سوزی می شوند. الیاف شیشه با ترفند به دام انداختن حباب های هوا در بین ترکیبات خود، سبب افزایش خاصیت هدایت حرارتی شده و در نتیجه کاهش فشار منفذی و جلوگیری از تورق بتن را به دنبال دارد [۴].

پیشرفت های قابل توجه در روش های عددی و در دسترس بودن رایانه های قدرتمند موجب شده تا استفاده از نرم افزار هایی که بر پایه روش های عددی مختلف به مدل سازی و تحلیل مسائل مهندسی می پردازند، به طور چشمگیری افزایش یابد. همچنین با توجه به امکانات گسترده مورد نیاز و زمان بر بودن مدل های با مقیاس واقعی در مطالعات آزمایشگاهی، می توان بخشی از این مطالعات را با روش های عددی جایگزین نمود. از سویی دیگر، ناتوانی روش حل دقیق در تحلیل مدل های با هندسه پیچیده یا حل مسائل با شرایط مرزی پیچیده مناسب ترین علت استفاده از روش عددی است.

روش اجزاء محدود یا روش المان محدود که به اختصار FEM نامیده می شود، رایج ترین روش عددی برای حل مسائل مهندسی است. از جمله مزیت های این روش می توان علاوه بر کم هزینه بودن نسبت به روش های آزمایشگاهی، امکان اعمال شرایط مرزی به صورت دقیق و مناسب برای حل مسائل مختلف با آرایش های متنوع المان سازه ای، خواص مصالح گوناگون و سرعت انجام تحلیل و داشتن دقت بسیار بالا در انجام تحلیل را دارد. آباکوس مجموعه ای از برنامه های

شبیه سازی قدرتمند مهندسی است؛ که بر پایه روش اجزای محدود بنا نهاده شده و می تواند مسائلی با طیف گسترده از یک تحلیل خطی نسبتاً ساده تا تحلیل های غیر خطی بسیار پیچیده را حل کند. آباکوس شامل کتابخانه گسترده ای از المان هاست که می تواند هر نوع هندسه ای را به صورت مجازی مدل سازی کند. همچنین این برنامه شامل لیست گسترده ای از مدل های رفتار ماده است که می تواند رفتار اغلب مصالح مهندسی مانند فلزات، لاستیک، پلیمرها، کامپوزیت ها، بتن مسلح، فوم های شکننده و حتی مصالح ژئوتکنیکی مثل خاک و سنگ را نیز شبیه سازی کند.

گستره آتش سوزی در سازه ها و عدم ارائه تئوری های مناسب رفتار سنجی مقاومتی بتن هنگام مواجهه با آتش سوزی و تورق ناشی از آن، موجب گسترش مطالعات قابل ملاحظه ای در زمینه اثر حریق بر پوشش بتنی تونل گردیده است. یان و همکاران (۲۰۱۶) اثر آتش سوزی را بر درزه های پوشش سگمنتی تونل بررسی کردند نتایج نشان داد عملکرد سگمنت های بتنی در برابر آتش بهتر از بتن دارای الیاف فولادی است [۵]. کاندینا (۲۰۰۷) اثر آتش سوزی بر روی قطعه کوچک شده لاینینگ بتنی تونل را مورد بررسی قرار داد [۶]. یاسودا و همکاران (۲۰۰۴) اثر آتش سوزی را بر قطعات لاینینگ بتنی تونل در ابعاد واقعی بررسی کرد [۷]. پاپانیکیولاو و کپوس (۲۰۱۴) به کمک مدل عددی مبتنی بر نرم افزار اجزای محدود آباکوس، اثر حریق را بر پوشش بتنی غیر مسلح تونل بررسی کردند نتایج مدل سازی نشان داد که پس از آتش سوزی، بخش کوچکی از پوشش بتنی بدون ترک باقی مانده است [۸].

افخمی و دهقانی (۲۰۱۹) با معرفی یک مدل جدید مبتنی بر نرم افزار اجزای محدود آباکوس و اعمال انواع منحنی های حریق بر لاینینگ بتنی تونل، اثر اضافه کردن الیاف پلی پروپیلن بر مخلوط بتنی را بررسی کردند نتایج نشان داد اضافه کردن ۲ کیلوگرم پلی پروپیلن در هر مترمکعب بتن باعث کاهش ۷۰ درصدی حداکثر فشار حفره ای شد [۳]. سلین راویکومار و تاندامورسی (۲۰۱۳) به کمک مدل آزمایشگاهی اثر اضافه کردن الیاف شیشه به بتن در برابر حریق را بررسی کرده اند. این پژوهشگران مشاهده کردند مقاومت در برابر آتش بتن حاوی الیاف شیشه بیشتر از بتن معمولی است [۴]. لو و انسون (۲۰۰۶) اثر افزودن الیاف فولادی بر مقاومت فشاری بتن تحت تأثیر حریق را بررسی کردند محققین در این پژوهش ملاحظه کردند بتن

متر حفاری شده است. متغیرهای ورودی به مدل شامل مؤلفه‌های تنش، نسبت پواسون، مدول یانگ، ضریب انتقال حرارت، ضریب انبساط حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه و خواص پلاستیسیته بتن است.

برای مدل‌سازی زمین اطراف سازه تونل، مصالح آن از جنس سنگ‌آهک در نظر گرفته شده است. خواص مکانیکی و حرارتی آن در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: خواص سنگ‌آهک [۱۰]

۲۲۸	مقاومت فشاری (MPa)
۸۳۰	ظرفیت گرمایی ویژه (J/Kg.K)
۳	ضریب انتقال حرارت (W/m.K)
۲۷۰۰	چگالی (Kg/m^3)
1.22×10^{-5}	ضریب انبساط حرارتی ($^{\circ}\text{C}$)

مشخصات مکانیکی و حرارتی لاینینگ بتنی بدون الیاف و بتن‌های الیافی در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲: خواص انواع بتن [۱۱]

نوع بتن	مقاومت فشاری (MPa)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/KgK)	ضریب انتقال حرارت (W/mK)	چگالی (Kg/m^3)	ضریب انبساط حرارتی ($^{\circ}\text{C}$)
بتن فاقد الیاف	۵۶۶	۸۳۲/۴	۲/۸۳	۲۵۷۰	1×10^{-5}
بتن الیاف فولادی	۶۲	۸۳۱/۵	۲/۹۷	۲۵۶۰	7×10^{-6}
بتن الیاف پلی‌پروپیلن	۵۶/۴	۸۳۲	۲/۷۶	۲۵۸۰	9×10^{-6}
بتن الیاف شیشه	۵۶/۶	۸۳۲/۴	۲/۶۷	۲۵۶۰	1.15×10^{-5}

مدل موردنیاز است که شامل متغیر پلاستیسیته، منحنی تنش-کرنش فشاری و کششی تک‌محوره بتن و متغیرهای آسیب در کشش و فشار می‌شود. در ادامه به تعریف هر کدام از پارامترها پرداخته می‌شود.

متغیرهای پلاستیسیته: این دسته متغیرها شامل تابع جریان پلاستیک^۲، تابع تسلیم^۳ و ویسکوزیته^۴ است. تابع جریان پلاستیک: تابع پتانسیل جریان مورد استفاده تابع هیپربولیک دراکر-پراگر است. این تابع در فضای فشار هیدرواستاتیک-تنش انحرافی، تعریف می‌شود. ضابطه کلی این تابع به صورت رابطه (۲) تعریف می‌گردد:

$$G = \sqrt{(\varepsilon \sigma_{r\theta} \tan \psi)^2 + q^2} - p \tan \psi \quad (2)$$

که متغیرهای مورد استفاده در رابطه (۲) به صورت زیر تعریف می‌گردند:

p: فشار هیدرواستاتیک

q: تنش انحرافی میسر که از رابطه (۳) محاسبه می‌گردد:

دارای الیاف فولادی مقاومت بالاتری در برابر آتش نسبت به بتن بدون الیاف دارد [۹].

پژوهش حاضر، با توجه به کمبود تعداد مدل‌سازی‌های عددی صورت گرفته درباره اثر حریق بر روی پوشش بتن الیافی تونل از یکسو و از سوی دیگر نبود پژوهشی جامع در مقایسه سه نوع بتن الیافی رایج در صنعت تونل‌سازی، به مدل‌سازی عددی اثر حریق بر روی پوشش بتن الیاف فولادی و بتن الیاف پلی‌پروپیلن و بتن الیاف شیشه پرداخته و نتایج حاصل از مدل‌سازی بر روی سه نوع بتن را مقایسه کرده است.

۲- مدل‌سازی عددی اثر حریق بر پوشش بتنی

در این پژوهش، به کمک نرم‌افزار آباکوس، تونلی با عرض دهانه ۵ متر و طول ۱۰ متر با ضخامت پوشش بتنی ۵۰ سانتیمتر درون زمینی از جنس آهک با ابعاد ۷۰ متر در ۷۰

همچنین جهت محاسبه مدول یانگ در همه انواع بتن از رابطه (۱) استفاده شده است [۱۲].

$$E = 4700 \sqrt{f_c} \quad (1)$$

که در آن E مدول الاستیسیته برحسب مگا پاسکال و f_c مقاومت فشاری بتن برحسب مگا پاسکال است.

در پژوهش حاضر برای رفتار سنجی بتن، از مدل رفتاری پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده^۱ در کتابخانه مصالح از پیش تعریف شده نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. مدل پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده تنها مدلی است که قابلیت استفاده در تحلیل استاتیکی و دینامیکی را دارا بوده و از آن در شرایطی که بتن تحت بارگذاری‌های مختلف قرار دارد، استفاده می‌شود. مدل پلاستیسیته بتن آسیب‌دیده تعمیم یافته معیار شکست دراکر-پراگر است. در این مدل با استفاده از مفاهیم الاستیک آسیب‌دیده ایزوتروپیک و پلاستیک کششی و فشاری، رفتار غیرخطی بتن بیان می‌گردد [۱۳]. به‌طور کلی سه دسته متغیر برای تعریف این

تابع تسلیم: ضابطه تابع تسلیم مدل گسیختگی بتن به خدمت گرفته شده در این تحقیق همان رابطه پیشنهادی لی و فنوس بود که به صورت رابطه (۴) ارائه می گردد. سطح تسلیم حاصله شبیه سطح تسلیم ویلیام-وارنک خواهد بود [۱۳]:

$$F = \frac{1}{1-\alpha} [q - 3\alpha p + \beta(\varepsilon^{pl}) \cdot (\hat{\sigma}_{max}) - \gamma \cdot (-\hat{\sigma}_{max})] - \sigma_c(\varepsilon^{pl}) = 0 \quad (4)$$

در رابطه (۴) مقدار α ، β و γ از روابط (۵) الی (۷) تعیین می شوند:

$$\alpha = \frac{(\sigma_{bo}/\sigma_{co}) - 1}{2(\sigma_{bo}/\sigma_{co}) - 1} \quad (5)$$

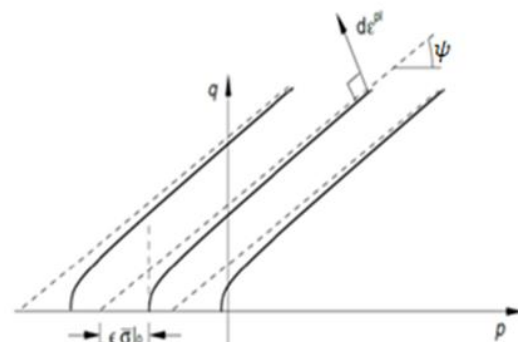
$$\beta = \frac{\sigma_c(\varepsilon_c^{pl})}{\sigma_t(\varepsilon_t^{pl})} (1 - \alpha) - (1 + \alpha) \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{3(1 - K_c)}{2K_c - 1} \quad (7)$$

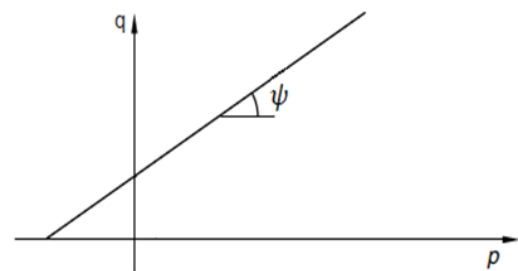
که پارامترهای روابط (۵) الی (۷) عبارتند از: $(\sigma_{bo}/\sigma_{co})$: نسبت تنش فشاری حداکثر دوجوره به یک محوره مقدار این پارامتر بین ۱ تا ۱/۲۷ متغیر است. هر چه این مقدار بیشتر باشد نمونه رفتار سخت تری را از خود نشان خواهد داد. مقدار این پارامتر مطابق پیشنهاد راهنمای نرم افزار برابر ۱/۱۶ در نظر گرفته شده است [۱۳]. نسبت ثابت دوم تانسور تنش روی نصف النهار کششی به مقدار همین پارامتر روی نصف النهار فشاری (K_c): مقدار این پارامتر می تواند بین ۰/۵ تا ۱ باشد. این پارامتر شکل مقطع عرضی سطح تسلیم را تعیین می کند. اگر مقدار این پارامتر برابر ۱ در نظر گرفته شود، شکل مقطع عرضی سطح تسلیم شبیه معیار دراگر-پراگر خواهد شد. برای بتن با مقاومت ۵۰ تا ۶۰ مگا پاسکال بهتر است این پارامتر ۰/۶۶۷ در نظر گرفته شود [۱۳]. ویسکوزیته (μ)، حل المان محدود با تئوری پلاستیسیته مبتنی بر قسمت قبل دارای پتانسیل زیادی برای واگرایی زودرس است. برای حل این مشکل دووات و لیونز پیشنهاد کردند بتن به صورت یک ماده ویسکوپلاستیک^۵ باعث می شود که یک زمان آرامش در به دست آوردن معادلات در هر مرحله وجود داشته باشد که حساسیت حل نسبت به سطح تسلیم را کاهش می دهد. زمان آرامش از طریق اعمال ویسکوزیته در مسئله به وجود می آید

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}} S \cdot S \quad (3)$$

منظور از S بردار تنش انحرافی اصلی است [۱۳]. زاویه اتساع (ψ): این زاویه بین تنش انحرافی میسر و فشار هیدرواستاتیک در تنش محصورشدگی بالا تحت عنوان زاویه اتساع نام برده می شود. این زاویه میزان تغییر حجم بعد از تسلیم را تعیین می کند. توصیه شده است که مقدار این زاویه بین ۲۷ تا ۴۲ در نظر گرفته شود. در تحقیق پیشرو مقدار ۳۰ درجه در نظر گرفته شده است [۱۳]. خروج از مرکزیت (ε): تابع جریان پلاستیک در ابتدا محور هیدرواستاتیک را با زاویه ۹۰ درجه قطع می کند و در ادامه شیب آن شروع به کاهش کرده تا به مقدار ψ برسد (شکل ۲-ب) بنابراین در قسمت اول این تابع به یک منحنی تبدیل خواهد شد. مشتق دوم این منحنی توسط پارامتر ε تعیین می شود. بدیهی است که اگر مقدار این پارامتر صفر در نظر گرفته شود، منحنی تبدیل به یک خط خواهد شد (شکل ۲-ب). تغییر مقدار این پارامتر تأثیر چندانی روی پاسخ کلی ندارد ولی اگر بسیار کوچک در نظر گرفت شود، باعث واگرایی حل در مراحل اولیه خواهد شد. مقدار ε در این تحقیق ۰/۱ در نظر گرفته شده است [۱۳].



(الف)



(ب)

شکل ۲: تابع پتانسیل جریان هیپربولیک در صفحه تنش های نصف النهاری-الف) با خروج از مرکزیت ب) بدون خروج از مرکزیت [۱۳].

در روابط (۱۱) و (۱۲)، f_c مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای بتن، f_t مقاومت کششی بتن برحسب مگا پاسکال و σ_{ti} تنش کششی ترک‌خوردگی بتن برحسب مگا پاسکال و ε_{ti} کرنش کششی متناظر تنش کششی است. واحد تمامی این پارامترها برحسب مگا پاسکال است.

ج) یکی از موارد تأثیرگذار در رفتار کلی سازه‌ها شیب باربرداری است. معمولاً شیب باربرداری برابر با همان مدول الاستیسیته اولیه در نظر گرفته می‌شود. این فرض برای موادی مانند فولاد صحیح است، اما برای بتن به دلیل آسیب‌های وارده بر اثر ترک‌خوردگی و خردشدگی، این شیب از مقدار اولیه کمتر خواهد بود. این ویژگی به‌وسیله معرفی پارامترهای d_c و d_t به‌عنوان آسیب‌های کششی و فشاری اعمال می‌گردد. سختی باربرداری در فشار از ضرب $(1 - d_c)$ و در کشش از ضرب $(1 - d_t)$ در مدول الاستیسیته اولیه به دست می‌آید.

$$\bar{\varepsilon}_c^{pl} = \bar{\varepsilon}_c^{in} - \frac{d_c}{(1 - d_c)} \frac{\sigma_c}{E_0} \quad (۱۳)$$

$$\bar{\varepsilon}_t^{pl} = \bar{\varepsilon}_t^{ck} - \frac{d_t}{(1 - d_t)} \frac{\sigma_t}{E_0} \quad (۱۴)$$

منظور از $\bar{\varepsilon}_t^{pl}$ و $\bar{\varepsilon}_t^{el}$ به ترتیب کرنش‌های برگشت‌ناپذیر و برگشت‌پذیر بتن تحت کشش و $\bar{\varepsilon}_c^{pl}$ و $\bar{\varepsilon}_c^{el}$ تحت فشار می‌باشند. باید توجه داشت که قبل از ایجاد یک فضای زیرزمینی در یک نقطه مشخص، برآیند نیروهای وارد بر آن نقطه، صفر و نقطه مفروض دارای تعادل است. اما هنگامی که یک سازه زیرزمینی حفر می‌گردد وضعیت تنش‌ها تغییر کرده و یک بی‌نظمی در رفتار مکانیکی ناحیه ایجاد می‌گردد. متداول‌ترین روش جهت محاسبه میزان تنش ایجادشده، تئوری ترازایی است که بر اساس ارتفاع تونل مقدار بار زمین را پیشنهاد کرده است. رابطه ترازایی بار عمودی وارده را از طریق رابطه (۱۵) محاسبه می‌کند. رابطه ترازایی بار افقی را نیز به‌صورت ضریبی از بار عمودی در نظر گرفته و از رابطه (۱۶) به دست می‌آید.

$$\sigma_v = \gamma h \quad (۱۵)$$

$$\sigma_h = k \sigma_v \quad (۱۶)$$

که در آن σ_v تنش قائم، σ_h تنش افقی، γ وزن مخصوص زمین، ۲۷۰۰ کیلو نیوتن بر مترمکعب، h ارتفاع

که در نتیجه مشکلات همگرایی تا حدی بهبود می‌یابد. این زمان آرامش باید به حدی کوچک باشد که بر پاسخ کلی سازه تأثیر زیادی نگذاشته و اثرات آن قابل صرف‌نظر کردن باشد. در این تحقیق مقدار مذکور ۰/۰۰۰۱ در نظر گرفته شده است. پارامترهای مورد استفاده برای رفتار پلاستیسیته آسیب‌دیده بتن در جدول ۳ خلاصه شده است [۱۳].

جدول ۳: خواص بتن پلاستیسیته آسیب‌دیده [۱۴]

μ	K_c	$\frac{\sigma_{bo}}{\sigma_{co}}$	ε	ψ
۰/۰۰۰۱	۰/۶۶۷	۱/۱۶	۰/۱	۳۰

ب) رفتار تنش-کرنش فشاری بتن بر اساس رابطه معرفی‌شده توسط پوپوویچ است. در این رابطه، منحنی تنش-کرنش برحسب مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن (f_c) برحسب مگا پاسکال، کرنش نظیر تنش حداکثر (ε_0) و مدول الاستیسیته بتن برحسب مگا پاسکال تعیین می‌گردد. این رابطه به‌صورت رابطه (۸) بیان می‌شود [۱۵].

$$\sigma_c = \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) f_c \frac{n}{n-1 - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) nk} \quad (۸)$$

در رابطه (۸) مقدار ε_0 برای بتن‌های مختلف از ۰/۰۰۲ تا ۰/۰۰۳ متغیر است که در این پژوهش برای بتن با مقاومت حدود ۵۰ تا ۶۰ مگا پاسکال، مقدار ۰/۰۰۲ استفاده شده است. متغیر n را می‌توان به‌عنوان تابعی تقریبی از مقاومت فشاری بتن تعریف نمود که از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد. متغیر k نیز به‌عنوان متغیر مدل در نظر گرفته می‌شود و به کمک رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود [۱۶].

$$n = 0/80 + \frac{f_c}{17} \quad (۹)$$

در رابطه (۹)، f_c برحسب مگا پاسکال است.

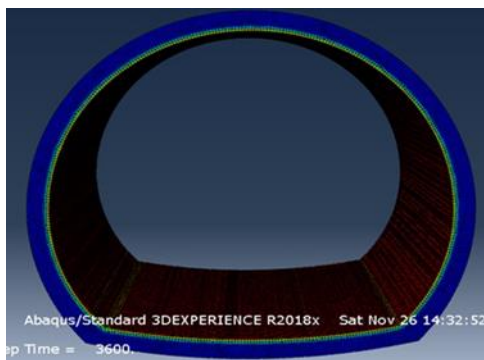
$$K = \begin{cases} 1 & \text{for } 0 < \varepsilon_c < \varepsilon_0 \\ 0.67 + \frac{f_c}{62} \geq 1 & \text{for } \varepsilon_c > \varepsilon_0 \end{cases} \quad (۱۰)$$

رفتار تنش-کرنش کششی بتن برحسب آزمایش وچو محاسبه شده است [۱۵].

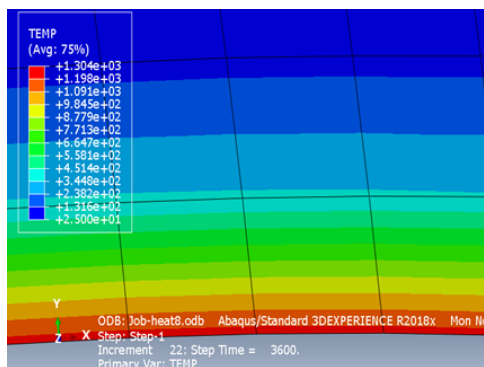
$$\sigma_{ti} = \frac{\bar{f}_t}{1 + \sqrt{200\varepsilon_{ti}}} \quad (۱۱)$$

$$\bar{f}_t = 0.33 \sqrt{f_c} \quad (۱۲)$$

حلگرهای موجود اباکوس، حلگر استاتیکی^۸ انتخاب می شود. همچنین مطابق شکل (۵-الف))، از حرکت جناحین پوشش بتنی و زمین در سه جهت و همچنین در جهت لنگر ناشی از آنها، جلوگیری به عمل آمده است. تماس بین پوشش بتنی تونل و سنگ بستر از نوع Tie انتخاب شده تا از حرکات اضافی پوشش بتنی جلوگیری گردد. مش ها از نوع Sweep تعریف شده است. همچنین جهت نیل به مقصود مطلوب، سائز مش های پوشش بتنی در تحلیل استاتیکی ۱ متر و سائز مش های سنگ ۵ متر انتخاب شده اند. همچنین در تحلیل انتقال حرارت از مش های ۰/۰۵ متری در پوشش بتنی و مش های ۵ متری در سنگ استفاده شده است (شکل ۵-ب)).

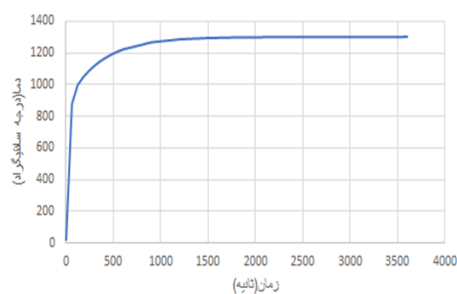


(الف)



(ب)

تغییر دما



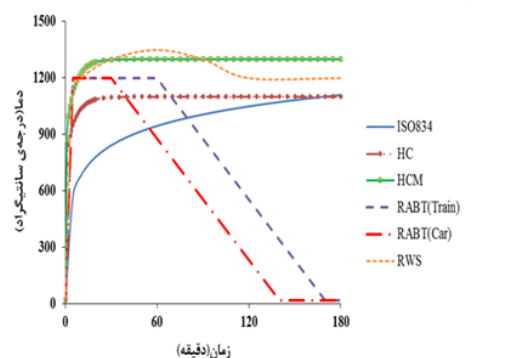
(ج)

شکل ۴: (الف) و (ب) و (ج): دمای پوشش بتنی تونل در اثر حرارت اعمالی.

روباره خاک ۳۰ متر است. k نسبت بار عمودی به بار قائم است که در این پایان نامه ۰/۵ در نظر گرفته شده است. در این پژوهش جهت اعمال آتش سوزی، بدین صورت عمل شده است که ابتدا از بین حلگرهای موجود، حلگر Transfer Heat انتخاب شده و نتایج حاصل از آن به عنوان ورودی ثانویه جهت تحلیل بعدی استفاده می شود. در گام دوم جهت بررسی اثرات مکانیکی آتش سوزی از بین حلگرهای موجود اباکوس، حلگر General, Static انتخاب می شود. مدت زمان حل جهت هر دو حلگر، بر اساس منحنی های حریق، ۳۶۰۰ ثانیه معادل ۱ ساعت در نظر گرفته شده است. بار گرمایی ناشی از آتش سوزی نیز به صورت دما به سطح داخلی اعمال گردیده است (شکل ۳ و ۴ (الف) - (ب) - (ج)). با توجه به حضور گسترده مواد هیدروکربنی مانند نفت و مشتقات آن در تونل ها، شکل ۳، منحنی حریق هیدروکربنی اصلاح شده (HCM) مطابق رابطه (۱۷)، در نظر گرفته شده است [۳].

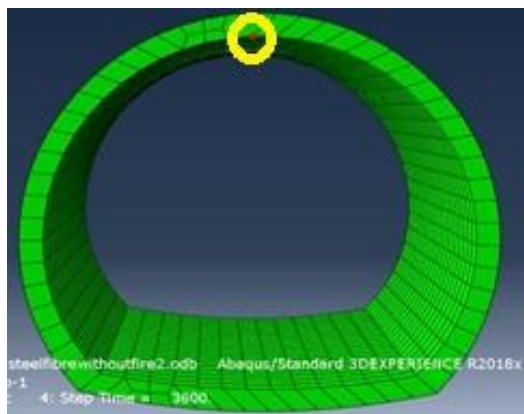
$$T = 20 + 1280 * (1 - 0/325 * e^{-0/167 * t} - 0/675 * e^{-2/5 * t}) \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)، T دمای ناشی از حریق برحسب درجه سانتی گراد که در طول یک ساعت به ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد رسیده و t مدت زمان آتش سوزی برحسب دقیقه است؛ که با توجه به حوادث اخیر زمان کل مدل سازی ۶۰ دقیقه معادل ۳۶۰۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. درواقع برای بررسی آتش سوزی بر پوشش بتنی یک تحلیل ترمومکانیکی انجام شده است.



شکل ۳: انواع منحنی های حریق [۳].

پوشش نگهداری تونل در دو مرحله مورد تحلیل قرار گرفته است. بدین صورت که در مرحله اول جهت اعمال آتش سوزی، از بین حلگرهای موجود، حلگر انتقال حرارت^۷ انتخاب شده و سپس در مرحله آخر نتایج حاصل از آن به عنوان ورودی ثانویه جهت تحلیل بعدی استفاده می شود. در گام دوم جهت بررسی اثرات مکانیکی آتش سوزی از بین

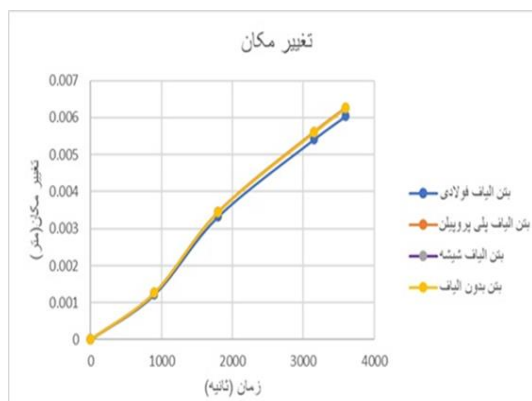


شکل ۶: نقطه انتخابی در مرکز پوشش بتنی تونل.

۳-۱-۱- مدل‌سازی پوشش بتنی بدون در نظرگیری اثر آتش‌سوزی

۳-۱-۱-۱- تغییر شکل پوشش بتنی

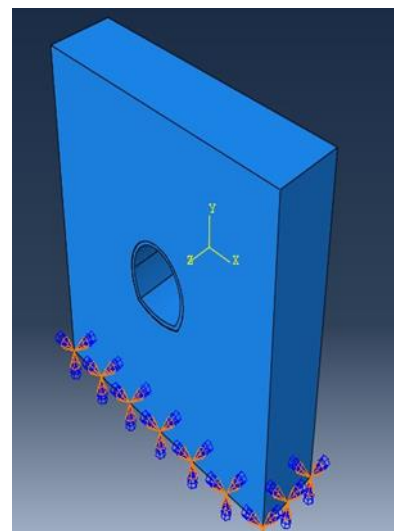
عملکرد بتن بدون الیاف و بتن الیافی بدون در نظرگیری شرایط آتش‌سوزی بسیار مشابه هم است. بررسی دقیق‌تر شکل ۷ نشان‌دهنده عملکرد مناسب پوشش بتنی، هنگام استفاده از بتن الیاف فولادی است.



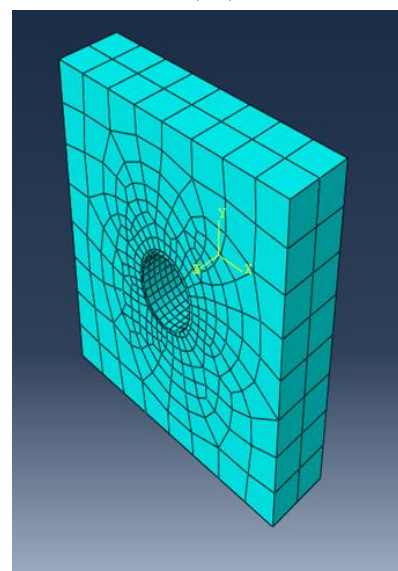
شکل ۷: تغییر شکل در انواع بتن بدون در نظرگیری آتش‌سوزی در نقطه مرکزی پوشش بتنی.

۳-۱-۲- آسیب لاینینگ بتنی

با توجه به تغییر شکل‌های پوشش بتنی (شکل ۷) می‌توان حدس زد که پوشش بتنی تونل به دلیل مدول الاستیسیته بالا، از حالت الاستیک به حالت پلاستیک وارد نشده باشد. با بررسی آسیب وارده بر پوشش بتنی (شکل ۸)، این گمان به‌یقین تبدیل شده و پوشش بتنی دچار آسیب نشده است.



(الف)



(ب)

شکل ۵: (الف) و (ب): نمایی از مدل ساخته‌شده.

۳- نتایج

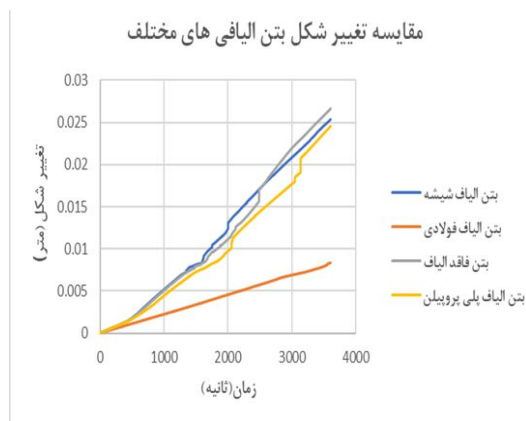
با توجه به اینکه آتش‌سوزی بر روی سنگ‌های اطراف اثری نداشت در این پژوهش فقط اثر آتش‌سوزی روی پوشش بتنی ارائه شده است. با توجه به اهمیت سقف تونل و وارد آمدن بیشینه تغییر شکل در آن قسمت از تونل، نتایج تحلیل در نقطه‌ای واقع در قسمت مرکزی سقف پوشش بتنی تونل بررسی شده است (شکل ۶). نتایج در دو مرحله بررسی شده‌اند. در مرحله اول، پوشش بتنی تونل بدون در نظر گرفتن اثر آتش‌سوزی بررسی گردیده است. سپس در مرحله دوم اثر آتش‌سوزی نیز بر پوشش بتنی تونل اعمال گردیده است.



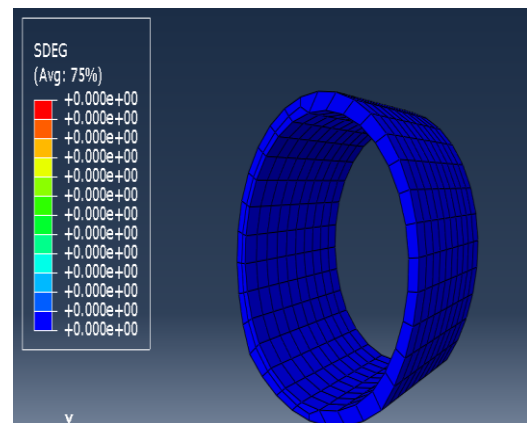
شکل ۹: نتایج حاصل از تحلیل تنش حرارتی در بتن های مختلف در نقطه مذکور، حین آتش سوزی.

۳-۲-۲- میزان تغییر شکل پوشش بتنی

آتش سوزی تأثیر منفی بر بتن گذاشته و باعث تشدید تغییر شکل پوشش بتنی می گردد (شکل ۱۰). با بررسی دقیق شکل ۱۰ می توان نتیجه گرفت که بتن الیاف فولادی کمترین تغییر شکل در حدود ۷ میلی متر را تجربه کرده است. این مزیت بتن الیاف فولادی به دو دلیل برخورداری از مدول الاستیسیته بالا و همچنین ضریب انبساط حرارتی کمتر آن حاصل شده است. همچنین مشاهده می شود که حضور الیاف پلی پروپیلن و الیاف شیشه در بتن کاهش تغییر شکل بتن را نسبت به بتن فاقد الیاف به دنبال داشته است؛ اما به دلیل نزدیکی مقدار مدول الاستیسیته بتن های الیاف شیشه و الیاف پلی پروپیلن به بتن فاقد الیاف، تفاوت تغییر شکل ها بسیار کم است.



شکل ۱۰: نتایج حاصل از تحلیل تغییر شکل در بتن های مختلف در نقطه مذکور، حین آتش سوزی.



شکل ۸: آسیب پوشش بتنی در پایان تحلیل بدون نظریه آتش سوزی.

۳-۲- مدل سازی به همراه در نظریه آتش سوزی

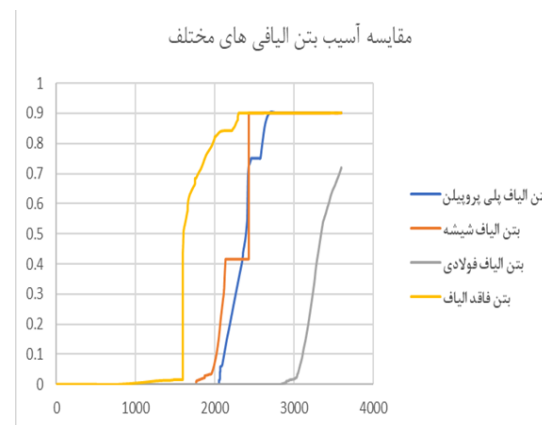
در این مرحله تمامی شرایط اعمالی بر پوشش بتنی تونل کاملاً مشابه مرحله اول بوده و فقط بار آتش سوزی بر آن اعمال گردیده است. گرمای وارده بر پوشش بتنی تونل از جنس بتن های مختلف، به صورت یکسان و مطابق شکل ۴ در نظر گرفته شده است. سپس نتایج آن به صورت داده های اولیه دمایی وارد تحلیل مکانیکی پوشش بتنی شده و تنش حرارتی ایجاد شده ناشی از آتش سوزی و میزان ریزش پوشش بتنی و آسیب ایجاد شده هنگام ریزش سقف پوشش بتنی تونل مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲-۱- تنش حرارتی در پوشش بتنی

با آتش گرفتن پوشش نگهداری تونل، بتن دچار تنش درونی حرارتی شده و این تنش درونی حرارتی آسیب های بعدی را نظیر تغییر شکل دائمی و آسیب پلاستیک را به دنبال دارد. با توجه به شکل ۹ می توان دریافت که بتن الیاف فولادی بیشترین تنش درونی حرارتی را تجربه کرده است. این اتفاق به دلیل تغییر شکل دائمی ایجاد شده در بتن الیاف فولادی است (شکل ۱۰). بتن الیاف فولادی به دلیل تجربه تغییر شکل دائمی کمتر و در نتیجه آزادسازی کمتر تنش درونی، دچار تنش درونی حرارتی بیشتری گردیده است. بتن الیاف پلی پروپیلن به دلیل تحمل تغییر شکل بیشتر نسبت به بتن الیاف فولادی، تنش درونی حرارتی کمتر را تجربه کرده است. سپس به دلیل مشابه، بتن الیاف شیشه تنش درونی حرارتی کمتر را متحمل شده است. بتن فاقد الیاف به دلیل بیشینه تغییر شکل و آزادسازی بیشتر تنش، تنش درونی حرارتی کمتری را تحمل کرده است.

۳-۲-۳- میزان آسیب لاینینگ بتنی

تشدید تغییر شکل پوشش بتنی سبب ایجاد و گسترش آسیب پوشش بتنی تونل می‌گردد. با بررسی شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که بتن فاقد الیاف به دلیل تحمل تغییر شکل زیاد، زودتر از سایر انواع بتن‌ها دچار آسیب گردیده است. پس از آن، بتن الیاف شیشه دچار بیشینه آسیب گردیده است. از سوی دیگر، کمترین آسیب را بتن الیاف فولادی طی آتش‌سوزی تجربه کرده است. به دلیل تغییر شکل کمتر بتن الیاف فولادی در برابر آتش‌سوزی، این بتن آسیب کمتری را تجربه کرده است.



شکل ۱۱: نتایج حاصل از تحلیل آسیب در بتن‌های مختلف در نقطه مذکور، حین آتش‌سوزی.

۴- نتیجه‌گیری

آتش‌سوزی در تونل دارای ویژگی‌هایی نظیر دمای بسیار زیاد، انتقال سریع حرارت، مدت‌زمان طولانی و نرخ غیریکنواخت افزایش دما است. در کنار زوال خواص مکانیکی بتن در تماس با حرارت بالا، تغییر شکل شدید بتن عمده‌ترین نگرانی در مورد ایمنی پوشش بتنی تونل هنگام مواجهه با پدیده آتش‌سوزی است. در این پژوهش، پوشش بتنی تونل به کمک نرم‌افزار اباکوس در مواجهه با آتش‌سوزی به صورت سه‌بعدی مدل گردید. پوشش بتنی تونل در دو حالت مورد بررسی قرار گرفت. حالت اول پوشش تونل از جنس بتن بدون الیاف و پوشش تونل از جنس‌های بتن الیاف فولادی، بتن الیاف پلی‌پروپیلن و بتن الیاف شیشه بدون اعمال بار آتش‌سوزی مدل‌سازی گردید. سپس در حالت دوم آتش‌سوزی نیز بر شرایط مدل افزون گردید. نتایج مدل‌سازی‌ها نشان می‌دهد:

- آتش‌سوزی تأثیر منفی بر روی بتن داشته و سبب ریزش آن می‌گردد.
 - حضور الیاف فولادی تأثیر به سزایی در بتن داشته و کاهش آسیب ناشی از آتش‌سوزی را به دنبال دارد.
 - حضور الیاف فولادی در کاهش تغییر شکل پوشش بتنی تونل تأثیر مناسبی دارد.
- هنگام مواجهه با آتش‌سوزی، پوشش بتن الیاف فولادی کمتر از سایر نمونه‌ها تحت تأثیر است. تغییر شکل بتن الیاف فولادی نسبت به بتن فاقد الیاف ۷۵ درصد کاهش یافت. آسیب و همچنین تغییر شکل پوشش بتن الیاف پلی‌پروپیلن بیشتر از پوشش بتن الیاف شیشه داشته و عملکرد مناسبی را نشان نمی‌دهد. پوشش بتن الیاف شیشه عملکرد بهتری نسبت به بتن الیاف پلی‌پروپیلن از خود نشان می‌دهد. تغییر شکل بتن الیاف شیشه نسبت به بتن فاقد الیاف کاهش ۱۰ درصدی نشان داد. تغییر شکل بتن الیاف پلی‌پروپیلن نیز نسبت به بتن فاقد الیاف کاهش ۱۵ درصدی داشت.

مراجع

- [1] Figueiredo, F. P., Huang, S. S., Angelakopoulos, H., Pilakoutas, K., & Burgess, I. (2019). Effects of recycled steel and polymer fibres on explosive fire spalling of concrete. *Fire Technology*, 55(5), 1495-1516.
- [2] Maraveas, C., & Vrakas, A. A. (2014). Design of concrete tunnel linings for fire safety. *Structural Engineering International*, 24(3), 319-329.
- [3] Afkhami, V. R., & Dehghani, E. (2019). Evaluate Polypropylene Fiber Effect on Concrete Segments of Tunnel under Fire. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 4(4), 89-111 [in persian].
- [4] Ravikumar, C. S., & Thandavamoorthy, T. S. (2013). Glass fibre concrete: Investigation on Strength and Fire Resistant properties. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 9(3), 2320-334.
- [5] Yan, Z. G., Zhu, H. H. and Ju, J. W. 2013. "Behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete shield TBM tunnel linings exposed to high temperatures". *Constr. Build. Mater.*, 38: 610-618.
- [6] Kaundinya, I. 2007. "Protection of road tunnel linings in cases of fire". *Proceedings of the FEHRL/FERSI/ECTRI Young Researchers Seminar*, Brno, Czech Republic, pp. 1-9.
- [7] Yasuda, F., Ono, K. and Otsuka, T. 2004. "Fire protection for TBM shield tunnel lining". *Tunn. Underg. Sp. Tech.*, 19(4-5): 317.

- [13] ABAQUS Inc., ABAQUS/Theory User manual, Version 6.11, 2011
- [14] Díaz, R., Wang, H., Mang, H., Yuan, Y., & Pichler, B. (2018). Numerical analysis of a moderate fire inside a segment of a subway station. *applied sciences*, 8(11), 2116.
- [15] Haj Seiyed Taghia, S. A., Darvishvand, H. R., & Ebrahimi, M. (2021). Utilizing the Modified Popovics Model in study of effect of water to cement ratio, size and shape of aggregate in concrete behavior. *International Journal of Engineering*, 34(2), 393-402.
- [16] Vecchio, F. J., & Collins, M. P. (1986). The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI J.*, 83(2), 219-231.
- [8] Papanikolaou, V. K., & Kappos, A. J. (2014). Practical nonlinear analysis of unreinforced concrete tunnel linings. *Tunnelling and underground space technology*, 40, 127-140.
- [9] Lau, A., & Anson, M. (2006). Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete. *Cement and concrete research*, 36(9), 1698-1707.
- [10] Shen, Y., Yang, Y., Yang, G., Hou, X., Ye, W., You, Z., & Xi, J. (2018). Damage characteristics and thermo-physical properties changes of limestone and sandstone during thermal treatment from- 30 C to 1000 C. *Heat and Mass Transfer*, 54, 3389-3407.
- [11] Nagy, B., Nehme, S. G., & Szagri, D. (2015). Thermal properties and modeling of fiber reinforced concretes. *Energy Procedia*, 78, 2742-2747.
- [12] ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI31808) and Commentary, USA, 2008.

⁵ Viscoplastic⁶ Step⁷ Heat Transfer⁸ Static, General¹ Concrete Damaged Plasticity² Plastic flow³ Yield function⁴ Viscosity