

بررسی اثر تنش ناشی از بارگذاری ترافیکی و گرادیان حرارتی در روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش اجزای محدود

امیرحسین جاجرمی، دانشجوی کارشناسی ارشد راه و ترابری، دانشکده عمران و محیط‌زیست،

دانشگاه تربیت مدرس، تهران

ابوالفضل حسینی*، استاد دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

محمد محمد کریمی، استادیار دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

Email: hassani@modares.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۷ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴

چکیده

سالانه مبالغ زیادی در سراسر جهان هزینه طرح، ساخت و نگهداری روسازی راه‌ها می‌گردد. تعداد زیادی از گسیختگی‌های روسازی در نتیجهی اعمال بارهای مختلف ناشی از وسایل نقلیه، تغییرات محیطی و استراتژی‌های ضعیف نگهداری رخ می‌دهد. یکی از مسائل مهم در روسازی‌های بتنی که باعث ایجاد ترک و کاهش ظرفیت در روسازی بتنی می‌شوند، تنش‌های حرارتی ناشی از گرادیان‌های حرارتی و تنش‌های ترکیبی ناشی از گرادیان حرارتی و بارگذاری ترافیکی است. عواملی نظیر تابش خورشید و تغییر دما باعث ایجاد تنش‌های حرارتی در روسازی می‌شوند. این تنش‌ها به تنهایی و یا به صورت ترکیب با بارگذاری ترافیکی می‌توانند منجر به ایجاد ترک خوردگی در سطوح مختلف روسازی شوند که این ترک‌ها می‌توانند به تدریج موجب خرابی سازه‌ای روسازی بتنی شوند. لذا تحقیق روی پارامترهای مؤثر بر ترک خوردگی بتن امری ضروری به نظر می‌رسد. تا پیش از ظهور روش اجزای محدود، این دسته از پژوهش‌ها توسط نتایج آزمایشگاهی و تجربی انجام می‌گرفت که به دلیل سخت و طاقت‌فرسا بودن آن به مرور زمان جای خود را به روش‌های عددی دادند. در این پژوهش، از نرم‌افزار آباکوس برای مدل‌سازی سه‌بعدی روسازی بتن غلتکی و بررسی پاسخ این روسازی تحت ترکیب بارگذاری ترافیکی و حرارتی استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: روسازی بتن غلتکی، گرادیان حرارتی، تنش‌های ترکیبی، اجزای محدود

۱. مقدمه

یکی از مهمترین اجزای راه، روسازی آن می‌باشد. روسازی یک راه از نقطه نظر هزینه احداث، تعمیر و نگهداری، ترافیک، هزینه استهلاک خودروها و هزینه تصادفات دارای نقش به‌سزایی است. روسازی راه‌ها به طور عمده به دو صورت آسفالتی و بتنی وجود دارند که تحت بار چرخ خودروها عملکرد متفاوتی دارند. تصمیم‌گیری در مورد انتخاب نوع روسازی در یک پروژه خاص، مستلزم وجود اطلاعات و ابزار لازم برای انجام مقایسه‌ای اصولی بین این دو نوع روسازی می‌باشد.

در روسازی راه‌ها، لایه رویه نقش حفاظت از جسم راه و انتقال تنش‌ها از لایه‌های فوقانی به لایه‌های زیرین را دارا می‌باشد. یکی از عوامل ایجاد تنش در روسازی‌های بتنی، گرادیان‌های حرارتی می‌باشند که می‌توانند به تنهایی یا به صورت ترکیب با تنش‌های ترافیکی وسایل نقلیه عبوری از روسازی باعث ایجاد ترک در سطح روسازی و کاهش کیفیت و عملکرد آن شوند (هوانگ، ۱۹۹۳).

با رشد روز افزون تعداد وسایل نقلیه در جهان و افزایش خرابی‌ها و هزینه‌های تعمیر و نگهداری در روسازی، تلاش برای کاهش یافتن و کنترل تنش‌ها به عنوان عامل ایجاد کننده ترک در روسازی، امری ضروری به نظر می‌رسد. از جمله ترک‌های موجود در روسازی‌های بتنی، ترک‌های حرارتی بوده که هم در زمان گیرش بتن سطح رویه و هم در زمان بهره‌برداری از روسازی، به تنهایی یا به صورت ترکیبی با بار ترافیک، باعث ایجاد خرابی و افت قابلیت خدمت روسازی می‌شوند (شاهین، ۱۹۹۴).

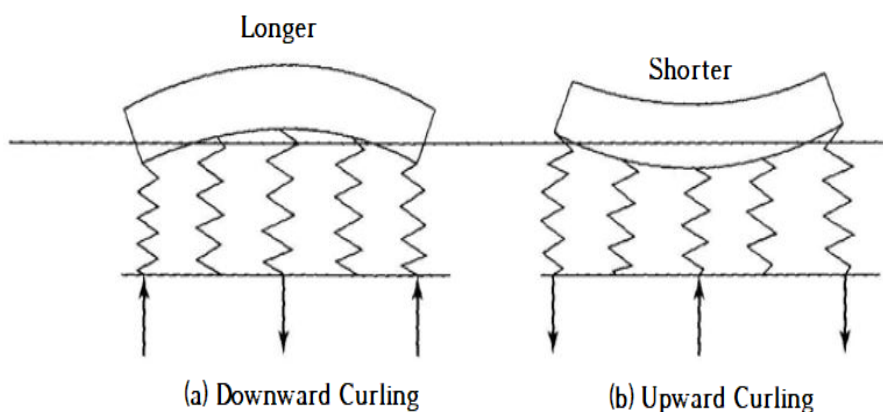
امروزه، با پیشرفت علم و درک بیشتر از رفتار مصالح و توسعه مدل‌های پیش بینی رفتار سازه‌ها از یک طرف و افزایش سرعت رایانه‌ها از طرف دیگر باعث گسترش استفاده از روش‌های مکانیستیک در طراحی روسازی‌ها گردیده است. تحلیل به کمک روش المان محدود از جمله

روش‌های تحلیل مکانیستیک است که به طور گسترده‌ای مورد توجه محققین علم روسازی قرار گرفته است (زدیری و همکاران، ۲۰۰۹). در پژوهشی، تنش‌های وارده از روسازی بتنی به خاک بستر با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس بررسی شده است. در تشکیل مدل، از ضخامت بستر و مدول‌های الاستیسیته مختلف بهره گرفته شده است. نتایج نشان داد که کرنش‌های فشاری روی خاک بستر در داخل تونل به عنوان مهمترین عامل خرابی روسازی بتنی در محل عبور بار سنگین وسایل نقلیه می‌باشد. همچنین، مهمترین عامل کرنش‌های فشاری، ضعف بستر در روسازی می‌باشد، که ممکن است از میزان تنش فشاری مجاز یا محدوده کرنش مجاز روسازی بیشتر باشد و باعث ایجاد نشست بیش از حد در سطح دال بتنی گردد (خبیری و همکارانف ۱۳۹۸). در پژوهشی، مدل سه‌بعدی المان محدود برای بررسی تأثیر نوع سنگ‌دانه‌ها در میزان نیروی محوری لازم برای بازشدگی درز در روسازی‌های بتنی، با استفاده از برنامه شبیه‌ساز Abaqus مورد استفاده قرار گرفت. برای مدل‌سازی داول و بتن از المان‌های نوع Solid آجری دارای ۸ گره استفاده شده است. شبیه‌سازی رفتار پلاستیک بتن با استفاده از مدل Concrete Damage Plasticity انجام شده است. تماس بین سطح خارجی داول و بتن اطراف آن از نوع تماس سطح با سطح در حالت سخت مدل شده است. آنالیز در حالت Explicit انجام گرفته است. اثر سنگ‌دانه‌ها با در نظر گرفتن تأثیر آن‌ها در ضریب انبساط حرارتی بتن مد نظر است. مدل اصلی شامل یک بلوک بتنی و یک داول است که داول از درون آن بیرون کشیده می‌شود. نتایج نشان داد که با افزایش ضریب انبساط حرارتی بتن با تغییر نوع سنگ‌دانه‌ها، نیروی محوری لازم برای بازشدگی درز افزایش می‌یابد (خاکی و آزادروش، ۱۳۸۹). هدف اصلی پژوهشی، بررسی و بهینه‌سازی اجرای روسازی بتنی است که در پروژه بهسازی روسازی آسفالتی بین ایالتی با استفاده از شبیه‌سازی انجام می‌شود. برای دستیابی به این هدف، داده‌های میدانی در حین ساخت جمع‌آوری شد و به کمک نتایج

۲. تاب‌خوردگی ناشی از تغییرات دما در

روسازی بتنی

در طول روز، وقتی دما در بالای دال بیشتر از پایین است، قسمت فوقانی دال نسبت به محور خنثی تمایل به انبساط دارد. در حالی که قسمت تحتانی دال تمایل به انقباض دارد. ولی وزن دال از انقباض و انبساط آن جلوگیری می‌کند. بنابراین، تنش‌های فشاری در قسمت فوقانی و تنش‌های کششی در قسمت تحتانی دال به وجود می‌آید و دال به سمت بالا تاب‌خوردگی پیدا می‌کند. در شب، هنگامی که دما در بالای دال کمتر از پایین دال است، قسمت فوقانی دال تمایل به انقباض نسبت به قسمت تحتانی دال دارد. بنابراین، تنش‌های کششی در قسمت فوقانی و تنش‌های فشاری در قسمت تحتانی دال به وجود می‌آید و دال به سمت پایین تاب می‌خورد. شکل ۱، این تاب‌خوردگی‌ها را در دال بتنی نشان می‌دهد (هوانگ، ۱۹۹۳).



شکل ۱. تاب‌خوردگی ناشی از تغییرات دما در دال بتنی

این بارگذاری‌ها عبارتند از وسط، گوشه و لبه دال. روابط (۱) و (۲) به ترتیب برای محاسبه تنش کششی و تغییرشکل قائم دال در حالت مرکز دال، روابط (۳) و (۴) به ترتیب برای محاسبه تنش کششی و تغییرشکل قائم در گوشه دال و روابط (۵) و (۶) به ترتیب برای محاسبه

آزمایشگاهی، یک مدل شبیه‌سازی توسعه یافته مدل‌سازی شد. پس از انجام آزمایش و صحت‌سنجی با مدل ارائه شده، از مدل توسعه یافته برای بررسی تأثیرات منابع در جریان عملیات اجرای روسازی و مقرون به صرفه بودن روند ساخت استفاده شد. نتایج نشان داد که استفاده از روش‌های شبه‌سازی در عملیات روسازی بتنی موفقیت‌آمیز بوده و دقت آن در مقایسه با اندازه‌گیری‌های میدانی قابل قبول است (حسن و گرویر، ۲۰۰۸).

در این پژوهش، ابتدا با استفاده از نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس، مدل‌سازی روسازی بتن غلتکی تحت شرایط صرفاً ترافیکی به صورت استاتیک انجام شده و سپس برای بحرانی‌ترین حالات این مرحله، گرادیان‌های حرارتی به صورت همزمان با بار ترافیکی استاتیک به روسازی بتن غلتکی وارد می‌شوند. اعتبارسنجی مدل‌سازی نیز با استفاده از روابط تحلیلی انجام می‌شود. نوآوری این پژوهش، مدل‌سازی سه‌بعدی روسازی بتنی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس با در نظر گرفتن بارگذاری و اعمال گرادیان حرارتی می‌باشد.

۳. روابط تنش و کرنش در روسازی بتنی

نخستین روابط تحلیلی برای تنش و کرنش در روسازی بتنی توسط وسترگارد ارائه شد. در این روابط سه بارگذاری بحرانی برای روسازی در نظر گرفته می‌شود.

محدود از معادله فوریه برای حل مسائل انتقال حرارت استفاده می‌کنند که آباکوس نیز با حل این معادله دیفرانسیلی مسائل انتقال حرارت را حل می‌کند.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (10)$$

که در این رابطه، ρ چگالی ماده (kg/m^3)، C گرمای ویژه ماده ($J/kg^\circ C$)، k رسانایی حرارتی ماده ($W/m^\circ C$) می‌باشد (فامیلی و وفائی، ۲۰۱۶).

۴. ارزیابی استفاده از اجزای محدود در

تحلیل روسازی‌های بتنی

روش اجزای محدود یا روش المان محدود، روشی است عددی برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل جزئی و نیز حل معادلات انتگرالی. اساس کار این روش حذف کامل معادلات دیفرانسیل یا ساده‌سازی آنها به معادلات دیفرانسیل معمولی، که با روش‌های عددی مانند اویلر حل می‌شوند، می‌باشد. استفاده از این روش در تحلیل روسازی‌های بتنی پیشینه طولانی دارد که در اینجا به طور خلاصه پژوهش‌های صورت گرفته با این روش بیان می‌شود.

در پژوهش انجام گرفته توسط مایترا در سال ۲۰۱۳ روشی برای ارزیابی تنش‌های بحرانی ناشی از گرادیان‌های حرارتی و بارهای محوری در روسازی‌های بتنی درزدار بر اساس روش اجزای محدود ارائه شد. روش کلی برای تخمین تنش‌های بحرانی با توجه به ترکیبات مختلف، بارهای محوری و گرادیان دما توسعه یافته است. این روش را می‌توان به طور مؤثر برای به دست آوردن تنش‌های بحرانی در روسازی بتنی برای هر ترکیبی از بار محوری و گرادیان دمای غیرخطی بدون انجام یک تجزیه و تحلیل عددی دقیق استفاده کرد. در این پژوهش، مقایسه بین دو روش IRC و BRADBURY برای تخمین تنش‌های بحرانی در روکش بتنی به وسیله تأثیر همزمان

تنش کششی و تغییرشکل قائم در لبه دال استفاده می‌شوند:

$$\sigma = \frac{3(1+\nu)P}{2\pi h^2} \left(\ln\left(\frac{l}{b}\right) + 0.6159 \right) \quad (1)$$

$$\Delta = \frac{P}{8kl^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{a}{2l}\right) - 0.673 \right] \left(\frac{a}{l} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

with $b=a$ if $a \geq 1.724h$

$$b = \sqrt{1.6a^2 + h^2} \quad \text{if } a \leq 1.724h$$

$$\sigma = \frac{3P}{h^2} \left[1 - \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right] \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{P}{kl^2} \left[1.1 - 0.88 \left(\frac{a\sqrt{2}}{l} \right) \right] \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{3(1+\nu)P}{\pi(3+\nu)h^2} \left[\ln\left(\frac{Eh^3}{100ka^4}\right) + 1.84 - \frac{4\nu}{3} + \frac{1-\nu}{2} + \frac{1.18(1+2\nu)a}{l} \right] \quad (5)$$

$$\Delta = \frac{\sqrt{2+1.2\nu}P}{\sqrt{Eh^3k}} \left[1 - \frac{(0.76+0.4\nu)a}{l} \right] \quad (6)$$

$$l = \left[\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)k} \right]^{0.25} \quad (7)$$

که در این روابط، σ تنش کششی زیر دال، Δ تغییرشکل زیر دال، l شعاع سختی نسبی دال (متر)، P مقدار بار متمرکز وارده (نیوتن)، h ضخامت دال بتنی (متر)، k مدول بستر (MPa/m)، E مدول الاستیسیته لایه بتنی و ν ضریب پواسون لایه بتنی می‌باشد (فامیلی و وفائی، ۲۰۱۶). همچنین، وسترگارد (۱۹۲۷) روابط (۸) و (۹) را به صورت فرم بسته برای محاسبه تنش‌های حرارتی با فرض خطی بودن گرادیان در عمق دال ارائه نمود:

$$\sigma_x = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu^2)} (C_x + \nu C_y) \quad (8)$$

$$\sigma_y = \frac{E\alpha\Delta T}{2(1-\nu^2)} (C_y + \nu C_x) \quad (9)$$

که در روابط بالا، σ تنش حرارتی در راستای مورد نظر، E مدول الاستیسیته لایه بتنی، ν ضریب پواسون لایه بتنی، ΔT اختلاف دمای بالا و پایین دال و C_x و C_y به ترتیب ضرایب اصلاحی در راستای X و Y هستند (تن و همکاران، ۲۰۱۸).

برای انتقال حرارت به صورت گذرا، نرم‌افزارهای اجزای

فرودگاه که از دو بخش آسفالت داغ و رویه بتنی تشکیل شده پرداخته شد. در این تحقیق، از روش اجزای محدود برای بررسی عواملی همچون دما، چسبندگی لایه‌های مختلف روسازی و میزان بارگذاری استفاده شد. اندازه گیری‌های تنش و حرارت در شرایط واقعی (مقیاس یک به یک) با استفاده از ۲۰ گیج کرنش‌سنج و ۳۲ گیج حرارت‌سنج نصب شده در سطح روسازی انجام گرفت و از این داده‌ها برای اعتبارسنجی مدل اجزای محدود ارائه شده برای روسازی استفاده شد. نتایج بیان کرد که کرنش‌های طولی بحرانی‌تر از کرنش‌های عرضی بوده و عامل حرارت تأثیر زیادی روی پاسخ‌های بحرانی روسازی ندارد. همچنین، وجود چسبندگی خوب بین لایه آسفالتی و بتنی باعث کاهش چشمگیر تنش‌ها و کرنش‌های بحرانی روسازی می‌گردد که این چسبندگی وابستگی زیادی به جنس اندود قیری مورد استفاده دارد (هوانگ و همکاران، ۲۰۱۷).

۵. روش تحقیق و مدل‌سازی روسازی بتنی غلتکی

۱-۵. مشخصات هندسی و خواص مصالح

با توجه به آنچه در پیشینه پژوهش ذکر گردید، روش اجزای محدود یک روش قدرتمند برای تحلیل روسازی‌های بتنی است. همانطور که گفته شد، با توجه به مطالعات وسترگارد سه حالت بحرانی بارگذاری برای روسازی‌های بتنی وجود دارد که عبارتند از: بارگذاری در وسط دال، گوشه دال و در لبه دال. در این پژوهش، ابتدا مدل‌سازی صرفاً ترافیکی به صورت استاتیک با استفاده از برنامه اجزای محدود آباکوس انجام شد. در این قسمت، به بررسی اثر عواملی همچون طول دال، ضخامت دال و شرایط مختلف بارگذاری پرداخته می‌شود. سپس از بین این مدل‌سازی‌های انجام شده، بحرانی‌ترین حالات

بار و گرادیان دما با استفاده از مدل اجزای محدود سه بعدی ارائه شد. مقایسه انجام شده بین این دو روش نشان می‌دهد که تنش‌های بحرانی ناشی از دما با روش IRC حل می‌گردند. اما به طور کلی روش BRADBURY^۱ در تخمین تنش‌های حرارتی و همچنین منحنی تانسور تنش حرارتی مؤثرتر از روش IRC می‌باشد.

در سال ۲۰۱۴، ذکایی آشتیانی و همکاران با استفاده از المان محدود به مدل‌سازی اندرکنش بین روسازی بتنی و بستر پرداختند. این پژوهش از المان محدود برای آنالیز اصطکاک بین لایه‌های غیرچسبنده روسازی استفاده شد. برای مدل‌سازی روسازی از ترکیب المان دوبعدی صفحه‌ای، المان‌های سطحی و المان‌های بستر تکیه‌گاهی استفاده شد. نتایج نشان داد که یک روسازی بتنی متشکل از دال بتنی و بستر که در معرض گرادیان‌های حرارتی مثبت و منفی قرار می‌گیرند نیروهای اصطکاک بین دال بتنی و بستر اثر زیادی روی افزایش تنش‌های دال بتنی دارند.

در پژوهش انجام شده به وسیله هوانگ و همکاران (۲۰۱۷) روشی جدید در خصوص آنالیز دما و رطوبت به طور همزمان در روسازی بتنی ارائه شد. در این روش، با استفاده از انتقال حرارت یک‌بعدی و با استفاده از خاصیت رسانایی حرارتی و انتشار رطوبت به ارائه مدلی بر پایه اجزای محدود و با استفاده از روش المان محدود کرانک نیکلسون که قابل استفاده برای زمان‌های اولیه گیرش بتن نیز می‌باشد، پرداخته است. این مدل با استفاده از مشاهدات میدانی اعتبارسنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیر هیدراتاسیون و تبخیر در منحنی‌های دما و رطوبت بتن رویه و رطوبت نسبی لایه بتنی به خصوص در ۲۴ ساعت اولیه بسیار زیاد می‌باشد (مکیویز، ۲۰۱۷).

در پژوهش انجام شده به وسیله لینگ و همکاران در سال ۲۰۱۹، به بررسی پاسخ‌های بحرانی روسازی مرکب

¹- Bradbury's temperature stress coefficient

متر بوده و ضخامت لایه بستر ۲ متر فرض می‌شود (کاوا و همکاران، ۱۹۹۸؛ لینگ و همکاران، ۲۰۱۹). در این مرحله، بار ترافیکی اعمالی، بار محور ساده با چرخ تک به وزن ۸/۲ تن با فشار باد ۰/۹ مگاپاسکال می‌باشد که در رده کامیون‌های سنگین قرار می‌گیرد (هیلر و کین، ۲۰۱۱). مشخصات مصالح لایه‌های مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

انتخاب و این حالات به طور همزمان تحت اثر گرادیان حرارتی و بارگذاری ترافیکی در مدت زمان ۲، ۳ و ۴ ساعت قرار می‌گیرند. سپس اعتبارسنجی این مدل‌سازی به کمک روابط وسترگارد (۱۹۲۷) انجام می‌شود.

مدل اولیه روسازی بتن غلتکی در این پژوهش متشکل از سه لایه رویه بتن غلتکی، لایه اساس و بستر می‌باشد. رویه بتن غلتکی یک قطعه به عرض ۴ متر و طول متغیر می‌باشد. لایه اساس ثابت و برابر ۳۰ سانتی

جدول ۱. مشخصات مصالح مورد استفاده در پژوهش (حسن و گروبر، ۲۰۰۸؛ فامیلی و وفایی، ۲۰۱۶)

ضخامت (mm)	سختی لایه (MPa)	ضریب پواسون
RCC	۳۱۰۰۰	۰/۲۲
Base	۱۵۵	۰/۳۵
Subgrade	۵۰	۰/۴۵

مورد مطالعه:

$$L = \sqrt{\frac{4.1 \times 10^3 \times 9.81}{0.5227 \times 0.9 \times 10^6}} = 0.3m = 30cm$$

حال با توجه به شکل کتاب هوانگ (۱۹۹۳)، ابعاد سطح مستطیلی معادل برابر ۰.۶L و ۰.۸۷۱۲L می‌باشد، که برای روسازی مورد مطالعه این مقادیر برابرند با:

a=0.6L=18 cm و b=0.8712L=27 cm که ابعاد آن به صورت ۲۷×۱۸ سانتی‌متر به دست می‌آید. پس از به دست آمدن ابعاد بارگذاری، برای بررسی سایر پارامترها ماتریس مدل‌سازی را تشکیل داده و مطابق جدول ۲، تعداد و مقادیر کمیت‌های مختلف که قرار است بررسی شوند، در ماتریس مدل‌سازی گنجانده می‌شوند.

با توجه به وزن محور ۸/۲ تن که از نوع ساده با چرخ تک می‌باشد، وزن هر کدام از چرخ‌ها ۴/۱ تن به دست می‌آید. براساس آنچه در کتاب هوانگ (۱۹۹۳) آمده است، برای شبیه‌سازی در نرم‌افزارهای اجزای محدود، بارگذاری ترافیکی روی روسازی‌های بتنی به صورت بار مستطیلی معادل انجام می‌شود. با توجه به فشار باد ۰/۹ مگا پاسکال و وزن ۴/۱ تن برای هر چرخ با استفاده از روابط کتاب هوانگ (۱۹۹۳) سطح مستطیلی معادل محاسبه می‌شود:

$$L = \sqrt{\frac{p}{0.5227q}} \quad (11)$$

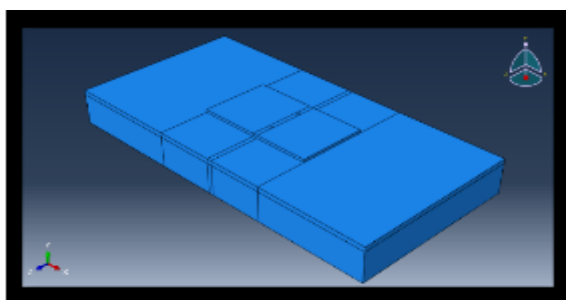
که در این رابطه p بار وارده به هر چرخ (نیوتن)، q فشار باد چرخ (مگاپاسکال) و L (متر) می‌باشد. برای روسازی

جدول ۲. ماتریس مدل‌سازی روسازی در این پژوهش

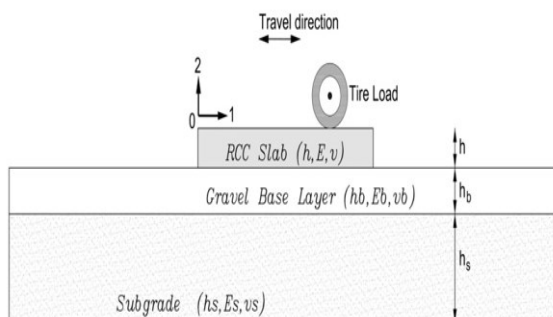
موقعیت بارگذاری	ضخامت دال (mm)	طول دال (m)	گرادیان حرارتی (°C)
تعداد	۳	۴	۱
مرکز دال	۱۵۰-۱۰۰		
مقادیر گوشه دال	۲۵۰-۲۰۰	۹-۷-۵-۳	۵۰ به ۲۰ درجه
لبه دال	۳۰۰		

۲-۵. بارگذاری و شرایط مرزی مدل

برای ثابت و مشخص بودن و به صورت قراردادی، محورهای Z, Y, X که در شکل ۲ مشخص می‌باشند به ترتیب برای تمامی مدل‌های پژوهش، محورهای ۱، ۲ و ۳ نامیده می‌شوند.



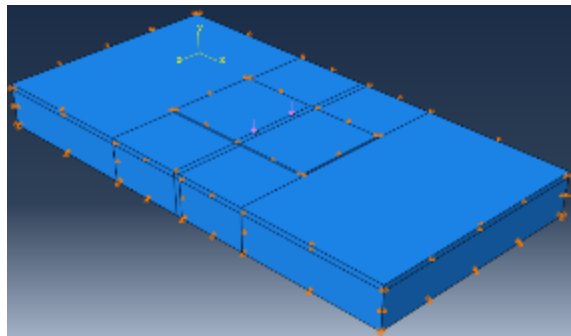
شکل ۲. نام‌گذاری ثابت محورها در تمام مدل‌های این پژوهش



شکل ۳. مقطع روسازی و راستای تغییر شکل لایه‌ها و بارگذاری مدل

قرارداد محور ۲) تغییر مکان داشته باشد. ثانیاً لایه‌های رویه، اساس و بستر نیز نباید در جهت‌های X و Z (محورهای ۱ و ۳) جابجایی نسبی داشته باشند. نحوه اعمال این شرایط مرزی در شکل ۴ آورده شده است.

بدین ترتیب، راستای بارگذاری ترافیکی Y بوده و به دلیل رو به پایین بودن جهت آن -Y می‌شود. بارگذاری ترافیکی به صورت Pressure اعمال می‌گردد. شرایط مرزی در این مدل‌سازی شامل سه شرط اصلی می‌باشد: اولاً انتهای لایه بستر نباید در جهت Y (طبق

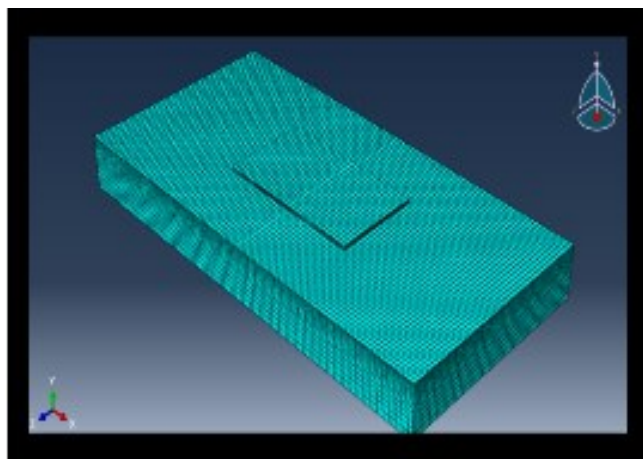


شکل ۴. اعمال شرایط مرزی به مدل در آباکوس

انجام می شود. برای مدل های حرارتی از المان C3D8T استفاده می شود. برای لایه اساس و بستر، مش بندی به صورت تصاعدی از بالای لایه اساس تا انتهای لایه بستر انجام شده است. بدین ترتیب پیوستگی مش ها در لایه های مختلف و در مرز لایه ها حفظ خواهد شد. شکل ۵ نحوه مش بندی یکی از مدل های ساخته شده را نشان می دهد.

۳-۵. مش بندی مدل و حل مسأله

برای مش بندی این مدل، برای لایه رویه بتن غلتکی، با توجه به ضخامت دال، مش بندی طوری انجام شده که در هر عمق دال ۵ مش وجود داشته باشد. به عنوان مثال، اگر عمق دال بتنی ۱۰ سانتی متر باشد اندازه مش های لایه بتنی ۲×۲ سانتی متر می شود. مش بندی به صورت منظم و مستطیلی با استفاده از المان C3D8R



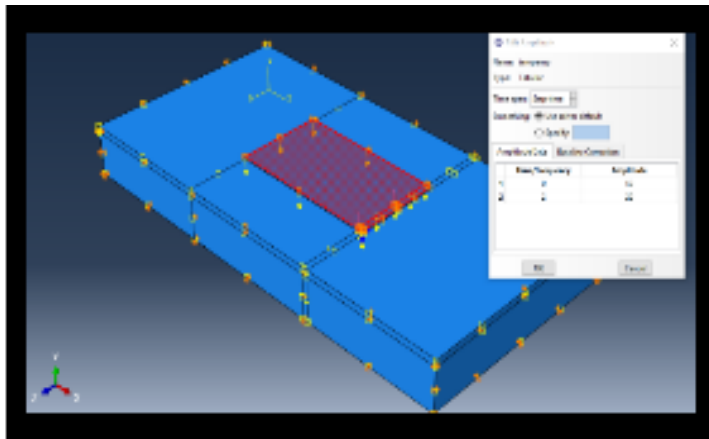
شکل ۵. نحوه مش بندی مدل در آباکوس

یک بارگذاری حرارتی به صورت دامنه ای، میزان دمای سطح روسازی از ۵۰°C به ۲۰°C طی ۲، ۳ و ۴ ساعت کاهش می یابد که مجموعاً سه گرادیان حرارتی می شود. شکل ۶ نحوه اعمال یکی از گرادیان های حرارتی را نشان می دهد.

۳-۵. اعمال گرادیان حرارتی به مدل های

ترافیکی

نحوه اعمال گرادیان حرارتی به مدل های ترافیکی به این صورت می باشد که دمای سطح رویه بتنی با استفاده از



شکل ۶. اعمال گرادیان حرارتی به مدل

ضمناً مشخصات حرارتی مصالح از قبیل گرمای ویژه (C)، ضریب رسانایی حرارتی (K)، ضریب انبساط حرارتی (α) و چگالی (ρ) با توجه به جدول ۳ در مدل-های حرارتی استفاده شدند (فامیلی و وفایی، ۲۰۱۶؛ حسن و گروبر، ۲۰۰۸).

جدول ۳. مشخصات حرارتی مصالح استفاده شده در پژوهش

C ($J/kg^{\circ}C$)	K ($W/m^{\circ}C$)	α ($1/^{\circ}C$)	ρ (kg/m^3)	
۱۰۰۰	۲/۵	1×10^{-5}	۲۴۰۰	RCC
۸۰۰	۰/۰۵	7×10^{-6}	۲۱۰۰	Base
۸۰۰	۰/۰۵	7×10^{-6}	۲۰۵۰	Subgrade

مدل های صرفاً ترافیکی آورده شدند. همانطور که قبلاً گفته شد، بارگذاری در این پژوهش از نوع استاتیک می-باشد. همچنین، برای پرهیز از شلوغی راهنمای نمودارهای این قسمت به صورت قراردادی از نمادهای اختصاری به جای عبارات طولانی در تمامی نتایج این بخش مطابق جدول ۴ استفاده شده است.

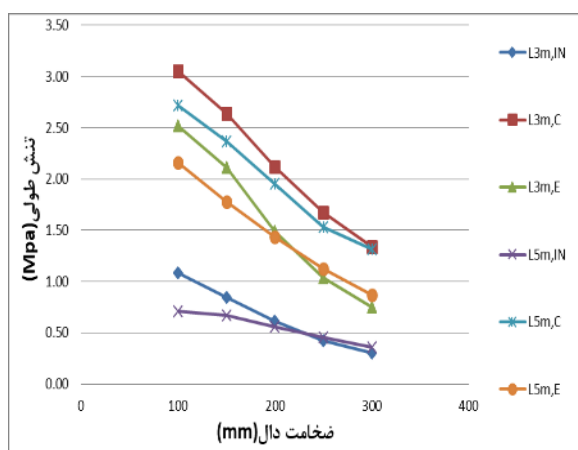
۶. تحلیل نتایج

۶-۱. نتایج مدل های ترافیکی

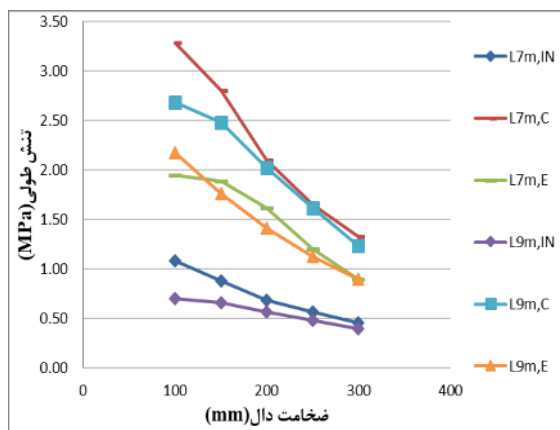
با توجه به آنچه در قسمت قبل گفته شد، مدل های ساخته شده با استفاده از روش اجزای محدود هر کدام دارای خروجی تنش و تغییر شکل می باشند که ابتدا مقادیر تنش در راستای X و Z و سپس تغییر مکان افقی روسازی بتن غلتکی (راستای Y) به ترتیب در شکل های ۷ و ۸ در

جدول ۴: نمادهای اختصاری به کار رفته در نتایج پژوهش

نماد اختصاری	معادل لاتین	پارامتر
L	Slab Length	طول دال
IN	Interior Loading	بارگذاری داخل (مرکز) دال
C	Corner Loading	بارگذاری گوشه دال
E	Edge Loading	بارگذاری لبه دال
T	Initial Temperature	دمای اولیه سطح روسازی
M	Meter	متر



شکل ۷. نمودار مقادیر تنش طولی در مدل‌های ترافیکی برای طول‌های ۳ و ۵ متر



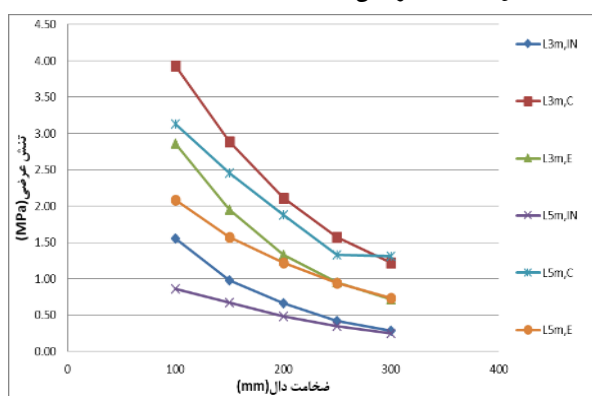
شکل ۸. نمودار مقادیر تنش طولی در مدل‌های ترافیکی برای طول‌های ۷ و ۹ متر

نمی‌باشد و حالات دیگر نیز می‌توانند بحرانی باشند. دلیل این اختلاف را می‌توان این گونه توضیح داد که روابط تحلیلی و سترگارد بر مبنای بارگذاری یک چرخ به صورت دایره بنا شده‌اند. این در حالی است که در عمل بارگذاری روسازی با محورهای مختلف و آرایش‌های متفاوت چرخ هستند و بار تک شبیه‌سازی مناسبی از بار واقعی

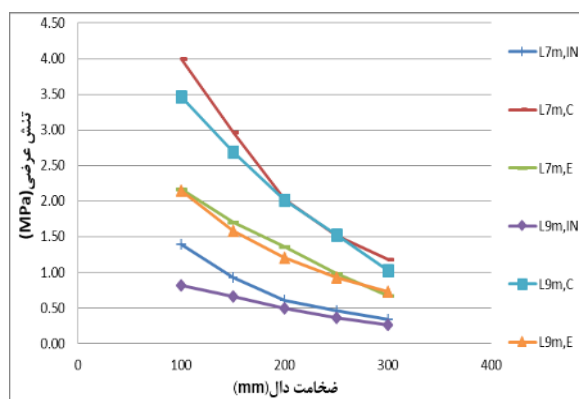
نتایج نشان می‌دهد که بحرانی‌ترین حالت برای تنش - های طولی حالت بارگذاری گوشه (Corner) بوده که در کمترین ضخامت دال (۱۰۰ میلی‌متر) رخ داده و مقدار آن حدود ۳/۵ مگاپاسکال می‌باشد. این مسأله نشان می‌دهد که بر خلاف نظریه و سترگارد (۱۹۲۷)، بحرانی‌ترین موقعیت بارگذاری برای تنش همواره حالت بارگذاری لبه

ضخامت دال، طول‌های مختلف دال به تدریج نتایج تنش‌ها به یکدیگر نزدیک می‌شوند. این مسأله حاکی از اهمیت بیشتر ضخامت دال در مقایسه با طول دال در میزان تنش کششی می‌باشد. البته اثر طول دال در روابط وسترگارد در نظر گرفته نشده که این یکی از معایب روش تحلیلی نیز می‌باشد. شکل‌های ۹ و ۱۰ مقادیر تنش‌های عرضی را نشان می‌دهند.

اعمال شده به روسازی نمی‌باشد. بارگذاری این تحقیق نیز محور منفرد استاندارد دارای یک چرخ در هر سمت خود می‌باشد که روابط تحلیلی وسترگارد اثر بار چرخ دوم را لحاظ نمی‌کنند. به علاوه، وسترگارد در روابط تحلیلی خود از پی مایع (وینکلر) استفاده کرد که در این نوع پی، تنش و تغییر مکان هر نقطه مستقل از سایر نقاط بوده که در واقعیت این چنین نیست. برای یک موقعیت بارگذاری مشخص، مثلاً بارگذاری گوشه، با افزایش



شکل ۹. نمودار مقادیر تنش عرضی در مدل‌های ترافیکی برای طول‌های ۳ و ۵ متر



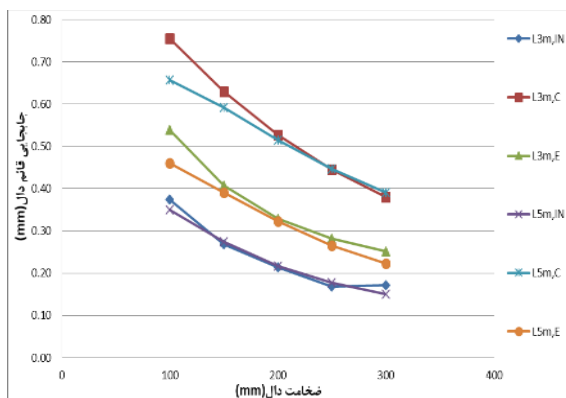
شکل ۱۰. نمودار مقادیر تنش عرضی در مدل‌های ترافیکی برای طول‌های ۷ و ۹ متر

بوده که این موضوع برخلاف نظریه وسترگارد (۱۹۲۷) می‌باشد. همانطور که در تحلیل تنش‌های طولی بیان شد، این مسأله به دلیل محدودیت وسترگارد در بارگذاری به صورت چرخ تک و استفاده از پی وینکلر بجای بستر واقعی می‌باشد. به علاوه، یکی دیگر از دلایل مهم اختلاف نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با روابط وسترگارد، محدودیت وسترگارد در تعیین تنش در موقعیت بارگذاری لبه دال می‌باشد. به علاوه، به دلیل

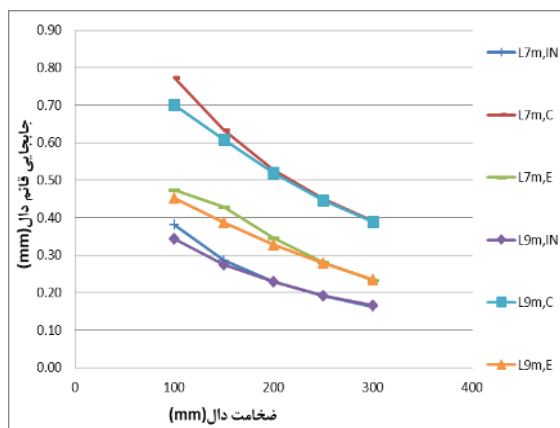
نتایج نشان داد که حد اکثر تنش عرضی برای حالت بارگذاری گوشه و در کمترین ضخامت دال اتفاق می‌افتد. همچنین، با افزایش ضخامت دال برای تمامی طول‌های مورد بررسی تنش عرضی همانند تنش طولی کاهش می‌یابد. حد اکثر مقدار تنش عرضی کششی حدود ۰/۵ مگاپاسکال بیشتر از حد اکثر تنش طولی کششی بود. بنابراین، حداکثر تنش کششی برای روسازی بتن غلتکی تقریباً ۴ مگاپاسکال و در موقعیت بارگذاری گوشه دال

دال، طول‌های مختلف دال به تدریج تنش‌های نزدیک به هم می‌دهند که حاکی از اهمیت بیشتر تغییرات ضخامت دال نسبت به طول دال در یک موقعیت بارگذاری خاص می‌باشد، برای بارگذاری حرارتی انتخاب شدند. شکل-های ۱۱ و ۱۲ مقادیر جابجایی قائم روسازی بتن غلتکی را نشان می‌دهند.

وجود شرایط مرزی محدودتر در موقعیت بارگذاری گوشه که عدم جابجایی دال در دو جهت نسبت به بارگذاری لبه دال که محدودیت جابجایی دال در فقط یک جهت است، افزایش تنش در گوشه دال و بحرانی‌تر شدن این موقعیت بارگذاری نسبت به لبه امری منطقی به نظر می‌رسد. مشابه نتایج تنش طولی، برای تنش عرضی در یک موقعیت بارگذاری مشخص، با افزایش ضخامت



شکل ۱۱. نمودار مقادیر جابجایی قائم در مدل‌های ترافیکی برای طول‌های ۳ و ۵ متر



شکل ۱۲. نمودار مقادیر جابجایی قائم در مدل‌های ترافیکی برای طول‌های ۷ و ۹ متر

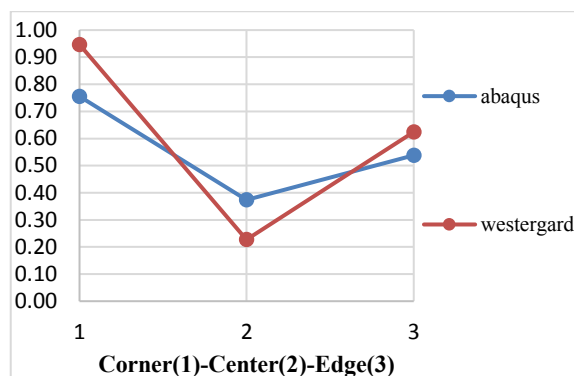
بارگذاری در روسازی بتن غلتکی برای تنش کششی و تغییر مکان قائم دال، بارگذاری در گوشه و کمترین ضخامت دال می‌باشد. البته با توجه به اینکه در نتایج تنش‌های طولی و عرضی برای طول‌های ۳ و ۵ متر، موقعیت بارگذاری لبه و گوشه دال نتایج نزدیکی در کمترین ضخامت دال داشتند، هر دو موقعیت بارگذاری برای ترکیب با گرادیان حرارتی در مدل‌سازی ترکیبی استفاده شدند. همچنین، با توجه به یکسان بودن نتایج

نتایج نشان می‌دهد که بیشترین مقدار جابجایی قائم روسازی مربوط به حالت گوشه (Corner) بوده که در کمترین ضخامت دال رخ می‌دهد. وسترگارد (۱۹۲۷) نیز با توجه به مطالعات و آزمایش‌های خود این موقعیت بارگذاری را برای جابجایی قائم بحرانی معرفی می‌کند. بنابراین، در این حالت، نتایج روش اجزای محدود با روابط وسترگارد تطابق دارد. همچنین، با توجه به نتایج ارائه شده، می‌توان نتیجه گرفت که بحرانی‌ترین حالت

برای اعتبارسنجی مدل، همانطور که گفته شد، از روابط وسترگارد استفاده می‌شود. با استفاده از روابط (۲)، (۴) و (۶)، تغییر مکان قائم دال برای طول ۳ متر و ضخامت دال ۱۰ سانتی‌متر در هر سه حالت مرکز، گوشه و لبه دال محاسبه و با نتایج مدل‌سازی مقایسه می‌شوند. شکل ۱۳ و جدول ۴ این مقادیر را نشان می‌دهند.

طول‌های مختلف در موقعیت بارگذاری گوشه و لبه دال در نتایج تنش‌ها و جابجایی‌های قائم، برای دقت بیشتر تمامی طول‌های مورد بررسی در مدل‌های ترافیکی در مدل‌سازی ترکیبی نیز مورد استفاده قرار گرفته شده است.

۲-۶. اعتبارسنجی



شکل ۱۳. مقایسه بین نتایج مدل‌سازی آباکوس و روابط وسترگارد

جدول ۴. مقایسه بین نتایج مدل‌سازی آباکوس و روابط

وسترگارد

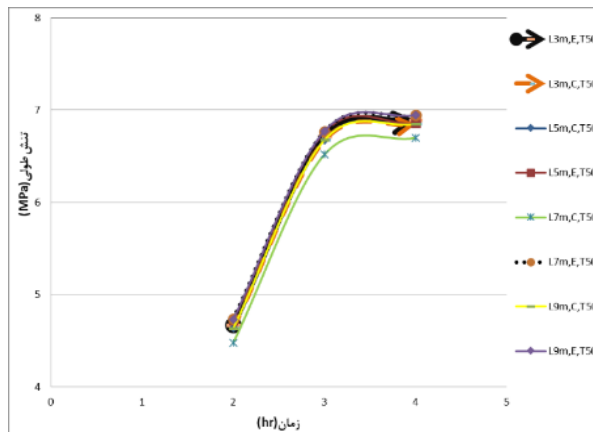
	Vertical Displacement (mm)		
	Corner	Center	Edge
Abaqus	0.945	0.399	0.624
Westergaard	0.7554	0.373	0.583

مرحله بارگذاری همزمان ترافیکی و حرارتی برای مدت ۲، ۳ و ۴ ساعت به روسازی بتن غلتکی وارد می‌شود. گرادیان حرارتی این مرحله کاهش دمای روسازی از ۵۰ به ۲۰ درجه سلسیوس می‌باشد که این انتقال حرارت به صورت گذرا انجام می‌شود. در این مرحله نیز تنش‌های طولی، عرضی و جابجایی قائم دال محاسبه و در شکل-های ۱۴ الی ۱۶ آورده شده است.

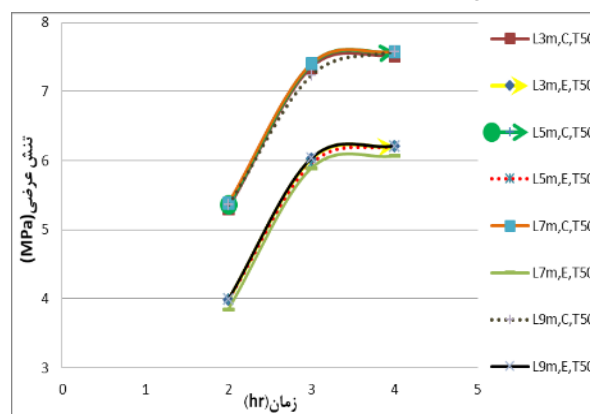
همانطور که در شکل ۱۳ و جدول ۴ مشاهده می‌شود نتایج بدست آمده از آباکوس و روابط وسترگارد کمتر از ۱۰ درصد با یکدیگر اختلاف دارند که این مقدار اختلاف قابل اطمینان بودن مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

۳-۶. نتایج مدل‌های حرارتی

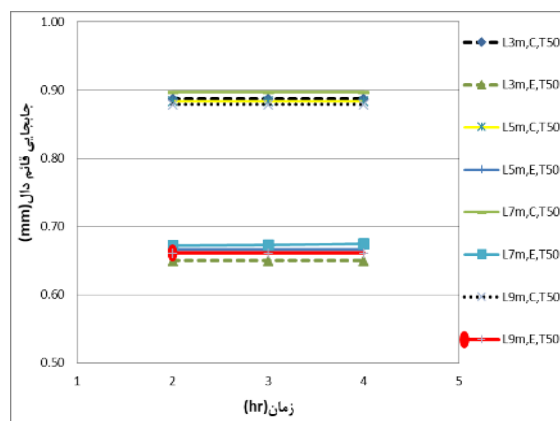
با استفاده از بحرانی‌ترین حالات در مرحله قبل، در این



شکل ۱۴. مقادیر تنش طولی مدل های حرارتی



شکل ۱۵. مقادیر تنش عرضی مدل های حرارتی



شکل ۱۶. مقادیر جابجایی قائم روسازی بتنی در مدل های حرارتی

گوشه و در بیشترین زمان انتقال حرارت (۴ ساعته) روی می دهد که مقدار آن حدود ۷/۵ مگاپاسکال می باشد. بنابراین، این مقدار به عنوان حد اکثر تنش در مدل های حرارتی معرفی می شود که تقریباً دو برابر حد اکثر تنش در بارگذاری ترافیکی می باشد. این موضوع نشان می دهد

با توجه به نتایج، برای تنش های طولی و عرضی بیشترین مقدار تنش برای زمان ۴ ساعته انتقال حرارت رخ می دهد. مقدار حد اکثر تنش طولی حدود ۷ مگاپاسکال می باشد. در خصوص نتایج تنش عرضی نیز مشاهده می شود که حد اکثر تنش در موقعیت بارگذاری

حالات باعث کاهش تنش در روسازی می‌شود. ولی افزایش طول دال نقش مؤثری در تغییرات تنش و جابجایی قائم دال بتنی، چه در بارگذاری ترافیکی و چه در بارگذاری ترکیبی، ایفا نکرد. ضمناً نقدی بر روابط وسترگارد (۱۹۲۷) نیز انجام گرفت زیرا وسترگارد با توجه به مطالعات و آزمایش‌های خود، حالت بحرانی برای تنش در روسازی بتنی را حالت بارگذاری لبه معرفی کرد. البته، در آن زمان روش‌های عددی دقیق مانند روش اجزای محدود به شکل امروزی توسعه نیافته بود. این پژوهش به کمک روش قدرتمند اجزای محدود نشان داد که بر خلاف مطالعات وسترگارد، حالت بحرانی برای تنش همیشه حالت بارگذاری لبه نیست؛ بلکه بسته به شرایط، سایر بارگذاری‌ها نیز می‌توانند بحرانی باشند.

که گرادیان‌های حرارتی می‌توانند در تنش کششی ایجاد شده در روسازی بتنی تأثیرگذار بوده و می‌تواند در شرایط بحرانی باعث افزایش تنش کششی در دال بتنی و خرابی روسازی گردد.

۷. نتیجه‌گیری

با توجه به مفاهیمی که از تاب‌خوردگی حرارتی روسازی‌های بتنی در این پژوهش ارائه شد و اهمیت بررسی این موضوع که در آیین‌نامه‌های مختلف طراحی کم‌رنگ‌تر به آن پرداخته شده و بر اساس مرور تحقیقات پیشین، این پژوهش نشان داد که عامل ضخامت دال نقش مؤثری در افزایش یا کاهش تنش‌های کششی ایجاد شده در دال بتنی دارد. افزایش ضخامت دال تقریباً در تمام

۸. مراجع

- خاکی، ع. م. و آزادروش، ا. ۱۳۸۹. "مدل‌سازی المان محدود تأثیر نوع سنگ‌دانه‌های بتن در بازشدگی درز در روسازی‌های بتنی". تحقیقات بتن، ۳(۱): ۸۹-۹۵.
- خبیری، م. م.، علیپور، م. و بلوچ سیرگانی، پ. ۱۳۹۸. "مدل‌سازی روسازی بتنی در تونل‌های جاده‌ای و بررسی عکس-العمل‌های آن در محیط‌های خاکی سست". سومین کنفرانس ملی رویه‌های بتنی، تهران.
- Famili, A. and Vafaei, M. 2016. "Numerical analysis of roller compacted concrete pavements". Saudi J. Eng. Tech., 1: 20-25.
- Hassan, M. M. and Gruber, S. 2008. "Simulation of concrete paving operations on Interstate-74". J. Constr. Eng. Manag., 134(1): 2-9.
- Hiller, J. and Qin, Y. 2011. "Modelling temperature distribution in rigid pavement slabs: Impact of air temperature". Constr. Build. Mater., 25: 3753-3761.
- Huang, Y. H. 1993. "Pavement analysis and design". Easy Engineering.
- Huang, K., Zollinger, D., Shi, X. and Sun, P. 2017. "A developed method of analyzing temperature and moisture profiles in rigid pavement slabs". Constr. Build. Mater., 151: 782-788.
- Kawa, I., Zhang, Z. and Hudson, W. 1998. "Evaluation of the AASHTO 18-kip load equivalency concept". FHWA/TX-05/0-1713-1.
- Ling, J., Wei, F., Zhao, H., Tian, Y. and Han, B. 2019. "Analysis of airfield composite pavement responses using full-scale accelerated pavement testing and finite element method". Constr. Build. Mater., 212: 596-606.
- Mackiewicz, P. 2014. "Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements". Appl. Therm. Eng., 73: 1167-1174.
- Maitra, S. R., Reddy, K. S. and Ramachandra, L. S. 2013. "Estimation of critical stress in jointed concrete pavement". Proc.-Soc. Behav. Sci., 104: 208-217.
- Shahin, M. Y. 1994. "Pavement management for airports, roads and parking lots". Chapman and Hall.
- Tan, Y. Q., Fu, Y. K., Li, Y. L. and Zhang, C. 2018. "Responses of snow melting airfield rigid pavement under aircraft loads and temperature loads and their coupling effects". Transport. Geotech., 14: 107-116.
- Westergaard, H. M. 1927. "Analytical tools for judging results of structural tests of concrete pavements". Public Roads, 14(10): 185-188.

- Zdiri, M., Abriak, N., Neji, J. and Ben Ouezdou, M. 2009. "Modelling of the stresses and strains distribution in an RCC pavement using computer code "Abaqus". *Electr. J. Struct. Eng.*, 9: 37-44.
- Zokaei-Ashtiani, A., Carrasco, C. and Nazarian, S. 2014. "Finite element modeling of slab–foundation interaction on rigid pavement applications". *Comp. Geotech.*, 62: 118-127.