

تحلیل عددی تنش حرارتی در روسازی بتنی ساده درزدار

احمد منصوریان^{۱*}، مسعود رضائی^۲

۱- استادیار، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

۲- کارشناس ارشد راه و ترابری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

*a.mansourian@bhrc.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۶/۰۶/۲۷]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۹/۰۳]

چکیده

افت دمای محیط و اصطکاک زیاد بین سطح تماس روسازی بتنی با لایه زیرین، دو عامل اصلی ایجاد ترک در روسازی‌های بتنی محسوب می‌شوند. در این پژوهش به منظور ارزیابی اثر تغییرات دو عامل گفته شده روی مقدار تنش اصطکاک و تنش کششی ایجاد شده در دال روسازی بتنی ساده درزدار، تحلیل‌های المان محدود روی دال بتنی در دو حالت دارای میلگرد انتقال بار و بدون میلگرد انتقال بار و با فرض افت دماهای گوناگون و همچنین ضریب اصطکاک‌های متغیر بین دال بتنی و لایه زیر آن انجام شده است. نتایج حاصل از تحلیل عددی نشان می‌دهد، افت دمای زیاد (حدود ۳۰ درجه سانتی‌گراد) به همراه ضریب اصطکاک قابل ملاحظه، می‌تواند در ۷ تا ۸ ساعت اولیه اجرای روسازی بتنی، تنش حرارتی معادل ۱۲۴۰۰۰ پاسکال ایجاد نماید که این مقدار تنش بیش از مقاومت کششی بتن در ساعات اولیه است، بنابراین در ساعات اولیه و تحت شرایط گفته شده، بروز ترک در رویه بتنی محتمل خواهد بود. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد وجود انحراف از حالت افقی در میلگرد انتقال بار می‌تواند موجب افزایش بیش از ۵۰ برابری مقدار تنش در محدوده قرارگیری میلگردهای انتقال بار شود.

واژگان کلیدی: روسازی بتنی، ترک حرارتی، ضریب اصطکاک، میلگرد انتقال بار

۱- مقدمه

آزاد دال بتنی تمایل دارد تغییر مکان دهد، در حالی که اصطکاک بین دال و سطح زیر آن (لایه زیراساس یا بستر)، در برابر این تمایل مقاومت می‌کند. نتیجه مقاومت در برابر حرکت انتهای آزاد دال، ایجاد تنش اصطکاک در دال بتنی است (شکل ۱). هرچه طول دال و در نتیجه سطح تماس دال با لایه زیر آن بیشتر باشد، تنش اصطکاک در دال بیشتر شده و پتانسیل ایجاد ترک (ترک‌های حرارتی) در دال بتنی افزایش می‌یابد. در این پژوهش بررسی رفتار دال بتنی تحت اثر توزیع یکنواخت دما در امتداد ضخامت دال مد نظر بوده است. با این وجود در صورت فرض توزیع غیر یکنواخت دما در امتداد ضخامت دال، دال بتنی دچار تابیدگی به

یکی از پارامترهای مهم در فرآیند طراحی روسازی بتنی ساده درزدار، انتخاب طول بهینه دال بتنی است. این موضوع از آن نظر اهمیت پیدا می‌کند که هرچه طول دال بیشتر باشد، تعداد درزهای عرضی کمتر می‌شود. این امر علاوه بر ایجاد راحتی بیشتر برای راننده در هنگام عبور از درزهای عرضی، هزینه کمتر ساخت و نگهداری روسازی بتنی درزدار را به همراه خواهد داشت [1]. از سوی دیگر چنانچه طول دال بتنی بیشتر از حد مجاز شود، ترک‌های عرضی ناشی از انقباض دال اتفاق می‌افتد. سازوکار بروز این پدیده را می‌توان به این صورت بیان کرد که با کاهش دما، انتهای

توانند منجر به وقوع ترک‌های اولیه و بازشدگی درز در روسازی‌های بتنی شوند. یکی از مشکلاتی که دال‌های روسازی بتنی به علت زیاد بودن نسبت سطح به حجم، به ویژه در مناطق گرم و خشک (گرما و باد) با آن مواجه هستند، جمع‌شدگی خمیری و ترک‌های مربوط به آن است. در فرآیند جمع‌شدگی خمیری به دلیل آن‌که هنوز بتن مقاومت کششی لازم در برابر تنش‌های ناشی از جمع‌شدگی را به دست نیاورده، ترک‌هایی در آن ایجاد می‌شود. در حوزه تکنولوژی بتن برای کاهش پدیده جمع‌شدگی خمیری از سازوکارهایی مانند حفاظت از سطح بتن با پوشش‌های موقت، کاهش دمای بتن تازه، استفاده از برخی الیاف و ... استفاده می‌شود. تغییرات دما نیز می‌تواند اثر مشابهی مانند جمع‌شدگی بتن، ایجاد نماید. با توجه به اینکه تمرکز این پژوهش روی تحلیل عددی تنش ناشی از کاهش دما و ترک‌خوردگی حاصل از آن که اصطلاحاً ترک حرارتی¹ گفته می‌شود، بوده است، بنابراین موضوع جمع‌شدگی خمیری بتن وارد تحلیل حاضر نشده است.

۲- مطالعات پیشین

در سال‌های اخیر مطالعات متنوعی در زمینه بررسی بروز ترک در روسازی بتنی انجام شده است. به طور کلی بارگذاری ترافیکی، شرایط محیطی و عدم رعایت مشخصات ساخت دلایل عمده بروز ترک در روسازی‌ها محسوب می‌شوند.

شکری و ویلیام [6] اثر تغییرات دما و بارهای ترافیکی در ایجاد تنش در دال بتنی ساده درزدار به طول ۴۵۷ سانتی متر که دارای میلگردهای انتقال بار (داول بار) بود را به روش المان محدود بررسی کردند. در این پژوهش ضریب اصطکاک بین دال بتنی و لایه زیراساس برابر ۱/۵ در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده نشان داد که تغییر شکل‌های ایجاد شده در دال بتنی حاصل از تغییرات دما، به تنهایی اثر قابل توجهی بر تنش‌های ایجاد شده در اطراف میلگردهای انتقال بار ندارد در حالی که بارهای ترافیکی به تنهایی می‌تواند موجب بروز تنش‌های قابل توجهی در دال بتنی در محدوده اطراف میلگردهای انتقال بار شود [6]. در مطالعه دیگری وون و همکارانش [7] با استفاده

سمت بالا یا پایین می‌شود و تنش‌هایی نیز به دلیل پدیده تابیدگی به دال بتنی تحمیل خواهد شد [2].

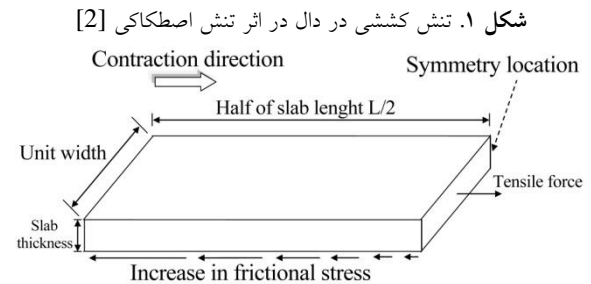


Fig. 1. Tensile stress in slab due to frictional stress [2]

مقادیر توصیه شده برای ضریب اصطکاک با توجه به نوع مصالح استفاده شده در زیر دال بتنی (لایه زیراساس) در جدول (۱) نشان داده شده است [3].

جدول ۱. ضریب اصطکاک بین دال بتنی و لایه زیر آن [3]

| Type of Material beneath slab | Friction factor (F) |
|-------------------------------|---------------------|
| Surface treatment | 2.2 |
| Lime stabilization | 1.8 |
| Asphalt stabilization | 1.8 |
| Cement stabilization | 1.8 |
| River gravel | 1.5 |
| Crushed stone | 1.5 |
| Sandstone | 1.2 |
| Natural subgrade | 0.9 |

Table 1. Friction factor between slab and the beneath slab [3]

ضریب اصطکاک بسته به شرایط تماس بین دو سطح می‌تواند کاهش یا افزایش یابد. به عنوان نمونه در صورت استفاده از ورق پلی اتیلن در سطح تماس دال بتنی و لایه زیراساس مقدار ضریب اصطکاک به کمتر از ۱ کاهش پیدا می‌کند [4]. روسازی بتنی در ساعات اولیه اجرا و در دوره عمل آوری بتن (زمان هیدراتاسیون) دارای مقاومت فشاری و به دنبال آن مقاومت کششی به مراتب کمتری نسبت به روسازی بتنی عمل آوری شده است. اصولاً ترک در بتن زمانی در ساعات اولیه اجرا اتفاق می‌افتد که مقدار تنش کششی در بتن به مقدار مقاومت کششی بتن برسد یا کرنش ایجاد شده در اثر انقباض ناشی از خشک‌شدگی به کرنش کششی قابل تحمل بتن غلبه کند [5]. به طور کلی جمع‌شدگی بتن و تغییرات دما، دو سازوکار عمده‌ای هستند که می‌

می‌شوند. ایجاد تنش‌های کششی موثر در روسازی بتنی در هر دو طرف میلگرد انتقال بار با قطر کوچکتر و همچنین تاثیر کم قطر میلگرد بر تنش‌های ایجاد شده در میانه دال از دیگر نتایج پژوهش‌های ماکرویچ بود [11].

در مطالعه دیگری ذکایی آشتیانی و همکارانش [12] اثر لایه‌های اساس با صلبیت مختلف را روی تنش‌های ناشی از تابیدگی دال بتنی (که نتیجه تاثیر عوامل محیطی بر روسازی بتنی است) بررسی کرده‌اند. در این مطالعه سطوح تماس دال بتنی با لایه اساس و همچنین سطح تماس لایه اساس با لایه زیراساس به عنوان محل جدایی لایه‌ها یا محل لغزیدن لایه‌ها در اثر تغییر شکل در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده در این مطالعه نشان داد استفاده از تئوری صفحه نمی‌تواند به درستی تغییر شکل لایه اساس را در اثر تنش‌های حرارتی (به دلیل عدم امکان فرو رفتگی دال بتنی در لایه اساس) نشان دهد [12]. پژوهش‌های سو و کیم [13] نیز نشان می‌دهد اگر میلگرد انتقال بار به صورت پیوسته با بتن و بدون آزادی در غلاف خود جای‌گذاری شود، تنش ایجاد شده در دال بتنی در اثر تابیدگی ناشی از تغییرات دما، اندکی کاهش می‌یابد [13].

پژوهش‌های وسویچ و همکارانش [4] روی اصطکاک بین دال بتنی و انواع مختلف لایه اساس نشان می‌دهد، بزرگی نیروی بازدارنده اصطکاک و نقطه‌ای که لغزیدن در آن رخ می‌دهد برای یک لایه زیراساس نسبت به لایه زیراساس دیگر متفاوت است. همچنین اصطکاک لایه زیراساس روی تنش‌های ایجاد شده در بتن و فولاد، بازشدگی درزها و عرض ترک‌ها در روسازی بتنی اثر مستقیم دارد [4].

براساس مطالعات لی [14]، برای تغییر مکان دال بتنی روی لایه اساس یا زیراساس باید افت دمایی مشخصی وجود داشته باشد که این افت دما کمتر از افت دمای هم ارز برای انقباض ناشی از خشک‌شدگی بتن در شرایط کلی روسازی بتنی درزدار است [14].

۳- اهداف پژوهش

با توجه به خلاءهای موجود در مطالعات پیشین، اهداف زیر مد نظر این پژوهش است:

از روش المان محدود و همچنین فعالیت‌های آزمایشگاهی، به بررسی اثر تغییرات دما روی تنش ایجاد شده در روسازی بتنی پرداختند. در این مطالعه تغییرات دما در امتداد ضخامت دال بتنی به صورت یکنواخت و برابر ۱۷ و ۲۸ درجه سانتیگراد در نظر گرفته شد. بررسی نتایج تحلیل‌های انجام شده نشان داد که تنش‌های برشی و نرمال ایجاد شده در اثر تغییرات دما به اندازه ۲۸ درجه سانتیگراد بین بالا و پایین دال بتنی حدود ۵۲ تا ۵۸ درصد بیشتر از تغییرات دما به اندازه ۱۷ درجه سانتیگراد است. در ادامه آنها اظهار داشتند که بیشینه تنش کششی حاصل از تغییرات دمای ۲۸ درجه سانتیگراد (تنش ۳/۲ مگاپاسکال) به تنهایی برای ایجاد ترک‌های ناشی از ایجاد کشش در بتن به ویژه در سنین اولیه روسازی بتنی که بتن به مقاومت کششی نهایی خود نرسیده است، کافی است [7]. محبوب و همکارانش [8] نیز با استفاده از روش المان محدود و همچنین برداشت‌های میدانی، اثر عوامل محیطی به ویژه تغییرات دما را در ایجاد تنش در روسازی بتنی بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد، تغییرات رطوبت و دمای روزانه و فصلی علاوه بر ایجاد تنش‌های تابیدگی در دال بتنی، تنش‌هایی را نیز در نتیجه وجود اصطکاک بین لایه زیراساس و دال بتنی به وجود می‌آورد [8]. در مطالعه دیگری یانلانگ و هانبینگ [9] با بررسی تنش‌های حرارتی ایجاد شده در روسازی بتنی مسلح پیوسته اظهار داشتند که با تغییر دما، میزان تنش کششی در محدوده بالایی رویه بتنی افزایش می‌یابد و این مقدار افزایش می‌تواند به حدود ۳۰ درصد برسد [9]. کیم، سیلان و گوپالاکریشنان [10] نیز با تحلیل نرم‌افزاری اثر شرایط محیطی روی تابیدگی روسازی بتنی درزدار ساده دارای دال‌های به طول ۶ متر با استفاده از دو نرم‌افزار ISLAB و EVERFE و مقایسه نتایج به دست آمده با مشاهدات آزمایشگاهی و میدانی به این نتیجه رسیدند که استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود در کنار بررسی‌های میدانی، ابزار مناسبی برای تحلیل رفتار دال‌های روسازی بتنی محسوب می‌شوند [10]. ماکرویچ [11] با بهره‌گیری از روش المان محدود به بررسی ارتباط بین قطر میلگرد انتقال بار و تنش‌های حرارتی ایجاد شده در دال بتنی پرداخته است. براساس نتایج این پژوهش، میلگردهای انتقال بار با قطر کمتر منجر به ایجاد تنش‌های حرارتی بزرگتری در اطراف خود

از دو مدل استفاده شده است. مدل اول شکل (۲) شامل دال بتنی بدون میلگرد انتقال بار و مدل دوم شکل (۳) با میلگرد انتقال بار است. در مدل دوم میلگرد انتقال بار در هر دو حالت بدون انحراف (ایده آل) و با انحراف از حالت افقی (دارای زاویه با محور افقی) مدل شده است. همچنین از مدل اول برای اعتبارسنجی تحلیل های انجام شده نیز استفاده شده است.

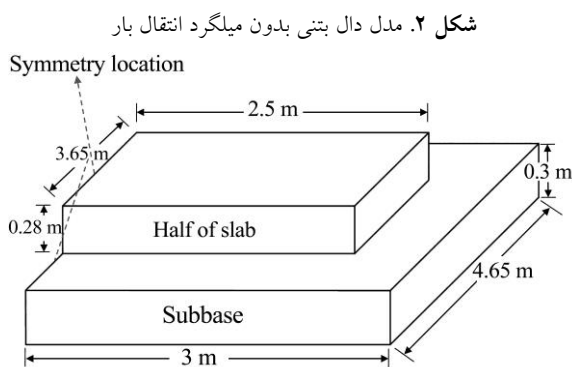


Fig. 2. Model of slab without dowel bar

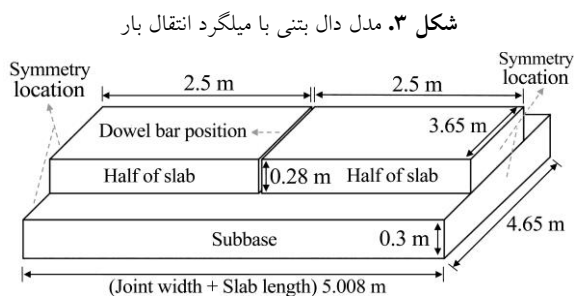


Fig. 3. Model of slab with dowel bar

به دلیل رفتار متقارن دال بتنی در اثر کاهش دما مدل سازی برای نصف طول دال و زیراساس انجام شده است، این فرض موجب کاهش زمان تحلیل و افزایش دقت نتایج نیز خواهد شد. در این پژوهش ویژگی های مصالح برای دال بتنی و لایه زیر اساس مطابق جدول (۲) در نظر گرفته شده است.

بارهای وارد بر مدل شامل وزن المان ها و بارگذاری حرارتی است. بارگذاری حرارتی به صورت کاهش دما در دو مرحله ابتدایی و انتهایی (مرحله تنش حرارتی) تعریف شده است.

الف- تعیین مقدار تنش کششی در دال بتنی و تنش اصطکاکی در سطح تماس دال های بتنی بدون میلگرد انتقال بار به ازای مقادیر مختلف ضریب اصطکاک (که بیانگر شرایط مختلف بین دال بتنی و لایه زیراساس است) و حالات مختلف افت دما و سپس ارزیابی پتانسیل بروز ترک در روسازی بتنی؛

ب- تعیین مقدار تنش کششی و تنش اصطکاکی در دال بتنی دارای میلگرد انتقال بار و بدون انحراف از حالت افقی (شرایط ایده آل) و مقایسه آن با دال بتنی بدون میلگرد انتقال بار؛
پ- ارزیابی اثر انحراف میلگرد انتقال بار روی مقدار و نحوه توزیع تنش های ایجاد شده در دال بتنی و همچنین بررسی اثر تغییرات دما و ضریب اصطکاک در این حالت.

۴- مدل سازی

در این پژوهش از نرم افزار آباکوس که مبتنی بر روش المان محدود است، برای مدل سازی و تحلیل رفتار دال بتنی در اثر کاهش دما استفاده شده است [15]. فرضیات در نظر گرفته شده در این پژوهش برای مدل سازی به شرح زیر است:

الف- دال بتنی، لایه زیراساس و میلگرد انتقال بار به صورت حجم های سه بعدی، توپر^۱، تغییر شکل پذیر^۲ و ایزوتروپیک^۳ هستند؛

ب- شرایط تماسی برای تمام حالات تماس در مسئله به صورت تماس سطح با سطح است و بسته به نوع تماس دارای ضریب اصطکاک مشخصی است؛

پ- تغییرات دما به صورت تدریجی و به صورت توزیع یکنواخت به اجزای مدل اعمال شده و تحلیل حالت شبه استاتیکی دارد؛

ت- مش بندی برای دال بتنی بدون میلگرد انتقال بار به صورت متقارن و چهار وجهی و برای دال بتنی با میلگرد انتقال بار و غلاف بتنی دارای حالت ترکیبی متقارن (چهار وجهی) و نامتقارن (سه وجهی) است.

در این پژوهش برای تحلیل تنش اصطکاکی در دال بتنی

- 1- Solid
- 2- Deformable
- 3- Isotropic

ترکیبی است.

شکل (۴) چگونگی مش‌بندی اجزای مدل با میلگرد انتقال بار را نشان می‌دهند. مش‌بندی لایه زیراساس مشابه مدل اول است. المان‌های مش‌بندی در ناحیه غیر از محل قرارگیری میلگردهای انتقال بار، از نوع چهار وجهی منظم و در محل قرارگیری میلگرد انتقال بار (غلاف) به دلیل سطح مقطع دایره‌ای آن، از نوع هرمی آزاد انتخاب شد. همچنین المان‌های مربوط به میلگرد انتقال بار نیز به صورت هرمی آزاد در نظر گرفته شد. مقدار انحراف میلگرد انتقال بار از حالت افقی برابر ۶ میلی‌متر و میلگرد به صورت بدون آج در نظر گرفته شده است [16]. براساس توصیه انجمن سیمان پرتلند (PCA)، قطر میلگردهای انتقال بار یک هشتم ضخامت دال در نظر گرفته می‌شود. بر این اساس در این پژوهش قطر میلگرد برابر با ۳۲ میلی‌متر و طول آن نیز ۴۵۰ میلی‌متر انتخاب شده است. فاصله قرارگیری میلگردهای انتقال بار از هم بر اساس آیین‌نامه آشتو برابر ۳۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده است [2]. سایر مشخصات میلگرد انتقال بار در جدول (۳) نشان داده شده است.

شکل ۴. مش‌بندی دال با غلاف بتنی و میلگرد انتقال بار

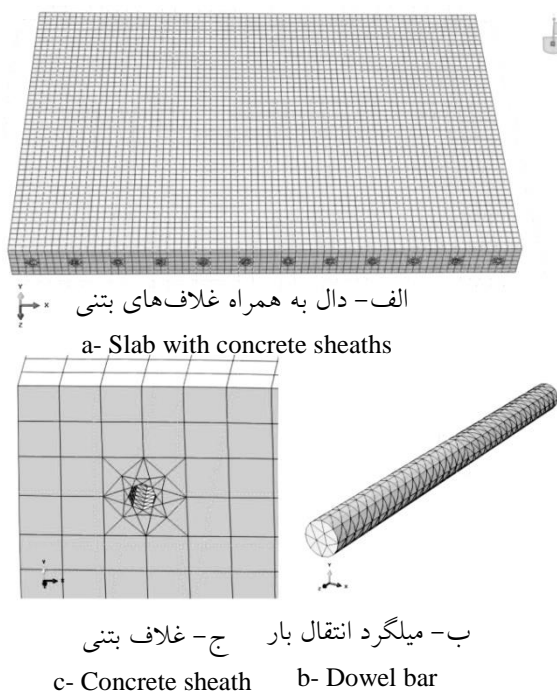


Fig. 4. Meshing of slab with concrete sheath and dowel bar

قیود در نظر گرفته شده شامل دو قید تقارن در محل تقارن مشخص شده در شکل‌های (۲ یا ۳) برای دال بتنی و لایه زیر اساس و قید گیرداری (مقید در برابر جابه‌جایی و دوران در راستای تمام محورهای مختصات) برای وجوه بدون تماس با دال بتنی در لایه زیراساس است.

جدول ۲. مشخصات مصالح مدل بدون میلگرد دال

| Layer | Materials properties | | | Thermal coefficient nt ($1/^\circ\text{C}$) |
|---------|--|---------------|--------------------------|---|
| | Mass of unit volume (Kg/m^3) | Poisson ratio | Elastic modulus (KPa) | |
| Slab | 2400 | 0.18 | 28×10^6 | 10×10^{-6} |
| Subbase | 1900 | 0.35 | 2×10^5 | - |

Table 2. Material properties of concrete pavement without dowel bar

مش‌بندی دال بتنی به صورت متقارن و المان‌های مش‌بندی با توجه به مطالعات قبلی، از نوع چهار وجهی منظم انتخاب شد. تحلیل انجام شده با مش‌بندی‌های متعدد تکرار شده تا مدل مستقل از مش حاصل شود.

در مدل دوم (مدل با میلگرد انتقال بار) ویژگی‌های مصالح و شرایط تماسی دال بتنی و لایه زیراساس مشابه مدل اول است. در این مدل دو دال بتنی متوالی که با درز عرضی از یکدیگر جدا شده‌اند روی لایه زیراساس قرار گرفته‌اند. میلگردهای انتقال بار یک بار بدون انحراف از حالت افقی و بار دیگر دارای انحراف از حالت افقی مدل شده‌اند.

با توجه به اینکه در عمل برای جلوگیری از چسبندگی میلگردهای انتقال بار با بتن، این میلگردها در تمام طولشان روغن‌کاری می‌شوند [3]، در مدل‌سازی نیز میلگرد انتقال بار بدون اصطکاک با غلاف بتنی فرض شده است. تفاوت دیگر مدل دوم (دارای میلگرد انتقال بار) نسبت به مدل اول (بدون میلگرد انتقال بار)، در مش‌بندی دال بتنی است. در مدل دوم برای قرارگیری میلگرد انتقال بار درون دال بتنی لازم است تا غلاف‌های بتنی در درون دال ایجاد شود. ایجاد غلاف در دال بتنی تقارن شکل دال را در محل قرارگیری میلگرد انتقال بار به هم زده و نیازمند استفاده از مش‌بندی به صورت

جدول ۳. مشخصات فولاد میلگرد انتقال بار

| Mass of unit volume (Kg/m ³) | Poisson ratio | Elastic modulus (KPa) | Thermal coefficient (1/°C) |
|--|---------------|-----------------------|----------------------------|
| 7800 | 0.3 | 200×10 ⁶ | 10×10 ⁻⁶ |

Table 3. Dowel bar properties

با ضریب اصطکاک ۱ است. علت این امر را به این شکل می-توان توضیح داد که در حالت وجود اصطکاک بیشتر بین دال و لایه زیراساس، برای ایجاد جابه‌جایی، دال مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد و این موضوع منجر به افزایش تنش کششی و اصطکاکی در دال می‌شود. این پدیده منطبق بر روابط مقاومت مصالح در خصوص تنش اصطکاکی بین دال بتنی و لایه زیر آن است [2]. پژوهش‌های وسویچ و همکارانش [4] نیز نشان می‌دهد، میزان اصطکاک بین دال بتنی و لایه زیراساس، روی تنش‌های ایجاد شده در بتن اثر مستقیم دارد.

شکل ۵. تغییرات بیشینه تنش اصطکاکی در راستای طول به ازای مقادیر مختلف ضریب اصطکاک برای افت دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد

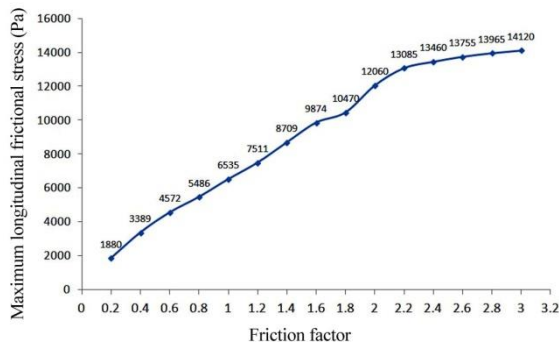


Fig. 5. Maximum longitudinal frictional stress versus friction factor for temperature loss of 12°C

شکل ۶. تغییرات بیشینه تنش اصطکاکی در راستای عرض دال به ازای مقادیر مختلف ضریب اصطکاک برای افت دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد

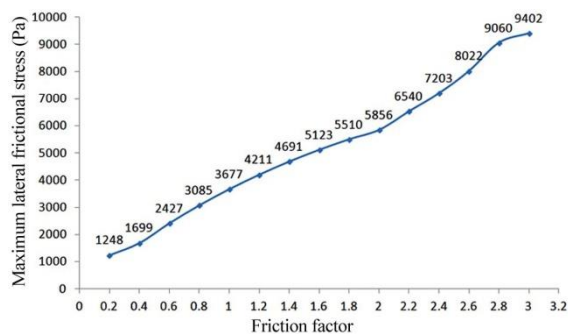


Fig. 6. Maximum lateral frictional stress versus friction factor for temperature loss of 12°C

۳-۵- اثر انحراف میلگرد انتقال بار بر مقادیر تنش برای مشخص شدن اثر انحراف میلگرد انتقال بار روی مقدار تنش‌ها، میلگردهای شماره ۳، ۷، ۹ و ۱۱ دارای انحراف، مدل

۵- نتایج حاصل از مدلسازی

۱-۵- نتایج حاصل از تغییرات ضریب اصطکاک برای مدل بدون میلگرد انتقال بار مقادیر تنش کششی و تنش اصطکاکی به ازای ضرایب اصطکاک ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۱، ۱/۲، ۱/۴، ۱/۶، ۱/۸، ۲، ۲/۲، ۲/۴، ۲/۶، ۲/۸ و ۳ برای افت دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد بدست آمده است (شکل‌های ۵، ۶ و ۷).

همان‌طور که در شکل‌های (۵، ۶ و ۷) مشاهده می‌شود، افزایش مقدار ضریب اصطکاک، موجب افزایش مقادیر تنش اصطکاکی در هر دو راستای طولی و عرضی می‌شود. البته مقدار تنش اصطکاکی ایجاد شده در راستای طولی بیشتر از مقدار آن در راستای عرضی است (طول دال بیشتر از عرض آن است). مقدار تنش کششی نیز که تابعی از میزان تنش اصطکاکی است با افزایش ضریب اصطکاک، افزایش می‌یابد.

۲-۵- نتایج حاصل از تغییرات افت دما برای مدل اول (بدون میلگرد انتقال بار)

در این قسمت ۵ حالت افت دمای ۵، ۱۲، ۱۹، ۲۶ و ۳۳ درجه سانتی‌گراد برای مدل بدون میلگرد انتقال بار به ازای دو ضریب اصطکاک ۱ و ۳ شبیه‌سازی شده است. از نظر اجرایی ضریب اصطکاک ۱ نشان‌دهنده حالتی است که از موادی مانند ورق پلی‌اتیلن در سطح تماس دال با لایه زیراساس استفاده شده و ضریب اصطکاک ۳ نماینده بحرانی-ترین حالت برای شرایط بین لایه‌ای در روسازی بتنی مدلسازی شده است.

شکل (۸) مقایسه مقدار تنش کششی ایجاد شده برای ۵ حالت افت دما به ازای دو ضریب اصطکاک ۱ و ۳ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، تغییرات تنش کششی در حالت ضریب اصطکاک ۳ بیشتر از وضعیت

میلگردهای انتقال بار با غلاف بتنی به دلیل ایجاد انحراف در میلگرد انتقال بار است. پژوهش‌های آزمایشگاهی و میدانی خازانویچ و همکارانش [16] نیز نشان می‌دهد در محل میلگردهای انتقال بار دارای انحراف، خردشدگی بروز کرده است که این امر بیانگر افزایش میزان تنش در محل این - میلگردها است. همچنین تحلیل عددی و آزمایشگاهی که به وسیله ساکسنا و همکارانش [18] روی دال‌های بتنی دارای میلگردهای انتقال بار انجام شد، نشان می‌دهد در محل این میلگردها، مقدار تنش به میزان قابل توجهی افزایش یافته است.

برای بررسی اثر تغییرات ضریب اصطکاک و افت دما در مدل دارای میلگرد انتقال بار با انحراف از حالت افقی، ۲ حالت افت دمای ۵ و ۳۳ درجه سانتی‌گراد به عنوان کمینه و بیشینه مقدار افت دمای معمول در طول شبانه روز و در دو حالت ضریب اصطکاک ۲ و ۳ در نظر گرفته شده است

شکل ۹. مقایسه تنش‌ها در المان‌های انتخابی برای مدل بدون میلگرد انتقال بار و با میلگرد انتقال بار و شرایط ایده‌آل

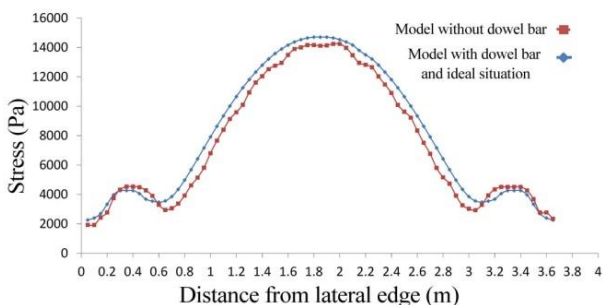


Fig. 9. Comparison of the stresses in selected elements without dowel bar misalignment

شکل ۱۰. نمودار توزیع تنش در المان‌های انتخابی برای مدل با میلگرد انتقال بار و دارای انحراف

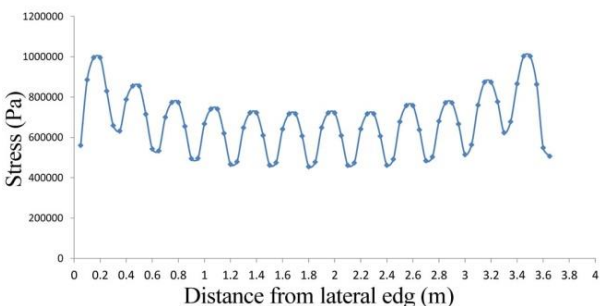


Fig. 10. Stress distribution in selected elements for concrete pavement containing dowel bar misalignment

شده و المان‌های محدوده قرارگیری میلگرد انتقال بار، انتخاب شدند. در ادامه نمودار تغییرات تنش برای این المان‌ها به ازای ضریب اصطکاک ۱ و افت دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد نمایش داده شده است (شکل‌های ۹، ۱۰).

شکل ۷. تغییرات بیشینه تنش کششی در دال به ازای مقادیر مختلف ضریب اصطکاک برای افت دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد

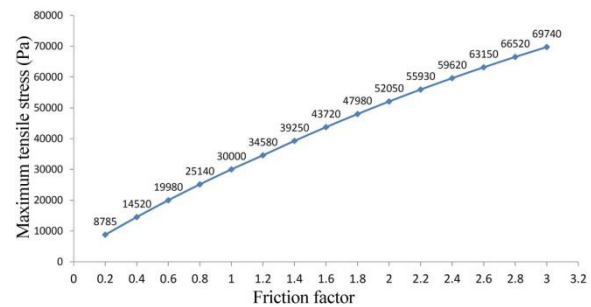


Fig. 7. Maximum tensile stress versus friction factor for temperature loss of 12°C

شکل ۸. تنش کششی ایجاد شده به ازای افت دماهای مختلف

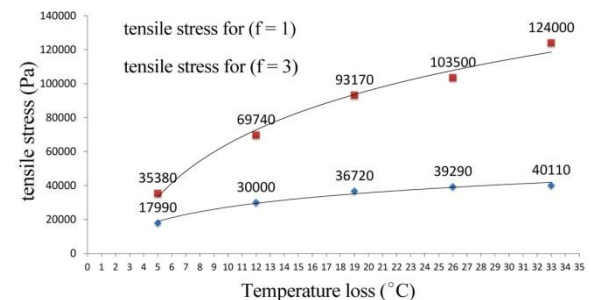


Fig. 8. Tensile stress versus temperature loss

شکل (۹) مقایسه مقادیر تنش در المان‌های انتخابی را برای مدل بدون میلگرد انتقال بار و مدل با میلگرد انتقال بار و با شرایط ایده‌آل نشان می‌دهد. مقادیر و چگونگی توزیع تنش در این شکل بیانگر کمترین تغییرات در چگونگی توزیع تنش و مقدار تنش در این حالات برای ضریب اصطکاک ۱ و افت دمای ۱۲ درجه سانتی‌گراد است.

شکل (۱۰) توزیع تنش را برای المان‌های انتخابی برای حالت انحراف میلگرد انتقال بار نشان می‌دهد. با توجه به نمودار شکل (۱۰) مقدار تنش در محدود میلگرد انتقال بار به اندازه قابل توجهی افزایش می‌یابد و چگونگی توزیع تنش دچار تغییرات عمده‌ای می‌شود. نقاط اوج نمودار هماهنگ با محل قرارگیری میلگردهای انتقال بار است که بیانگر درگیری

پژوهش‌های ساکسنا و همکارانش [19] است. پژوهشگران مذکور پس از بررسی‌های آزمایشگاهی و تحلیل عددی اظهار داشته‌اند که بروز خرابی در سطح روسازی بتنی (مانند خردشدگی درز و بروز ترک در مجاورت درز) معمولاً ناشی از انحراف میلگردهای انتقال بار است و با افزایش اصطکاک بتن و میلگرد انتقال بار افزایش می‌یابد. همچنین بررسی شکل-های (۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴) نشان می‌دهد، افزایش ضریب اصطکاک با تغییرات دمایی ثابت، مقدار بیشینه تنش کششی که در وسط دال بتنی رخ می‌دهد را به صورت طبیعی افزایش می‌دهد و به دلیل اینکه با ثابت بودن تغییرات دمایی، شرایط گیرداری ثابت باقی می‌ماند، بر انتهای دال بتنی تاثیر کمتری می‌گذارد.

شکل ۱۳. نمودار توزیع تنش برای ضریب اصطکاک ۲ و افت دمای ۳۳ درجه سانتی‌گراد

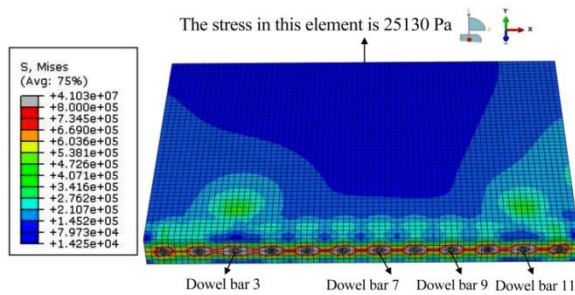


Fig. 13. Stress distribution for the friction factor of 2 and the temperature loss of 33°C

شکل ۱۴. نمودار توزیع تنش برای ضریب اصطکاک ۳ و افت دمای ۳۳ درجه سانتی‌گراد

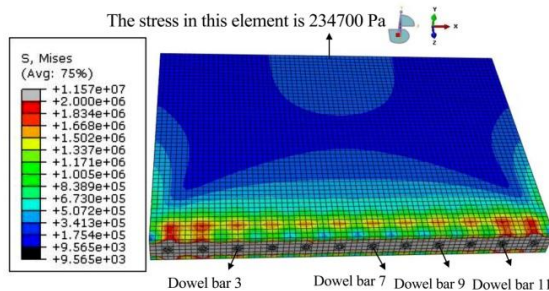


Fig. 14. Stress distribution for the friction factor of 3 and the temperature loss of 33°C

۶- بررسی پتانسیل بروز ترک در دال بتنی

با مقایسه نتایج بدست آمده از تحلیل‌های نرم افزاری، دال بتنی بدون میلگرد انتقال بار در بحرانی‌ترین حالت یعنی ضریب اصطکاک ۳ و افت دمای ۳۳ درجه سانتی‌گراد، تنش کششی

بر اساس راهنمای طراحی روسازی به روش آشتو [3] ضریب اصطکاک ۲ بیانگر قرارگیری دال بتنی روی لایه تثبیت شده با آهک یا قیر یا سیمان و ضریب اصطکاک ۳ بیانگر قرارگیری آن روی آسفالت سطحی است.

شکل‌های (۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۴) مقدار و توزیع تنش را برای حالات مختلف افت دما و ضریب اصطکاک نشان می‌دهند. بررسی این شکل نشان می‌دهد، تغییرات افت دما در صورت وجود انحراف در میلگرد انتقال بار از حالت افقی، بر محدوده قرارگیری میلگرد انتقال بار بیشتر اثرگذار است و ضریب اصطکاک بر تغییرات تنش در وسط دال بتنی اثرگذاری بیشتری دارد. دلیل احتمالی این رخداد را می‌توان در انقباض دال بتنی و درگیری میلگردهای انتقال بار دارای انحراف بیان نمود.

شکل ۱۱. نمودار توزیع تنش برای ضریب اصطکاک ۲ و افت دمای ۵ درجه سانتی‌گراد

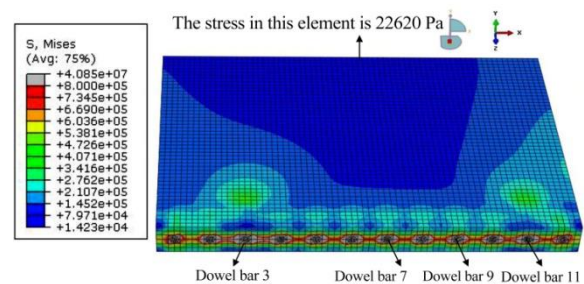


Fig. 11. Stress distribution for the friction factor of 2 and the temperature loss of 5°C

شکل ۱۲. نمودار توزیع تنش برای ضریب اصطکاک ۳ و افت دمای ۵ درجه سانتی‌گراد

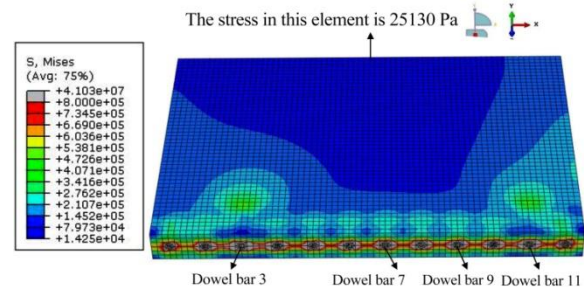


Fig. 12. Stress distribution for the friction factor of 3 and the temperature loss of 5°C

کاهش دمای بیشتر موجب انقباض بیشتر دال بتنی و در نتیجه مقاومت بیشتر میلگردهای دارای انحراف از حالت افقی در مقابل انقباض می‌شود و تنش را در اطراف این میلگردها افزایش می‌دهد. این موضوع تا حدودی منطبق بر نتایج

درگیر شدن میلگرد انتقال بار به دلیل انحراف از حالت افقی با دال بتنی باشد. این انحراف از حالت افقی یک حالت گیرداری در انتهای دال ایجاد می‌کند. هنگامی که دال بتنی به دلیل کاهش دما دچار انقباض می‌شود تمایل به کاهش حجم پیدا کرده و شروع به لغزیدن روی لایه زیراساس می‌کند، گیرداری ایجاد شده به وسیله انحراف میلگرد در کنار اصطکاک موجود در فصل مشترک دال و لایه زیراساس، در مقابل انقباض دال مقاومت می‌کند و در کاهش دماهای زیاد موجب درگیری بیشتر دال با لایه زیراساس به سبب تغییر شکل دال می‌شود. در این حالت در بحرانی‌ترین وضعیت یعنی ضریب اصطکاک ۳ و افت دمای ۳۳ درجه سانتی‌گراد، بیشینه تنش ایجاد شده در دال بتنی در محدوده قرارگیری میلگرد انتقال بار، مقداری بیش از ۲ مگاپاسکال است که دال بتنی را حتی در محدود زمانی بیش از ۲۴ ساعت تهدید می‌کند. این موضوع، اهمیت توصیه مندرج در مشخصات راهسازی آشتو [3]، مبنی بر ایجاد درزهای انقباضی در روسازی بتنی در فاصله زمانی ۴ تا ۲۴ ساعت پس از پخش بتن را بازگو می‌کند. در وسط دال بتنی و در بحرانی‌ترین حالت، مقدار تنش به ۲۳۴۷۰۰ پاسکال می‌رسد که نشان دهنده خطر بروز ترک در محدوده زمانی کمتر از ۱۲ ساعت از اجرای روسازی بتنی در این محدوده از دال بتنی است.

۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بهره‌گیری از روش المان محدود دو مدل از روسازی بتنی ساده در حالت با و بدون میلگرد انتقال بار تحت اثر تغییرات ضریب اصطکاک و افت دما بررسی شد. براساس تجزیه و تحلیل انجام شده می‌توان موارد زیر را به عنوان نتیجه‌گیری این پژوهش شمرد:

- ضریب اصطکاک و افت دما دو عامل مهم و اثرگذار در ایجاد ترک‌های زود هنگام در روسازی‌های بتنی درزدار ساده هستند.

- مقدار تنش کششی ایجاد شده در دال بتنی بدون میلگرد انتقال بار و دارای میلگرد انتقال بار با شرایط ایده‌آل (بدون انحراف)، از انتهای آزاد دال یعنی محل درز عرضی از کمینه مقدار خود تغییر کرده و به بیشینه مقدار خود در وسط دال بتنی

۱۲۴۰۰۰ پاسکال را تجربه می‌کند (با توجه به شکل ۱۱). مقایسه این مقدار با نتایج شکل (۱۵) نشان می‌دهد احتمال بروز ترک در دال بتنی تازه اجرا شده در محدوده زمانی ۷ تا ۸ ساعت اولیه اجرای روسازی بتنی وجود دارد. احتمال بروز ترک خارج از این محدوده زمانی برای دال بتنی به ویژه پس از رسیدن بتن به مقاومت کششی ۲۸ روزه بسیار کم است. توصیه مندرج در مشخصات راهسازی آشتو [3]، مبنی بر ایجاد درزهای انقباضی در روسازی بتنی در فاصله زمانی ۴ تا ۲۴ ساعت پس از پخش بتن را می‌توان در این راستا تلقی نمود. در دال بتنی دارای میلگرد انتقال بار و در شرایط ایده‌آل نیز همان نتیجه حاصل می‌شود. به عبارت دیگر هنگامی که میلگرد انتقال بار دارای انحراف از حالت افقی نیست دال بتنی آزادانه (بدون مقاومت از سوی میلگرد انتقال بار) بدلیل عدم وجود اصطکاک میلگرد انتقال بار و غلاف بتنی تغییر شکل می‌دهد در این صورت اصطکاک موجود بین دال بتنی و لایه زیراساس عامل موثر تهدید کننده دال بتنی است. مقدار تنش‌های ایجاد شده در دال بتنی به ویژه در اطراف میلگرد انتقال بار این موضوع را نشان می‌دهد. نمادهای s، L1 و L2 در شکل (۱۵) بیانگر بتن با سه ترکیب مصالح مختلف است [17].

شکل ۱۵. مقاومت کششی بتن در ساعات اولیه اجرا [17]

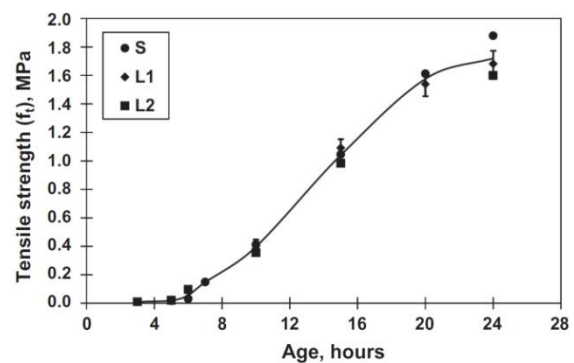


Fig. 15. Tensile strength of concrete at initial hours of construction

در دال بتنی که میلگرد انتقال بار آن دارای انحراف از حالت افقی است، در محدوده قرارگیری میلگردهای انتقال بار و همچنین در وسط دال بتنی مقدار تنش ایجاد شده در دال افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. علت این امر می‌تواند

Second Edition, University Of Kentucky.

[3] American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993* (Vol. 1). AASHTO.

[4] Wesevich, J.W., McCullough, B.F. and Burns, N.H., 1987. Stabilized subbase friction study for concrete pavements.

[5] Nguyen, D. and Dao, V., 2015. Tensile properties of early-age concrete. In Proceedings of the 27th Biennial National Conference of the Concrete Institute of Australia in conjunction with the 69th RILEM Week, Melbourne, Australia (pp. 1314-1324).

[6] Shoukry, S.N. and William, G.W., 2001. Analysis of thermal stresses induced in Doweled Transverse Joints. In *Advancing Airfield Pavements* (pp. 375-384).

[7] Won, M.C., Kim, S.M., Merritt, D. and McCullough, B.F., 2002. Horizontal cracking and pavement distress in Portland cement concrete pavement. In *Designing, Constructing, Maintaining, and Financing Today's Airport Projects* (pp. 1-10).

[8] Mahboub, K.C., Liu, Y. and Allen, D.L., 2004. Evaluation of temperature responses in concrete pavement. *Journal of Transportation Engineering*, 130(3), pp.395-401.

[9] Zhang, Y. and Liu, H., 2012. Finite Element Analysis of Thermal Stress for Continuous Reinforced Concrete Pavement (CRCP). *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)*, 6(2), pp.11-17.

[10] Kim, S., Ceylan, H. and Gopalakrishnan, K., 2014. Finite element modeling of environmental effects on rigid pavement deformation. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 8(2), pp.101-114.

[11] Mackiewicz, P., 2014. Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements. *Applied Thermal Engineering*, 73(1), pp.1169-1176.

[12] Zokaie-Ashtiani, A., Tirado, C., Carrasco, C. and Nazarian, S., 2016. Impact of different approaches to modelling rigid pavement base layers on slab curling stresses. *International Journal of Pavement Engineering*, 17(10), pp.861-869.

[13] Seo, Y. and Kim, S.M., 2013. Longitudinal cracking at transverse joints caused by dowel bars in jointed concrete Pavements. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 17(2), p.395.

[14] Lee, S.W., 2001. Behavior of concrete slab under frictional drag. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 5(2), pp.141-145.

[15] Khalkhali, A., 2007. Finite element analysis using ABAQUS. Dibagaran, Tehran. (In Persian)

[16] Khazanovich, L., Hoegh, K. and Snyder, M.B., 2009. *Guidelines for dowel alignment in concrete pavements*. Washington, DC, USA: Transportation Research Board.

[17] Roziere, E., Cortas, R. and Loukili, A., 2015. Tensile behaviour of early age concrete: New methods of investigation. *Cement and Concrete Composites*, 55, pp.153-161.

[18] Saxena, P., Hoegh, K., Khazanovich, L. and Gotlif,

می‌رسد.

● مقدار تنش اصطکاکی در راستای طولی از مقدار حداقل خود در وسط دال بتنی تغییر کرده و به مقدار حداکثر خود در محل درز عرضی می‌رسد.

● افت دمای زیاد به همراه ضریب اصطکاک قابل ملاحظه، می‌تواند در ۷ تا ۸ ساعت اولیه اجرای روسازی بتنی، تنش حرارتی معادل ۱۲۴۰۰۰ پاسکال ایجاد نماید که این مقدار تنش بیش از مقاومت کششی بتن در ساعات اولیه است، بنابراین در ساعات اولیه و تحت شرایط گفته شده، بروز ترک در رویه بتنی محتمل خواهد بود.

● ضریب اصطکاک حدود ۳ (بیشترین ضریب اصطکاک) هنگامی که روسازی بتنی به خوبی اجرا شده و میلگرد انتقال بار دارای شرایط ایده‌آل است (بدون انحراف بوده و به خوبی روغن کاری شده است) تنها در دوره عمل آوری بتن ممکن است موجب ایجاد ترک در دال بتنی شود و پس از رسیدن بتن روسازی به مقاومت کششی ۲۸ روزه به تنهایی اثری روی ایجاد ترک‌های روسازی ندارد و در کنار سایر عوامل مانند بارهای ترافیکی، انقباض ناشی از خشک‌شدگی بتن و تغییر شکل‌های ناشی از توزیع غیر یکنواخت دما در ضخامت دال بر روی دال بتنی اثر می‌گذارد.

● در هنگام افت دما، اثر انحراف میلگرد انتقال بار در ایجاد ترک در روسازی بتنی به مراتب بیشتر از اثر شرایط بین لایه‌ای است. به طوری که وجود انحراف از حالت افقی در میلگرد انتقال بار موجب افزایش بیش از ۵۰ برابری مقدار تنش در محدوده قرارگیری میلگردهای انتقال بار می‌شود.

● در دال بتنی با میلگرد انتقال بار منحرف شده از حالت افقی، تغییرات شرایط بین لایه‌ای (تغییر ضریب اصطکاک) در هنگام افت دمای ثابت، بیشتر بر تنش‌های ایجاد شده در وسط دال اثرگذار است در حالی که تغییرات افت دما در محدود میلگردهای انتقال بار اثر گذار است.

References

۸- مراجع

[1] Delatte, N.J., 2008. *Concrete pavement design, construction, and performance*. Taylor & Francis Group.

[2] Huang, Y.H., 2004. *Pavement Analysis And Design*,

joint lockup. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2095), pp.34-42.

A., 2012. Laboratory and analytical modelling of misaligned dowel. *International Journal of Pavement Engineering*, 13(3), pp.209-215.

[19] Saxena, P., Hoegh, K., Khazanovich, L. and Gotlif, A., 2009. Laboratory and finite element evaluation of

Numerical Analysis of Thermal Stress in Jointed plain concrete pavements

A. Mansourian^{1*}, M. Rezaei²

1- Assistant Professor, Research Center of Road, Building & Urban Development, Tehran, Iran

2- M.Sc., Highway Engineering, Faculty of Engineering, Islamic Azad University-South Tehran Branch, Tehran, Iran

*a.mansourian@bhrc.ac.ir

Abstract:

Temperature change is one of the major factors that causes cracks in concrete pavements. Temperature change causes expansion or contraction and thus creates a movement in the concrete slab. Friction between the concrete slab and the sub-base layer resists this movement, and induces thermal stress in the concrete. In this research study, the thermal stress created in concrete pavement due to drop in temperature and other intensifying factors (such as friction changes in layers interface), are investigated using numerical analysis method. In current research, two finite element models are used to analyze the friction and temperature drop stresses. The first concrete slab model does not have a dowel bar and the second includes the dowel bar with or without misalignment. Finite element models using ABAQUS software are created for concrete pavement with or without dowel bars, and with various friction factors between the concrete slab and the sub-base layer. The effects of friction factor between the concrete slab and the sub-base layer and temperature changes on frictional and tensile stresses in the concrete slab are analyzed for various cases. The results obtained in this research study indicate that the high temperature drop (about 30 °C) during the 7 to 8 initial hours of construction of concrete pavement and a high friction factor in the layers interface are the main causes of cracks in concrete pavements. The combined effects of these factors, high temperature drop and high friction factor in the layers interface, worsen the conditions. The low tensile strength of concrete during the initial days of the concrete formation is the main reason for increasing chance of occurring cracks during this period. In second part of the research, the thermal stress created in the concrete pavement with dowel bars deviating from the horizontal (a vertical tilt in the bars) is analyzed too. The research results show that the amount and the distribution of frictional and tensile stresses in the concrete slab when the dowel bars have no misalignment and are well lubricated, have conditions similar to the concrete pavements without dowel bars. Meanwhile numerical analysis results show that misalignment of the dowel bars and temperature drop, increase the tensile stress around the dowel bars and increase the threat of concrete disintegration. Ultimately, the results of numerical analysis are compared with the tensile strength of concrete during the initial hours of concrete construction. Results show that a 33°C drop in temperature and a friction factor about 3, create a tensile stress of 124000 Pascal in the concrete slab, which can cause cracks in the concrete pavement during the initial 7-8 hours of concrete pavement construction. Furthermore, a vertical tilt in the dowel bars causes a considerable increase in tension stress around the dowel bars. In order to prevent cracks during the initial days and hours of forming concrete pavements, the friction factor in the layers interface should be reduced using bond breaker, such as polyethylene sheets, concrete pavement should not be made in conditions with severe temperature drop, and dowel bars should be implemented with no or allowable misalignment.

Keywords: Concrete pavement, Crack, Friction, Dowel bar, Finite element.