

تحلیل تنشهای حرارتی در روسازیهای بتنی

ابوالفضل حسنی^{۱*}، رضا جالینوس^۲

۱- استاد مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

۲- کارشناس ارشد راه و ترابری، بخش مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

*تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۵

hassani@modares.ac.ir

(دریافت مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۴، پذیرش مقاله: اردیبهشت ۱۳۸۶)

چکیده- یکی از انواع تنشهایی که در روسازیهای بتنی به وجود می آید، تنش حرارتی است. از آنجاکه بتن نسبت به آسفالت در پاسخ به تغییرات حرارتی محیط، توانایی تغییر شکل کمتری دارد، تنشهای حرارتی در روسازیهای بتنی نیز حائز اهمیت بوده و در تحلیل عملکرد آنها، این تنشها نیز باید مانند تنشهای ناشی از بارهای ترافیکی منظور شود. تنشهای حرارتی در روسازیهای بتنی را می توان به سه گروه عمده: تنشهای فشاری ناشی از گیرداری انتهای دال، تنشهای کششی و فشاری ناشی از اصطکاک یا گیرداری دال با بستر و بالاخره تنشهای تابیدگی نیمه گیردار یا تمام گیردار تقسیم کرد. تنشهای گروه اول اهمیت چندانی ندارند زیرا بتن مقاومت فشاری بالایی داشته و احتمال کمتری برای خرابی روسازی از این طریق وجود دارد، اما وقوع تنشهای حرارتی دو نوع دیگر در روسازیهای بتنی اجتناب ناپذیر بوده و به تنهایی یا با افزوده شدن به تنشهای ناشی از بارهای ترافیکی (در مجموع: تنشهای ترکیبی)، می توانند باعث ترک خوردگی و شکست روسازی شوند. نتایج به دست آمده از این تحقیق مشخص ساخت که تنشهای ترکیبی ناشی از بارهای ترافیکی و تغییرات حرارتی روزانه، با طول دالها رابطه معکوس دارد، اما تنشهای ترکیبی ناشی از بارهای ترافیکی و تغییرات حرارتی شبانه با طول دالها رابطه مستقیم دارند. همچنین نتایج به دست آمده از روابط وسترگارد برای تنشهای تابیدگی ناشی از تغییرات حرارتی روزانه و شبانه، به ترتیب ۱۷ و ۳۰ درصد بیشتر از مقادیر واقعی است.

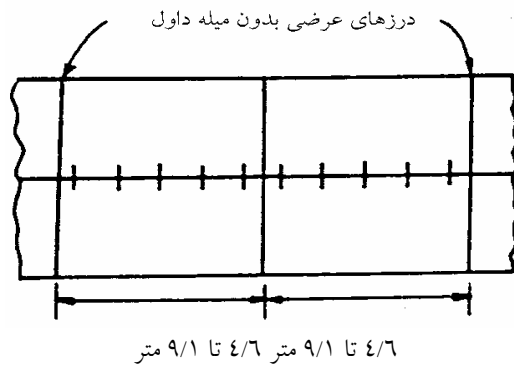
کلید واژگان: روسازی بتنی، تنشهای حرارتی، تنشهای تابیدگی، تنشهای ترکیبی.

۱- مقدمه

روسازی راهها به طور عمده به دو شکل آسفالتی و بتنی وجود دارند که هر یک مزایا و معایبی دارد. البته دو نوع روسازی دیگر به نام روسازیهای مرکب نیز وجود دارند که یکی دارای دال بتنی با روکش آسفالتی و دیگری روسازی آسفالتی با اساس بتنی است. با توجه به مشکلات روسازیهای آسفالتی در

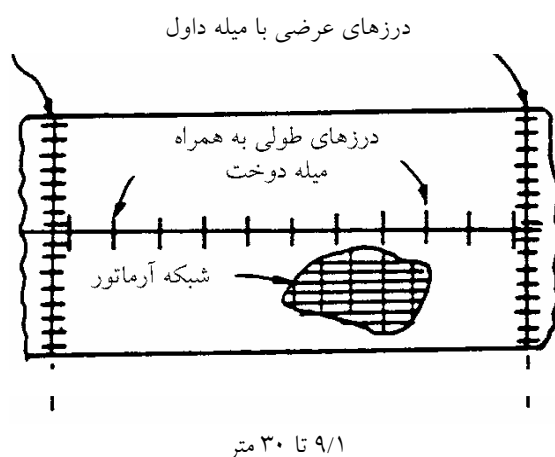
روسازی بیشتر راهها در ایران از نوع روسازیهای آسفالتی است. یکی از بارزترین دلایل این امر، وجود منابع نفتی از جمله قیر فراوان در ایران است. استفاده و کاربرد گسترده مصالح آسفالتی در طی سالهای متمادی در ایران، تجربیات و اطلاعات مناسبی را نیز در این زمینه به وجود آورده است.

بستگی دارد. بسته به نوع سنگدانه‌ها، آب و هوا و تجربیات موجود، درزها در فاصله‌ای بین ۴/۶ تا ۹/۱ متر ایجاد می‌شوند. شکل ۱ نمونه‌ای از روسازی بتنی غیرمسلح را نشان می‌دهد.



شکل ۱ روسازی بتنی غیرمسلح درزدار [۱]

روسازیهای بتنی مسلح درزدار، روسازیهایی است که در آنها علاوه بر بتن، از یک شبکه فولادی اعم بر میلگردهای آجدار یا غیرآجدار استفاده می‌شود. این شبکه فولادی بر ظرفیت باربری روسازی نمی‌افزاید اما اجازه می‌دهد که فاصله درزها بیشتر باشد. فاصله درزها در این نوع روسازیها بین ۹/۱ تا ۳۰ متر متغیر بوده و به دلیل طول نسبتاً زیاد آنها، استفاده از میلله‌های داوول در درزها برای انتقال بار در آنها ضروری است. شکل ۲ این نوع روسازی را نشان می‌دهد.



شکل ۲ روسازی بتنی مسلح درزدار [۱]

محورهای سنگین در مناطق گرمسیر - که اغلب دارای ناهمواری، موجهای بلند و متوالی و گاهی شکستگی است - کاربرد دال بتنی به‌عنوان لایه مقاوم و بادوام، باعث رفع مشکلات مزبور و کاهش دوره تعمیرات نیز خواهد شد. با وجود قابلیت‌های این روسازی، مشکلاتی نیز در بخشهای مختلف طراحی و اجرایی آن وجود دارد. به‌طور کلی می‌توان گفت که روسازیهای بتنی از حساسیت ویژه‌ای برخوردار بوده و بسیاری از مشکلات کوتاه‌مدت و بلندمدت این نوع روسازیها می‌تواند از عدم‌شناخت و طراحی صحیح آنها ناشی شود. در این مقاله سعی شده است که یکی از علل خرابیهای روسازیهای بتنی که تنشهای حرارتی است، تحلیل شود.

۱-۱- روسازیهای بتنی

روسازی بتنی نوعی رویه بتنی است که از سیمان، مصالح سنگی شامل شن و ماسه، آب و در مواردی افزودنیهای شیمیایی تشکیل شده و به‌منظور ایجاد سطحی هموار برای عبور وسایل نقلیه سبک و سنگین ساخته می‌شود. به‌طور کلی روسازیهای بتنی را می‌توان به سه گروه روسازیهای بتنی غیرمسلح درزدار یا JPCP^۱، روسازیهای بتنی مسلح درزدار یا JRCP^۲ و روسازیهای بتنی مسلح پیوسته که به اختصار CRCP^۳ نامیده می‌شود، تقسیم کرد.

روسازیهای بتنی غیرمسلح درزدار، روسازیهایی هستند که در آنها فقط از بتن استفاده شده و فاقد هرگونه میلگردی به‌جز میلله‌های دوخت^۴ هستند. در این نوع روسازیها برای انتقال بار هم از قفل و بست سنگدانه‌ها و هم از میلله‌های داوول^۵ می‌توان استفاده کرد که البته استفاده از میلله‌های داوول در این نوع روسازیها، به مؤسسات راهسازی و نوع ترافیک عبوری

1. Joint Plain Concrete Pavements
2. Joint Reinforced Concrete Pavements
3. Continous Reinforced Concrete Pavements
4. Tie Bars
5. Dowel Bars

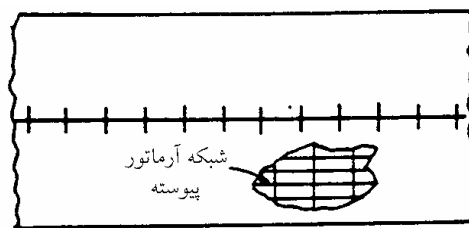
ناچیز بوده و بسیار کمتر از مقاومت فشاری بتن روسازی است و به علاوه با اجرای صحیح روسازی و قرار دادن درز در فواصل مناسب می توان از پیدایش آن جلوگیری کرد.

همانطور که می دانیم، تغییرات درجه حرارت محیط باعث می شود که در روسازیهای بتنی انقباض و انبساط به وجود آید که این مسأله لغزش دالها بر روی بستر یا لایه اساس را در پی دارد و منجر به انتقال برش یا اصطکاک بین دال و بستر می شود. این اصطکاک بسته به اینکه دال در معرض افزایش یا کاهش درجه حرارت باشد، منجر به ایجاد تنشهای فشاری و کششی در بتن می شود که اصطلاحاً تنشهای اصطکاکی نامیده می شوند.

یکی دیگر از مسائلی که بر اثر تغییرات درجه حرارت در روسازیهای بتنی اتفاق می افتد، تنشهای ناشی از تابیدگی است. نحوه پیدایش این تنشها بدین صورت است که در طول روز، گرم شدن تدریجی هوا سبب می شود که درجه حرارت بالای دال بیشتر از قسمتهای زیرین آن شود و در نتیجه سطح بالایی دال نسبت به محور خنثی منبسط می شود در حالی که سطح پایینی آن منقبض می شود. این پدیده در حالی اتفاق می افتد که وزن دال به صورت نیرویی مخالف با آن مقابله کرده و سبب ایجاد تنش در دال شده و منجر به تنش فشاری در بالای دال و تنش کششی در زیر آن می شود. بعکس در طول شب، سرد شدن تدریجی هوا سبب می شود که درجه حرارت بالای دال کمتر از قسمتهای زیرین آن شود در نتیجه بالای دال نسبت به پایین آن منقبض شده و مخالفت نیروی وزن، سبب ایجاد تنش کششی در بالای دال و تنش فشاری در پایین آن می شود [۱، ۲، ۳].

برای تشریح این مسأله به روشی دیگر می توان رفتار دال را بر روی بستر، با استفاده از یک صفحه و تعدادی فنر که به آن متصل شده، مدلسازی کرد. در شکل ۴ صفحه و فنرهای مزبور نشان داده شده است.

یکی دیگر از انواع روسازیهای بتنی، روسازیهای بتنی مسلح پیوسته است. تفاوت این نوع روسازیها با روسازیهای بتنی مسلح درزدار در این است که فاقد هر گونه درز عرضی (به جز تعداد محدودی درز انبساطی و درزهای اجرایی) است. در مقابل، برای جلوگیری از بازشدگی بیش از حد ترکها، از مقدار نسبتاً زیادی آرماتور حرارتی استفاده می شود. شکل ۳ این نوع روسازی را نشان می دهد.



شکل ۳ روسازی بتنی مسلح پیوسته [۱]

۲- تنشهای حرارتی در روسازیهای بتنی و انواع آنها

یکی از انواع تنشهایی که در روسازیهای بتنی به وجود می آید، تنشهای حرارتی است. از آنجاکه بتن نسبت به آسفالت در پاسخ به تغییرات حرارتی محیط، توانایی تغییر شکل کمتری دارد، تنشهای حرارتی در روسازیهای بتنی حائز اهمیت بوده و در تحلیل عملکرد آنها باید مانند تنشهای ناشی از بار ترافیکی به حساب آیند. تنشهای حرارتی در روسازیهای بتنی را می توان به سه گروه تنشهای فشاری ناشی از گیرداری انتهای دال، تنشهای کششی و فشاری ناشی از اصطکاک یا گیرداری دال با بستر و تنشهای تابیدگی نیمه گیردار یا تمام گیردار تقسیم کرد [۱، ۲، ۳].

اگر دال بتنی بدون آنکه فضایی برای انبساط داشته باشد، بین دو تکیه گاه صلب قرار گیرد، هر دمایی بیش از دمای زمان ریختن آن دال، منجر به ایجاد تنشهای فشاری داخلی در آن می شود. البته تنشهای فشاری ناشی از انبساط حرارتی معمولاً

که در آن:

ϵ_t : ضریب انبساط حرارتی بتن

E : ضریب ارتجاعی بتن

h : ضخامت دال

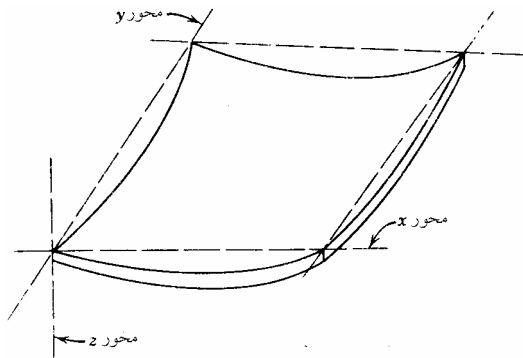
μ : ضریب پواسن

Δt : اختلاف درجه حرارت بالا و پایین دال

M_x : ممان حول محور X

M_y : ممان حول محور Y

M_z : ممان حول محور Z



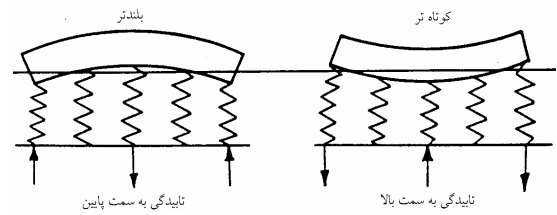
شکل ۵ انحنای دال بر اثر تابیدگی حرارتی [۲]

از مفاهیم ارائه شده به وسیله وسترگارد، برادبری^۲ برای تعیین ضرایبی به منظور حل مسأله استفاده کرد. ضرایب نشان داده شده در شکل ۶ در معادلات زیر استفاده می شوند:

$$\sigma = \frac{cE\epsilon_t \Delta t}{2} \quad \text{تنشهای لبه} \quad (4)$$

$$\sigma = \frac{E\epsilon_t \Delta t}{2} \left(\frac{c_1 + \mu c_2}{1 - \mu^2} \right) \quad \text{تنشهای داخلی} \quad (5)$$

در روابط فوق، C_1 ضریب در جهت مطلوب و C_2 در جهت عمود بر جهت C_1 است. L_x و L_y به ترتیب طول و عرض آزاد دال است.



شکل ۴ تابیدگی دال به دلیل شیب حرارتی [۱]

بر اساس مدل سازی تئوری صفحه و فنر ارائه شده در بالا، وسترگارد معادلاتی را برای تعیین تنشهای ناشی از تابیدگی در روسازیهای بتنی ارائه کرد. این تحلیل و معادلات آن در بخش بعدی ارائه می شود.

۳- تحلیل وسترگارد^۱

چنانچه دال در معرض شیب حرارتی مشخصی در عمق خود قرار گیرد، در سطح خود دچار تابیدگی می شود. برای مثال، شکل ۵ این مسأله را نشان می دهد. این شکل دالی را نشان می دهد که بالای آن سردتر از پایین آن بوده و این مسأله باعث تابیدگی گوشه های دال به سمت بالا شده است. اما وزن دال با این تابیدگی به مخالفت برخاسته و سعی می کند دال را در موقعیت اولیه آن نگاه دارد که این باعث ایجاد تنش می شود. تحلیل تنشها در روسازیهای بتنی با استفاده از معادلاتی که به وسیله وسترگارد برای سطح خمیده شکل ۵ ارائه شد، صورت گرفت که این معادلات در زیر ارائه شده است:

$$-\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} = \frac{12}{Eh^3} (M_x - \mu M_y) + \frac{\epsilon_t \Delta t}{h} \quad (1)$$

$$-\frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = \frac{12}{Eh^3} (M_y - \mu M_x) + \frac{\epsilon_t \Delta t}{h} \quad (2)$$

$$-\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y} = \frac{12}{Eh^3} (1 + \mu) M_z \quad (3)$$

2. Bradbury

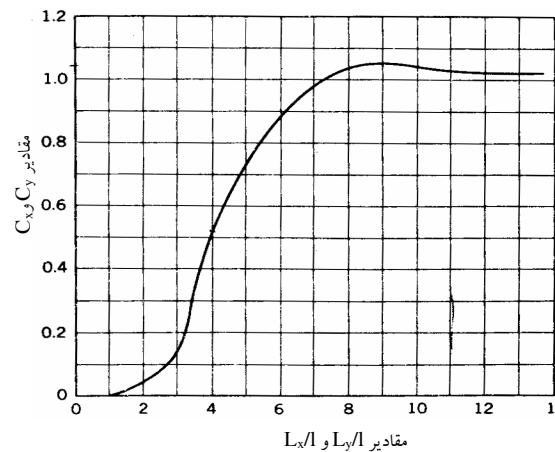
1. Westergaard

۳-۱- شبیهای حرارتی

در سال ۱۹۶۲ در آزمایش راه آشتو^۱، درجه حرارت در دالی به ضخامت ۱۶/۵ سانتیمتر اندازه‌گیری شد. در این آزمایش، حاصل تفریق دما در نقطه ۶/۴ میلیمتری زیر سطح بالای دال از دمای نقطه ۱۲/۷ میلیمتری بالای سطح زیرین دال به‌عنوان دیفرانسیل حرارتی استاندارد شناخته شد. حداکثر اختلاف درجه حرارت استاندارد که در ماههای تابستان به‌دست آمد در حدود ۱۰/۲ درجه سانتیگراد، برای حالتی بود که دال دچار تابیدگی به سمت پایین می‌شد و ۴/۹- درجه سانتیگراد برای حالتی بود که دال دچار تابیدگی به سمت بالا می‌شد. این مقادیر به ترتیب متناظر با شبیهای حرارتی در حدود ۰/۰۷ درجه سانتیگراد به‌ازای هر میلیمتر و ۰/۰۳ درجه سانتیگراد به‌ازای هر میلیمتر است. در این رابطه مؤسسه آشتو آزمایشهایی بر روی دالهایی با ضخامتهای دیگر نیز انجام داد. اندازه‌گیری دما در این دالها نشان داد که اختلاف دما یا به بیان دیگر دیفرانسیل حرارتی، متناسب با ضخامت دال نبوده و آهنگ افزایش آن به سرعت افزایش ضخامت دال نیست، بنابراین می‌توان گفت شبیهای حرارتی بیشتر را می‌توان برای دالهای نازکتر به‌کار برد [۱].

۳-۲- تنشهای ترکیبی

همانطور که در بخشهای قبلی نشان داده شد، تغییرات جوی و درجه حرارت می‌توانند مانند بارگذاری باعث ایجاد تنش در روسازیهای بتنی شوند. یکی از بحرانی‌ترین شرایطی که ممکن است روی دهد، هنگامی است که تنشهای ناشی از تغییر دما با تنشهای ناشی از بارهای ترافیکی جمع شوند. این شرایط هنگامی رخ می‌دهد که گوشه‌های دال به سمت بالا تابیده و بارگذاری در یکی از گوشه‌ها اعمال شود یا هنگامی که دال به سمت پایین تابیده و بار در قسمتهای داخلی آن اعمال شود که به این تنشها، تنشهای ترکیبی گفته می‌شود. [۱، ۲].

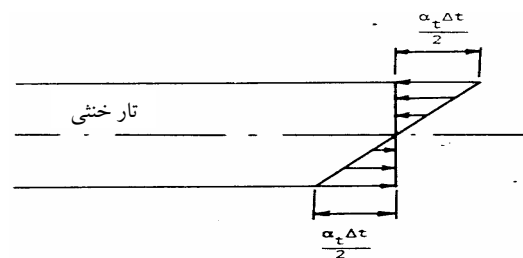


شکل ۶ ضرایب تنشهای تابیدگی [۲]

در تحلیل وسترگارد چنانچه اختلاف درجه حرارت بین بالا و پایین دال Δt و ضریب انبساط حجمی بتن α_t باشد، فرض بر این است که حداکثر کرنش فشاری و کششی در بالاترین و پایین‌ترین تارها در مقطع دال برابر است با:

$$\epsilon_x = \epsilon_y = \frac{\alpha_t \Delta t}{2} \quad (6)$$

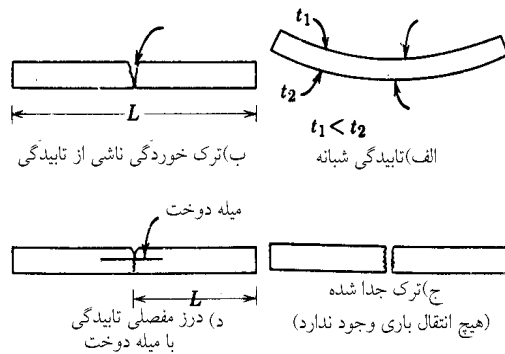
این مسأله در شکل ۷ نشان داده شده است:



شکل ۷ شیب حرارتی در دال بتنی [۱]

این فرض بر این پایه است که توزیع حرارت در عمق دال خطی است، در حالی که این مسأله، تقریبی از واقعیت است، زیرا توزیع درجه حرارت در عمق دال به‌شدت غیرخطی است [۱، ۲، ۳].

1. AASHTO



شکل ۸ شکلگیری ترک در دال بتنی بر اثر تابیدگی (الف-ج) انتقال بار به وسیله میلله دوخت (د) [۲]

۴- نحوه مدلسازی

در این تحقیق از نرم‌افزار انسیس^۱ و از دو المان آن به نامهای SOLID۶۵ و COMBIN۱۴ استفاده شده است [۴]. برای مدلسازی روسازی بتنی از المان SOLID۶۵ و برای مدلسازی عکس‌العملهای قائم و افقی خاک و همچنین مدلسازی رفتار میلله دوخت و میلله داوول از COMBIN۱۴ استفاده شده است [۴].

۴-۱- معرفی المانهای SOLID۶۵ و COMBIN۱۴

المان SOLID۶۵ یکی از المانهای ارائه شده در نرم‌افزار انسیس است. از این المان می‌توان به منظور مدلسازی سازه‌های بتنی اعم بر مسلح و غیرمسلح استفاده کرد. این المان امکان مدلسازی رفتار بتن نظیر ترک خوردگی در کشش و خردشدگی در فشار را دارد. اهمیت خاص این المان، قابلیت در نظر گرفتن رفتارهای غیرخطی بتن است. بتنی که به وسیله این المان مدلسازی می‌شود، می‌تواند دچار ترک خوردگی، خردشدگی، تغییر شکل خمیری^۲ و خزش^۳ در سه جهت متعامد شود. آرماتورها نیز توانایی تحمل کشش

۳-۳- اثر تنشهای تابیدگی، تنشهای ترکیبی،

انقباض و انبساط بر روسازیهای بتنی

چنانچه دالی در معرض یک شیب حرارتی در عمق آن قرار گیرد، دچار تابیدگی می‌شود. این تابیدگی به وسیله وزن دال مقید شده و در نتیجه در دال تنش به وجود می‌آید. علاوه بر آن تغییرات یکنواخت حرارتی نیز که منجر به انقباض و انبساط شوند، می‌توانند باعث ایجاد تنش در روسازیهای بتنی شوند. عوامل فوق باعث می‌شوند که در بیشتر موارد، دالهای بلند در فواصلی بین درزها دچار ترک خوردگی شوند. همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده، چنانچه ترکی به دلیل تابیدگی در دال به وجود آید، دال بر روی بستر نشسته و سپس بر اثر افت یکنواخت درجه حرارت و کشیده شدن، به دو تکه مجزا تقسیم شده و در نتیجه انتقال بار بین دو قطعه مجاور از بین می‌رود (شکل ۸-ج). برای جلوگیری از این مسأله در درزها از میلله دوخت استفاده می‌شود، تا مانع از حرکت دال شده و دالها را در مجاورت یکدیگر نگاه دارد تا از این طریق، انتقال بار از طریق قفل و بست سنگدانه‌ها ادامه یابد. از آنجاکه در دالهای بلند ترک خوردگی در فواصل میانی درزها تقریباً اجتناب‌ناپذیر است، به منظور حفظ و انتقال بار به وسیله قفل و بست سنگدانه‌ها و همچنین بسته نگاه داشتن ترک، از آرماتورهای در طول دال استفاده می‌شود که آرماتورهای حرارتی نامیده می‌شوند. این آرماتورها به ظرفیت باربری روسازی نمی‌افزایند و فقط به منظور کنترل عرض ترک به کار می‌روند. البته باید دانست که تنشهایی که بر اثر تغییرات حرارت و رطوبت در روسازیهای بتنی به وجود می‌آیند، مستقل از بارهای اعمالی بوده و تنها در برخی موارد با یکدیگر جمع می‌شوند.

1. ANSYS
2. Plastic Deformation
3. Creep

۴-۲- مدلسازی بستر

یکی از مسائل مهمی که در مدلسازی روسازیهای بتنی وجود دارد، مدلسازی رفتار خاک بستر در زیر روسازی است. در این رابطه، نوعی مدلسازی به نام وینکلر یا مایع متراکم (DL) وجود دارد که بیش از سایر مدلسازیها استفاده می شود [۱]. در مدلسازی وینکلر فرض بر این است که مقاومت برشی بستر در مقایسه با ظرفیت برشی آن ناچیز است و در نتیجه بستر را به صورت تعدادی فنر مستقل مدلسازی می کند. در شکل ۱۱ این مدلسازی نشان داده شده است. در شکل ۱۱ k سختی هر یک از فنرها است که از حاصل ضرب ضریب واکنش بستر در مساحت اختصاص داده شده به هر فنر به دست می آید.

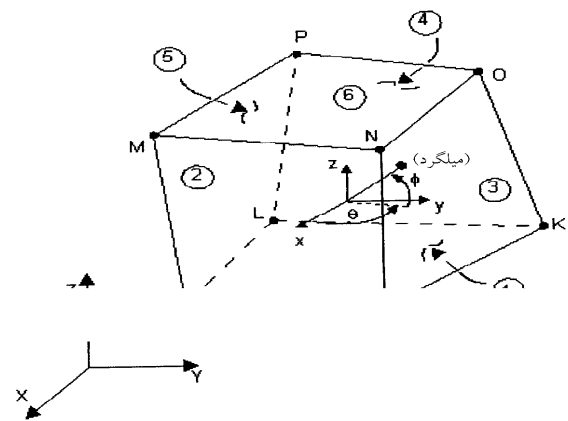


شکل ۱۱ دال بر روی فونداسیون وینکلر [۱]

۴-۳- مدلسازی اصطکاک دال با بستر

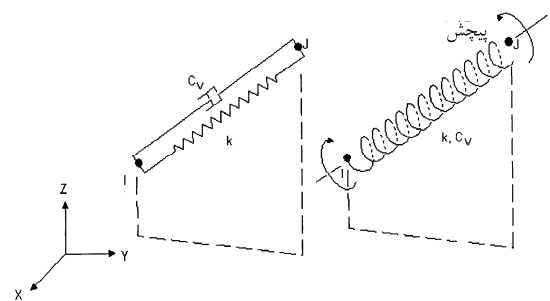
قبل از اینکه به نحوه مدلسازی اصطکاک دال با بستر یا لایه زیرین آن پرداخته شود، لازم است قانون حاکم بر تنش اصطکاک در سطح مشترک بین دال و لایه اساس توصیف شود. مطالعات تجربی و تحقیقات نشان می دهند که نوعی تابع دو ضابطه ای - خطی بین تنش اصطکاک و لغزش دال در سطح مشترک بین لایه اساس و دال حاکم است [۵]. با استفاده از نتایج به دست آمده از آزمایشهای لغزش دال بتنی بر روی انواع مختلفی از لایه های اساس، می توان نمودارهایی را از تنش

و فشار را دارند، اما نمی توانند برش را تحمل کنند. آرماتورها همچنین توانایی تغییر شکل خمیری و خزش را دارند. از آنجاکه در روسازیهای بتنی برای آرماتور، توان و ظرفیت باربری را در نظر نمی گیریم، این المان بهترین گزینه برای مدلسازی روسازیهای بتنی مسلح و غیرمسلح است [۴]. شکل ۹ المان مذکور را نشان می دهد.



شکل ۹ المان SOLID65 [۴]

المان COMBIN۱۴ نیز یکی دیگر از المانهای ارائه شده در انسیس است که قابلیت فنی به منظور مدلسازی سختیهای طولی محوری یا پیچشی محوری در مدلسازیهای یک بُعدی، دو بُعدی یا سه بُعدی را دارد. شکل ۱۰ المان مزبور را نشان می دهد.



شکل ۱۰ المان COMBIN۱۴ [۴]

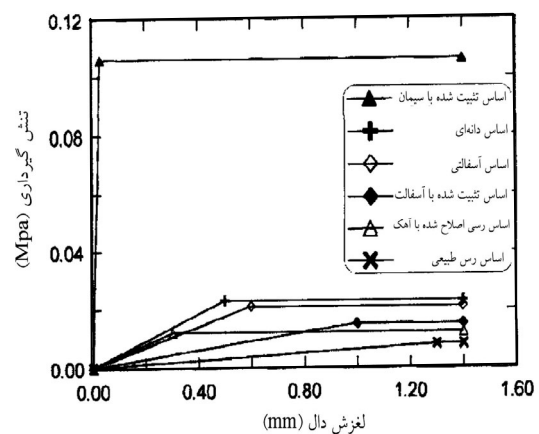
جدول ۱ مشخصات گیرداری لایه‌های اساس مختلف [۵]

لغزش (δ_0) (mm)	تنش اصطکاکی (τ_0) (Mpa)	نوع لایه اساس
۰/۰۲۵	۰/۱۰۶	اساس تثبیت شده با سیمان (CS)
۰/۲۵	۰/۱۰۴	اساس مخلوط آسفالتی گرم (AC-R)
۰/۵	۰/۰۲۳	اساس دانه‌ای (GR)
۰/۶	۰/۰۲۱	اساس آسفالتی (AC-S)
۱	۰/۰۱۵	اساس تثبیت شده با آسفالت (AS)
۰/۳	۰/۰۱۲	اساس رس اصلاح شده با آهک (LTC)
۱/۳	۰/۰۰۸	اساس رس طبیعی (NC)

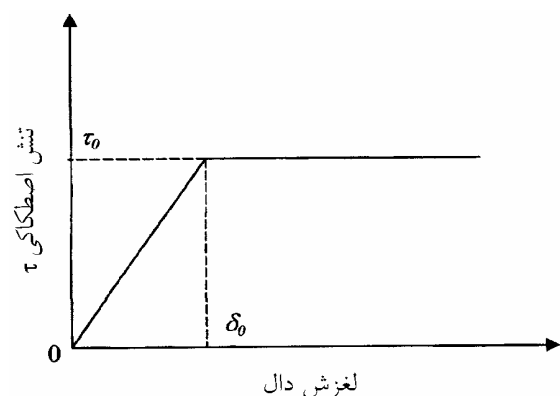
دو پارامتر τ_0 یا تنش اصطکاکی دائمی و δ_0 یا لغزش نظیر تنش اصطکاکی دائمی، بیشتر به نوع لایه اساس بستگی داشته و به وسیله آزمایش لغزش دال بر روی لایه اساس مشخص، در آزمایشگاه می‌توان آن را به دست آورد. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برای هفت نوع لایه اساس در جدول ۱ ارائه شده است [۵].

اکنون با دانستن قانون حاکم بر اصطکاک دال بتنی با لایه زیرین آن می‌توان اصطکاک دال را مدل‌سازی کرد. برای این منظور با فرض خطی بودن اصطکاک بین دال با لایه اساس یعنی قسمت اول شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و با توجه به در اختیار داشتن مقادیر تنش اصطکاکی دائمی و لغزش نظیر آن، ثابت فنر اصطکاکی را در هر دو جهت به سادگی می‌توان محاسبه کرد. برای این منظور، تنش اصطکاکی دائمی را بر لغزش نظیر تقسیم کرده و حاصل را در مساحت زیر دال ضرب می‌کنیم تا سختی اصطکاکی کل زیر دال به دست آید. سپس مقدار به دست آمده را بر تعداد فنر اختصاص داده شده - به منظور مدل‌سازی اصطکاک در هر جهت - تقسیم می‌کنیم تا سختی هر فنر به دست آید [۶].

اصطکاکی به وجود آمده نسبت به جابه‌جایی رسم کرد. این نمودارها در شکل ۱۲ نشان داده شده است [۵]. از این نمودارها به آسانی می‌توان نتیجه گرفت که تنش برشی ابتدا خطی است و با افزایش لغزش، افزایش می‌یابد تا به مقدار مشخصی برسد (این مقدار اصطلاحاً تنش اصطکاکی دائمی نامیده می‌شود) [۵]، سپس تنش در این مقدار ثابت باقی می‌ماند؛ حتی اگر لغزش به روند افزایشی خود ادامه دهد. این مسأله به طور شماتیک در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۲ تنشهای گیرداری ایجاد شده در دال بتنی به دلیل لغزش دال بر روی لایه‌های اساس مختلف [۵]



شکل ۱۳ رابطه تنش اصطکاکی با لغزش دال [۵]

۴-۴- مدلسازی درز و میله داوِل

به منظور مدلسازی انتقال بار در درز به وسیله قفل و بست سنگدانه‌ها یا میله‌های داوِل، می‌توان از یک فنر برشی که مقدار ثابت C_w و یک فنر چرخشی که مقدار ثابت C_θ دارد، استفاده کرد. اما در بیشتر موارد می‌توان گفت انتقال باری که در دو طرف درز انجام می‌شود، اساساً برشی است؛ یعنی $C_\theta = 0$. به منظور در نظر گرفتن اثر میله داوِل در تحلیل‌های اجزای محدود، روش ساده‌ای به وسیله هوآنگ^۱ در سال ۱۹۷۸ ارائه شد که در آن ثابت فنر برشی به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود [۶]:

$$C_w = \frac{1}{S_b \left(\frac{z}{GA} + \frac{z+Bz}{2B^3 E_d I_d} \right)} \quad (7)$$

که در آن:

C_w : ثابت فنر برشی

S_b : فاصله میله‌های داوِل از یکدیگر

z : عرض درز

A : سطح مقطع میله داوِل

B : صلیبیت نسبی میله داوِل قرار گرفته در بتن

I_d : ممان اینرسی میله داوِل

E_d : ضریب ارتجاعی میله داوِل

G : ضریب برشی میله داوِل

معادله (۷) نشان می‌دهد که با داشتن فاصله و قطر میله داوِل،

همراه با عرض درز می‌توان ثابت فنر برشی را تعیین کرد [۶].

۴-۵- مدلسازی میله‌های دوخت^۲

میله‌های دوخت آرماتورهایی هستند که در امتداد درزهای طولی قرار گرفته و به وسیله آنها دو دال مجاور درز، محکم به یکدیگر بسته می‌شوند و می‌توان با استفاده از آنها

از انتقال بار در دو دال به وسیله قفل و بست سنگدانه‌ها مطمئن شد. بنابراین می‌توان دریافت که وظیفه این آرماتورها، تحمل نیروهای محوری کششی است. از طرفی از علم مقاومت مصالح می‌دانیم که سختی محوری میله تحت اثر نیروی محوری برابر است با:

$$K = \frac{AE}{L} \quad (8)$$

که در آن:

K : سختی محوری میله

L : طول میله

A : سطح مقطع میله

E : ضریب ارتجاعی میله

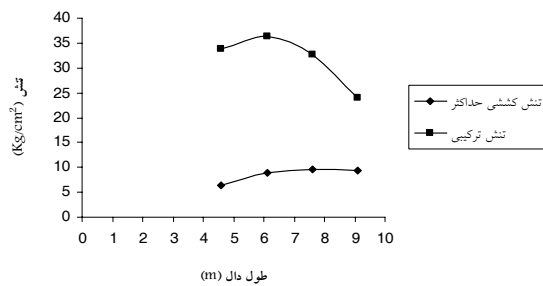
بنابراین برای مدلسازی میله‌های دوخت از فنری با

سختی رابطه (۸) می‌توان استفاده کرد [۶].

۵- دالهای طراحی شده برای مدلسازیها

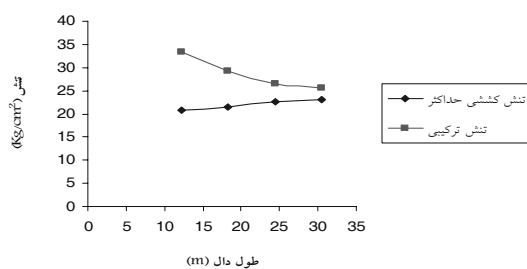
ابتدا به منظور طراحی دالهای نمونه، با توجه به آیین‌نامه‌های ارائه شده به وسیله مؤسسه سیمان پرتلند، آشتو و کمیته طراحی روسازیهای بتنی ACI، میله‌های دوخت، آرماتورهای طولی و عرضی و میله‌های داوِل با توجه به روابط و توضیحات ارائه شده در آنها برحسب مورد طراحی شد. از آنجا که در روسازیهای بتنی معمولاً عرض دال را برابر یک خط عبور در نظر می‌گیرند، عرض دالها ۳/۶ متر (۱۲ فوت) در نظر گرفته شد. برای بررسی تغییرات تنشهای تابیدگی و ترکیبی با طول دالها، از دالهایی با طول ۴/۶، ۶/۱، ۷/۶ و ۹/۱ متر در روسازیهای بتنی غیر مسلح و از دالهای ۱۲/۲، ۱۸/۳، ۲۵ و ۳۰ متری در روسازیهای بتنی مسلح استفاده شد. برای تمامی دالهای مذکور ضخامت ۲۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد. در روسازیهای بتنی مسلح پیوسته نیز تنشهای تابیدگی و ترکیبی، در ضخامت دالها بررسی شد. ضخامت دالهای نمونه در

1. Huang
2. Tie Bars



شکل ۱۵ تغییرات تنشهای کششی حداکثر ناشی از تابیدگی و تنشهای ترکیبی، به دلیل شیب حرارتی شبانه، با طول دال در روسازیهای بتنی غیرمسلح [۶]

۳- در روسازیهای بتنی مسلح نیز تنشهای تابیدگی تقریباً به صورت خطی با طول دال افزایش می یابد، اما مانند روسازیهای بتنی غیرمسلح، تنشهای ترکیبی ناشی از بار ترافیک و شیب حرارتی روزانه با طول دالها رابطه معکوس داشته و هر چه طول دالها بیشتر باشد، از مقدار آنها کاسته می شود، اما تنشهای ترکیبی ناشی از شیب حرارتی شبانه و بار ترافیک با طول دال رابطه مستقیم و خطی داشته و با ازدیاد طول دال، افزایش می یابد. از مقایسه شکل‌های ۱۶ و ۱۷ می توان نتیجه گرفت که تنشهای ترکیبی ناشی از شیب حرارتی شبانه و بار ترافیک در روسازیهای بتنی مسلح، بسیار کمتر از روسازیهای بتنی غیرمسلح است. دلیل این مسأله وجود میله‌های داوول در این نوع روسازیه‌ها است که باعث انتقال بار به دال مجاور شده و در نتیجه، تنش کاهش می یابد [۶] (شکل‌های ۱۶ و ۱۷).



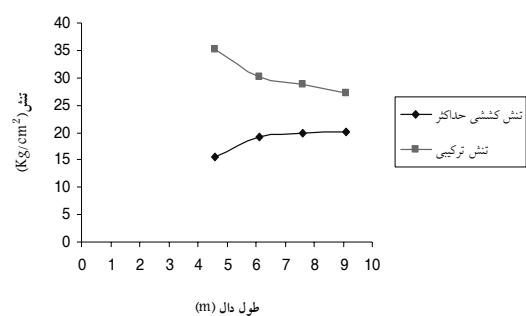
شکل ۱۶ تغییرات تنشهای کششی حداکثر ناشی از تابیدگی و تنشهای ترکیبی، به دلیل شیب حرارتی روزانه، با طول دال در روسازیهای بتنی مسلح [۶]

روسازیهای بتنی مسلح پیوسته برابر ۱۳، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتیمتر انتخاب شد.

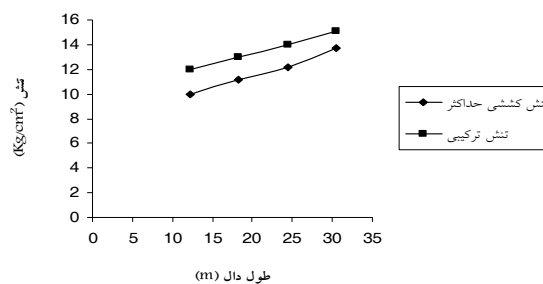
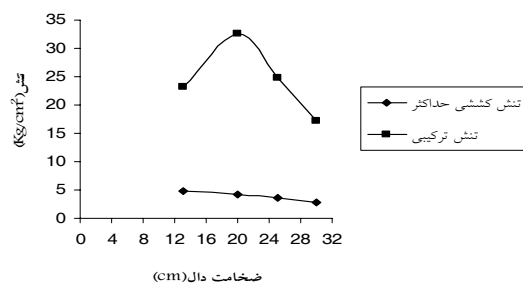
۱-۵- تحلیل نتایج

۱- در روسازیهای بتنی غیرمسلح، تنشهای تابیدگی ناشی از شیب حرارتی روزانه و شبانه ابتدا با طول دال افزایش یافته و سپس به تدریج از این افزایش کاسته می شود و به تدریج به سمت مقدار ثابتی همگرا می شود. به طور کلی می توان گفت که تنشهای تابیدگی، به تنهایی باعث ایجاد ترک خوردگی در دال بتنی نمی شوند، زیرا مقدار آنها کمتر از مقاومت کششی بتن است [۶] (شکل‌های ۱۴ و ۱۵).

۲- در روسازیهای بتنی غیرمسلح تنشهای ترکیبی ناشی از شیب حرارتی روزانه و بار ترافیک، با طول دال رابطه معکوس داشته و هر چه طول دال افزایش یابد از مقدار آنها کاسته می شود. اما تنشهای ترکیبی ناشی از شیب حرارتی شبانه و بار ترافیک با طول دال رابطه مستقیم داشته و هر چه طول دال افزایش یابد، مقدار آن نیز افزایش می یابد. لازم است توضیح دهیم که در شکل ۱۵، تنش ترکیبی ابتدا روند افزایشی داشته و سپس با ازدیاد طول دال از ۶ متر، به دلیل ترک خوردگی دال بر اثر تنش ترکیبی، از مقدار تنش کاسته می شود [۶].



شکل ۱۴ تغییرات تنشهای کششی حداکثر ناشی از تابیدگی و تنشهای ترکیبی، به دلیل شیب حرارتی روزانه، با طول دال در روسازیهای بتنی غیرمسلح [۶]

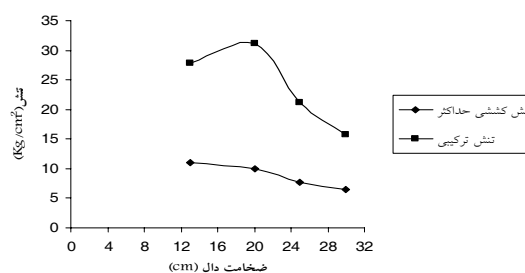
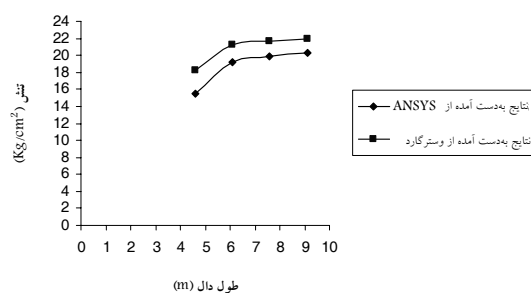


شکل ۱۹ تغییرات تنشهای کششی حداکثر ناشی از تابیدگی و تنشهای ترکیبی، به دلیل شیب حرارتی شبانه، با ضخامت دال در روسازیهای بتنی مسلح پیوسته [۶]

شکل ۱۷ تغییرات تنشهای کششی حداکثر ناشی از تابیدگی و تنشهای ترکیبی، به دلیل شیب حرارتی شبانه، با طول دال در روسازیهای بتنی مسلح [۶]

۵- در مدلسازی این تحقیق، برای تنشهای تابیدگی ناشی از شیب حرارتی روزانه با نتایج به دست آمده از روابط وسترگارد، حداکثر ۱۷ درصد و برای تنشهای تابیدگی ناشی از شیب حرارتی شبانه، حداکثر ۳۰ درصد اختلاف به دست آمد. دلیل این مسأله مدلسازی میله‌های دوخت در این تحقیق است، زیرا روابط وسترگارد میله‌های دوخت را در نظر نمی‌گیرند [۶] (شکل‌های ۲۰ و ۲۱).

۴- در روسازیهای بتنی مسلح پیوسته، تنشهای تابیدگی و تنشهای ترکیبی ناشی از شیب حرارتی روزانه و شبانه و بار ترافیک با ضخامت دال رابطه معکوس داشته و هر چه به ضخامت دال افزوده شود، مقدار این تنشها کاهش می‌یابد. دلیل این مسأله وجود نسبت حجمی بالای آرماتور در این نوع روسازیه‌ها است. همچنین ضخامت‌های کم در این روسازیه‌ها برای مقابله با تنشهای ترکیبی کافی نبوده و باعث ترک‌خوردگی دال می‌شود. این مسأله در قسمت اول شکل‌های ۱۸ و ۱۹ که با افت تنش زیاد روبه‌رو هستیم، مشهود است. در این روسازیه‌ها تنشهای عرضی بحرانی‌تر از تنشهای طولی است [۶].

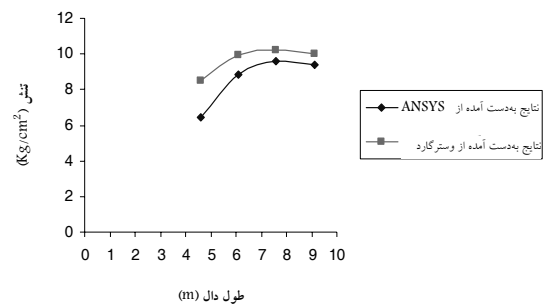


شکل ۲۰ مقایسه نتایج به دست آمده از نرم‌افزار انسیس با نتایج به دست آمده از روابط وسترگارد به منظور بررسی اعتبار مدلسازی (تنشهای تابیدگی ناشی از شیب حرارتی روزانه) [۶]

شکل ۱۸ تغییرات تنشهای کششی حداکثر ناشی از تابیدگی و تنشهای ترکیبی، به دلیل شیب حرارتی روزانه، با ضخامت دال در روسازیهای بتنی مسلح پیوسته [۶]

ترک خوردگی دالها، به خصوص در مناطقی که اختلاف درجه حرارت بین شب و روز زیاد است، از به کارگیری آنها پرهیز شود و از دالهای ضخیم تری استفاده شود [۶].

۴- با استفاده از نتایج به دست آمده از این تحقیق نسبت به بررسی فنی اقتصادی برای تعیین طول بهینه هر یک از انواع روسازیهای بتنی غیر مسلح و مسلح اقدام شود و با توجه به شرایط آب و هوایی هر منطقه و در نظر گرفتن شرایط اقتصادی طول و نوع روسازی مورد استفاده تعیین شود [۶].



شکل ۲۱ مقایسه نتایج به دست آمده از نرم افزار انسیس با نتایج به دست آمده از روابط وسترگارد به منظور بررسی اعتبار مدلسازی (تنشهای تابیدگی ناشی از شیب حرارتی شبانه) [۶]

۷- منابع

- [1] Yang H. Huang. "Pavement Analysis and Design". Prentice – Hall, The University of Kentucky, 1993.
- [2] Yoder, E. J., and Witzczak, M. W. (1975). Principles of Pavement Design 2nd Ed. Wiley, New York.
- [3] David Croney and Paul Croney. "The Design and Performance of Road Pavements". Second Edition, McGraw-Hill, 1991.
- [4] ANSYS Release 8.0 Documentation, ANSYS, Inc., USA.
- [5] Wesevich, J. W., McCullough, F. and Burns. N. H. (1987). "Stabilized subbase friction study for concrete pavements." Res. Rep. 495-1. Ctr.for Transp. Res., University of Texas at Austin, Austin. Tex.

[۶] جالینوس رضا، «ارائه مدلی تحلیلی - عددی برای تعیین تنشها و کرنشهای حرارتی در روسازیهای بتنی». پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، زمستان ۱۳۸۳.

۶- نتیجه گیری و پیشنهادها

۱- در روسازیهای بتنی غیر مسلح توصیه می شود که تا حد ممکن از دالهایی با طول بیشتر استفاده شود، در عوض برای مقابله با تنشهای ترکیبی ناشی از بار ترافیک و شیب حرارتی شبانه، از میله های داول استفاده شود. در صورت استفاده نشدن از میله های داول بهتر است طول دالها را در روسازیهای بتنی غیر مسلح ۶ متر در نظر بگیریم که حد وسط دو مقدار تنشهای ترکیبی روزانه و شبانه است [۶].

۲- در روسازیهای بتنی مسلح به دلیل وجود میله های داول، تنشهای ترکیبی ناشی از شیب حرارتی شبانه و بار ترافیک حائز اهمیت نیست اما از نظر تنشهای ترکیبی ناشی از شیب حرارتی روزانه و بار ترافیک بهتر است از دالهایی با طول بلندتر (حداقل ۱۸ متر) استفاده شود تا تنشهای ترکیبی روزانه کمتر شده و از مقاومت کششی بتن فاصله بگیرد [۶].

۳- به طور کلی می توان گفت که دالهای با ضخامت کم، استقامت چندانی در برابر تنشهای ترکیبی ناشی از شیب حرارتی شبانه و بار ترافیک در هیچ نوع از انواع روسازیهای بتنی نداشته و از آنجاکه به دلیل مقررات راهنمایی و رانندگی، بیشتر کامیونها در شب از جاده ها عبور می کنند، حداقل امکان باید به منظور جلوگیری از

