مجلهٔ تحقیقات بتن
تابستان۸۹ ،سال سوم، شمارهٔ۱
ص۸۷-۷۳
تاریخ دریافت: ۸۹/۲/۲
تاریخ پذیرش: ۸۹/۶/۲۱

تحلیل فنّی روش‌های نرم‌افزاری در طرّاحی روسازی بتنی غیرمسلّح درزدار

ابوالفضل حسنی
دانشیار گروه راه و ترابری، دانشکده فنی، دانشگاه تربیت مدرس
hassani@modares.ac.ir
منصور فخری
استادیار گروه راه وترابری، دانشکده فنی، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی
ابوالفضل گل‌محمدی
دانشجوی کارشناسی‌ارشد راه و ترابری، دانشکدهٔ فنی، دانشگاه تربیت مدرس

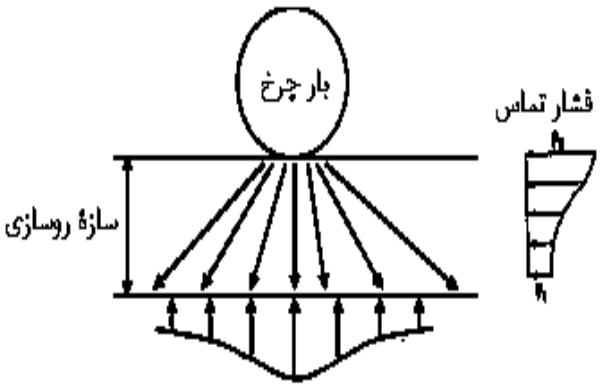
چکیده:
با توجه به پیچیدگی رفتار بستر و دال روسازی و گوناگونی بار وارده به روسازی، تحلیل آن برای محاسبهٔ تنش‌ها و تغییرمکان‌ها با دست یک کار بسیار دشوار بوده و استفاده از نرم‌افزارهای کاربردی روز برای طرّاحی روسازی بتنی اجتناب‌ناپذیر است. در این تحقیق دو نرم‌افزار KENSLABS و EverFE که از نرم‌افزارهای تحلیل روسازی بتنی غیرمسلّح درزدار می‌باشند، مورد بررسی قرارگرفته و نتایج تحلیل یک دال نمونه با استفاده از این نرم‌افزارها با روش تحلیلی وسترگارد مورد مقایسه قرارگرفته‌اند. مدل بستر مورد استفاده در نرم‌افزارها و در روش وسترگارد، مدل وینکلر بوده لذا مقایسهٔ نتایج امکان‌پذیر می‌باشد. یکی از مدل‌های سازه‌ای که برای تحلیل دال به‌کار می‌رود، روش المان محدود است، که روش تحلیلی وسترگارد و نرم‌افزارهای مذکور همگی از این روش در تحلیل دال استفاده می‌کنند. برای مقایسهٔ نتایج تحلیل در این سه روش، دالی به طول ٤/٥٧ و عرض ٣/٦٥ با ضخامت‌های مختلف و بار ٨٠ کیلونیوتن مورد تحلیل قرارگرفته است. این دال در سه حالت بار در گوشه، بار در لبه و بار در داخل دال مورد ارزیابی قرارگرفته و جداول و نمودارهایی برای بررسی نتایج هر روش به تفکیک ارائه شده است. در مقایسهٔ نتایج بین سه حالت بارگذاری، مشخص گردید در حالت بار در گوشه برای دال با بستر مایع بیش‌ترین تنش‌ها وجود داشته و با افزایش ضخامت دال اختلاف بین تنش‌ها در سه حالت بار انتخاب شده کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده گردید که نرم‌افزار EverFE به دلیل انجام المان‌بندی در راستای ضخامت دال، نتایج دقیق‌تری را نسبت به دو روش دیگر ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: روسازی بتنی، نرم‌افزار تحلیل روسازی، EverFE، KENPAVE، KENSLABS

۱- مقدمه

هدف از اجرای روسازی ایجاد یک سطح صاف و هموار با ایمنی کافی برای رفت و آمد وسایل نقلیهٔ عبوری می‌باشد. این روسازی باید دارای خصوصیاتی باشد تا بتواند علاوه بر تحمل وزن وسایل نقلیه، در کلیهٔ شرایط جوی در برابر عوامل فیزیکی و جوی نیز مقاوم باشد.

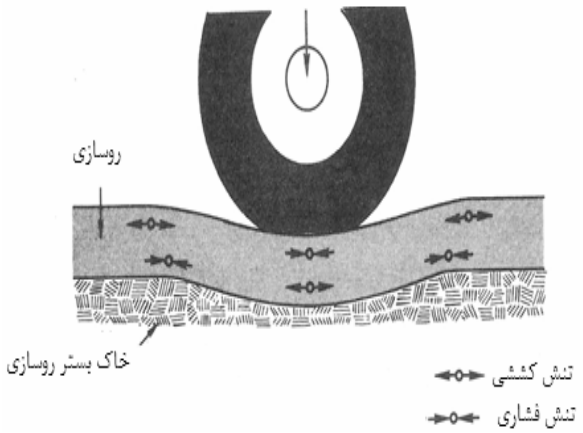
برای استفاده از زمین طبیعی برای تحمل بارهای سنگین می‌بایست شدت تنش‌های وارده را تا حد مقاومت بستر کاهش داد. لذا با استقرار لایه‌های مقاوم بر روی این بستر که به روسازی موسوم است به این خواسته دست می‌یابیم. مطابق شکل۱، ملاحظه می‌شود که با افزایش ضخامت روسازی تنش‌های فشاری قائم حاصل از بارگذاری بر روی بستر کاهش می‌یابد و شدت این تنش‌ها در زیر بار حداکثر می‌باشد.



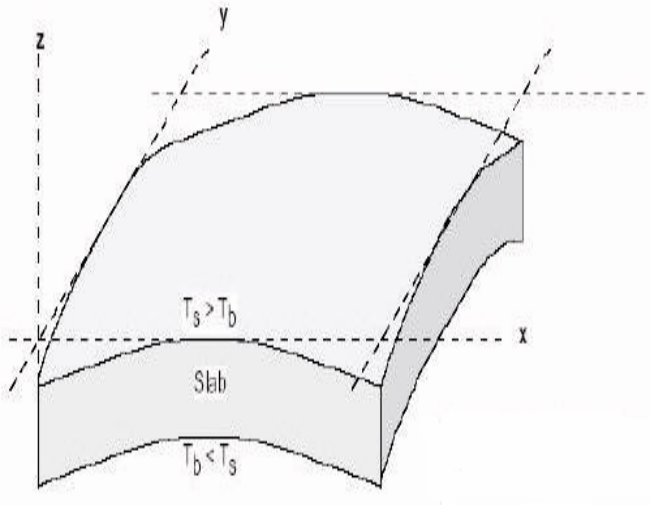
شکل۱- توزیع تنش فشاری قائم در روسازی

روسازی‌ها تحت اثر ترافیک عبوری باید از مقاومت بالایی برخوردار باشند، لذا در ساخت و اجرای آنها معمولاً از مصالحی همچون قیر و سیمان استفاده می‌شود. این روسازی در اثر بارگذاری دچار تغییر شکل شده و در نتیجه در آن تنش‌های کششی و فشاری به‌وجود می‌آید. شکل۲ حالت و محل این تغییرشکل‌ها را در روسازی نشان می‌دهد.

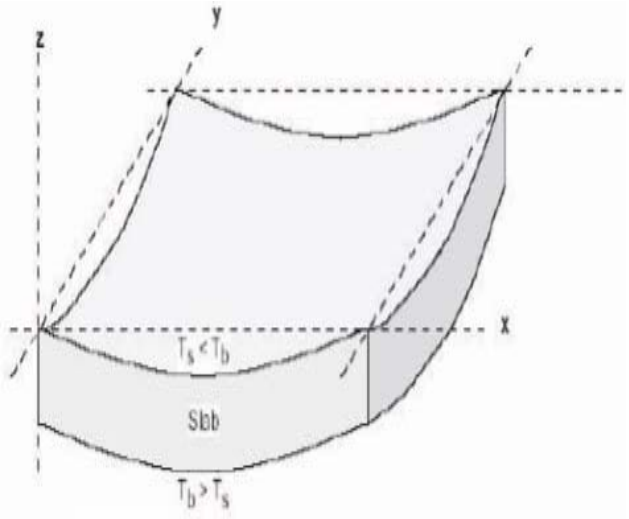
در صورتی‌که شدت تنش‌های کششی حاصل در هر یک از لایه‌های روسازی از میزان مقاومت کششی مصالح آن لایه بیش‌تر گردد، موجبات شکست و ترک‌خوردگی در آن را فراهم خواهدآورد.



شکل ۲- تنش‌های کششی و فشاری ناشی از بارگذاری



شکل۳- تنش دال در روز که دمای سطح دال(T_s)بیش‌تر از دمای زیر دال(T_b) است



شکل۴- تنش دال در شب که دمای سطح دال(T_s)کم‌تر از دمای زیر دال(T_b) است

از عوامل جوی مؤثر بر روسازی بتنی می‌توان به میزان رطوبت و تغییرات دمایی اشاره کرد. در صورتی‌که روسازی در مقابل آب نفوذپذیر باشد، نفوذ آب باعث کاهش مقاومت رویه و بستر شده و با متورم شدن خاک بستر معایبی در بستر به‌وجود می‌آید. همچنین در اثر تغییرات دمایی بالا و پایین دال، همانطور که در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است، دال دچار خمش شده و ترک‌هایی در دال ایجاد می‌گردد.

عوامل زیادی در طرّاحی روسازی وجود دارند و به این دلیل طرح آنها از پیچیدگی خاصی برخوردار است. علاوه بر این متغیّر بودن این عوامل نیز بر پیچیدگی آنالیز روسازی افزوده است. چرا که در طول هر مسیر امکان تفاوت میان شرایط جوی و خصوصیّات خاک بستر بسیار زیاد است. همچنین با توجه به حجم بسیار بالای مصالح مصرفی در هر مسیر و استفاده از مصالح در دسترس، بنا به صرفه‌های اقتصادی تغییراتی نیز در پارامترهای تعیین کننده توسط عوامل اجرایی انجام می‌شود.

به‌طور کلی عوامل مؤثر در طرح روسازی را می‌توان به‌صورت زیر عنوان کرد:

۱- خاک بستر روسازی (جنس- مقاومت- نفوذپذیری- تراکم‌پذیری و...)

۲- مصالح روسازی (جنس- نوع- مقاومت- ابعاد و ...)

۳- شرایط آب و هوایی (رطوبت – یخبندان- دما و ...)

۴- وسایل نقلیهٔ استفاده کننده از طرح(نوع- وزن- تعداد و ...)

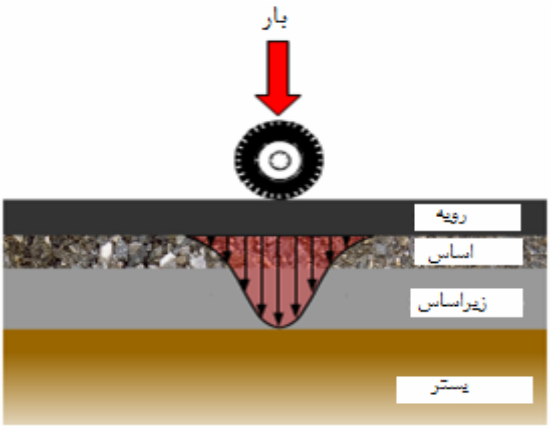
۵- سیستم مورد نظر(راه - فرودگاه)

۶- هزینه‌ها(مصالح- ماشین‌آلات- نیروی انسانی- تعمیر و نگهداری و ...)

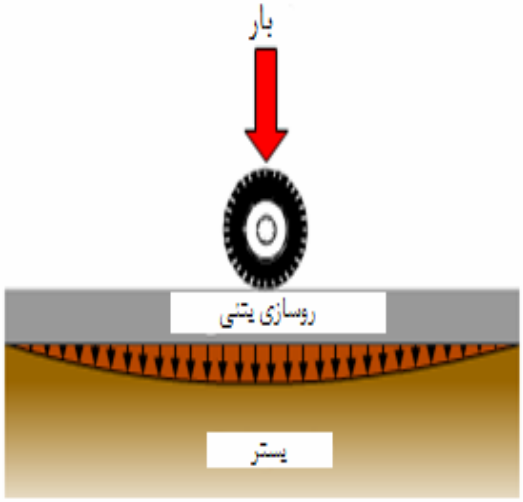
روسازی‌ها عمدتاً به دو نوع انعطاف‌پذیر و صلب تقسیم می‌شوند. روسازی انعطاف‌پذیر شامل روسازی‌های آسفالتی و شنی بوده که رویهٔ آنها دارای سختی خمشی کم‌تری می‌باشند. این نوع روسازی، بارهای خارجی را بدون پخش بار در سطح وسیع، آن را در سطح نسبتاً کوچکی به خاک بستر منتقل می‌کنند. لذا در این نوع روسازی خاک بستر نقش بسیار مؤثر و تعیین کننده‌ای در طرّاحی دارد. نحوهٔ پخش بار در لایهٔ رویهٔ روسازی انعطاف‌پذیر در شکل ۵ آمده‌است.

روسازی‌های صلب یا به عبارت دیگر روسازی‌های بتنی، دارای سختی خمشی بالایی بوده و بارهای خارجی را با حداقل تغییر شکل در سطوح نسبتاً وسیعی به خاک بستر منتقل می‌کنند. این موضوع در شکل۶ نشان داده شده‌است.

انتخاب نوع روسازی یکی از مهمترین مسائلی است که امروزه به‌دلیل تحوّلات شدید در مصرف محصولات نفتی و گرانی و اهمیّت آن، می‌بایست مورد نظر باشد. در کشور ما به‌دلیل فراوانی قیر و کمبود سیمان در سال‌های گذشته بیش‌تر به روسازی آسفالتی توجّه شده و هیچ نگاهی به استفاده از روسازی بتنی صورت نگرفته است. ولی اکنون که قیمت قیر بالا رفته و تولید سیمان درکشور نیز تقریباً رو به افزایش است، می‌توان به عنوان یک گزینهٔ مطرح، روسازی بتنی را نیز مورد توجه قرار داد. بیش‌تر در بزرگراه‌ها که ترافیک بالایی دارند و همچنین روسازی فرودگاه‌ها به دلیل سنگینی بارهای وارده، می‌توان از این روسازی استفاده کرد. لذا ضرورت معرفی یک نرم‌افزار برای تحلیل این نوع روسازی قابل درک خواهد بود.



شکل۵- توزیع بار رویه در روسازی انعطاف‌پذیر



شکل۶- توزیع بار دال در روسازی صلب

۲- مراحل انجام تحقیق

در این تحقیق ابتدا روش‌های موجود جهت تحلیل و طرّاحی روسازی بتنی معرّفی گردیده‌اند. این روش‌ها عبارت‌اند از: روش مکانیستیک، روش تجربی و روش مکانیستیک-تجربی. برای این که بتوان نرم‌افزارهای طرّاحی روسازی بتنی را مورد ارزیابی قرار داد بهتر است از روش مکانیستیک استفاده نمود. رفتار بستر و مدل‌های موجود در این خصوص نیز از عوامل مهم در تحلیل و طرّاحی یک روسازی می‌باشند که در این تحقیق مورد توجه قرار گرفته‌اند. آشنایی با نرم‌افزارهای روسازی بتنی در کشورهایی که بیش‌تر از این نوع روسازی استفاده می‌کنند مانند ایالات متحدهٔ آمریکا، آلمان، فرانسه و غیره گام دیگر این تحقیق خواهد بود. در امریکا هر ایالت یک نرم‌افزار مختص به خود را طرّاحی و مورد استفاده قرار می‌دهند که بیش‌تر به این نرم‌افزارها اشاره شده است. بعضی از این نرم‌افزارها عبارتند از: JSLAB2004، ISLAB2000، EverFE2.24، KENSLABS و غیره، که دو نرم‌افزار EverFE2.24 و KENSLABS به دلیل سهولت دسترسی برای بررسی انتخاب شده‌اند. در ادامهٔ تحقیق یک نمونه دال به ابعاد ۴/۵۷ ×۳/۶۵ انتخاب شده و برای یک بار ۸۰ کیلونیوتن در سه حالت بارگذاری در لبه، داخل و گوشهٔ دال تحلیل صورت گرفت. نتایج این آنالیز با روش دستی وسترگارد که معادلات آن به‌صورت جداولی در Excel ایجاد شده‌است، مورد مقایسه قرار گرفت. نمودارهای ایجاد شده در این خصوص نشان‌دهندهٔ دقت و صحت نتایج نرم‌افزارهای معرفی شده می‌باشد.

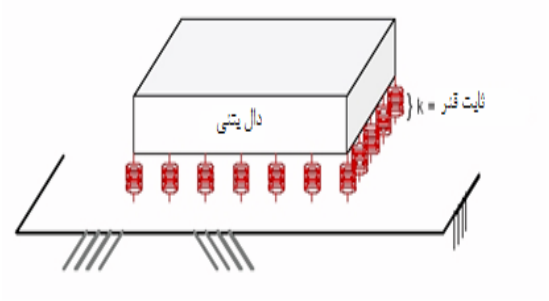
۳- انواع مدل بستر روسازی بتنی

لایهٔ زیر دال بتنی در روسازی صلب معمولاً از جنس خاک است. با توجه به شرایط فیزیکی خاک می‌بایست نوع عملکرد خاک هنگامی که بار روی آن واقع می‌شود مشخص شده تا بتوان تغییرشکل یا نشست خاک را محاسبه و در نتیجه عملکرد لایهٔ بتنی روی آن را بررسی نمود. به دلیل پیچیدگی رفتار خاک، مدل‌های مختلفی توسط محقّقین ارائه شده‌است که در زیر به چند مورد کاربردی آن اشاره می‌شود.

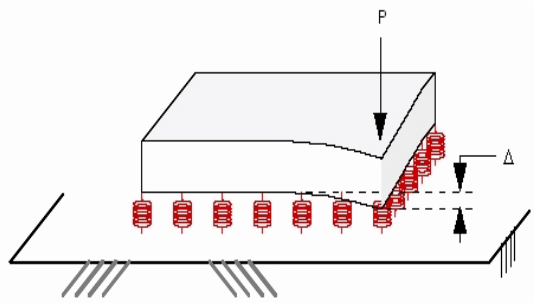
همانند دیگر کاربردهای مهندسی، پاسخ خاک تکیه‌گاه روسازی از اهمیت بالایی برخوردار است. برای ارزیابی دقیق این پاسخ باید مشخصات تنش-کرنش بستر را به‌طور کامل بدانیم. شرح دقیق مشخصات تنش-کرنش هر یک از بسترها به‌دلیل شرایط پیچیدهٔ خاک غیرممکن است، که به‌طور برجسته غیرخطی بودن، برگشت‌ناپذیر و وابستگی آن به زمان می‌باشد. بنابراین، این خاک‌ها معمولاً ناهمسان و ناهمگن هستند. مدل‌های ساختگی برای شبیه‌سازی پاسخ خاک تحت بار از پیش تعریف‌شده و شرایط مرزی ایجاد شده‌است. فرضیات اساسی در مورد نوع خاک برای این مدل‌ها به‌کار رفته‌اند. این فرضیّات ضمن کاهش دقّت آنالیز، برای یک مسئله دارای شرایط مرزی مورد نیاز هستند. دو تا از رایج‌ترین فرضیّات به‌کار رفته در این خصوص، الاستیک خطی و همگن بودن خاک می‌باشد [۳].

۳-۱- مدل بستر با چگالی مایع

در مدل بستر با چگالی مایع (که به‌عنوان بستر وینکلر شناخته می‌شود)، بستر به‌عنوان یک صفحهٔ هموار فاصله‌دار، مستقل و با فنرهای خطی در نظر گرفته می‌شود. مدل فرض می‌کند که هر فنر در پاسخ به تنش‌های قائم که مستقیماً روی فنر وارد می‌شود، تغییر شکل داده و هیچ تنش برشی را به فنرهای مجاور وارد نمی‌کند. این مدل در اشکال ۷ و ۸ نشان داده شده‌است.



شکل ۷- ضریب عکس‌العمل بستر [۴]



شکل ۸- ارتباط بار و تغییرشکل با ضریب عکس‌العمل بستر [۴]

نسبت بین بار خارجی p در هرنقطه توسط معادلهٔ ۱ محاسبه می‌شود.

$$p = k\,\Delta \qquad (۱)$$

که در اینجا k ضریب عکس‌العمل بستر و Δ تغییر مکان بستر می‌باشد. بدون انتقال نیروی برشی یعنی این که هیچ تغییرمکانی در لبه‌های صفحه یا دال وجود ندارد. تصور مایع بودن این نوع پی به‌دلیل شبیه بودن رفتار آن با قانون ارشمیدس در مایع می‌باشد. این قانون برای آنالیز سیستم‌های تکیه‌گاه روسازی در مطالعات وسترگارد به‌کار رفته است [Kumara, 2005].

۳-۲- بستر الاستیک جامد

در مدل بستر الاستیک جامد(که در بعضی موارد به‌عنوان بستر بوسینیسک نامیده می‌شود) خاک به‌عنوان یک مصالح الاستیک خطی، ایزوتروپ و یکنواخت رفتار می‌کند. این مدل، یک روش واقع‌گرایانه‌تر از رفتار بستر را نسبت به مدل بستر مایع در نظر می‌گیرد، زیرا تأثیر انتقال برش ناشی از تنش‌های المانهای مجاور را به حساب می‌آورد. در نتیجه، توزیع تغییر مکان‌ها پیوسته است، به این دلیل تغییر شکل در یک نقطه در بستر ناشی از تنش‌های فعّال در آن نقطهٔ خاص است و بر کاهش تنش در نقاط کمی دورتر نیز تأثیر دارد.

تحلیل بارگذاری تکیه‌گاه دال روی یک بستر با قوانین ریاضی کار سختی است. راه‌حل‌های مختلفی در این مورد وجود دارد، از قبیل راه حل بوسینیسک که در رابطهٔ ۲ ارائه شده است[Kumara, 2005].

$$\frac{2(1-\mu_s{}^2)\,pr_o}{E_s} = W \qquad (۲)$$

در این رابطه W تغییرمکان سطح بستر در مرکز سطح بار، p فشار تماس، r_0 شعاع سطح بار، μ_s ضریب پواسون بستر، E_s ضریب الاستیک بستر می‌باشند.

به‌دلیل پیچیدگی محاسبات ریاضی برای مدل بستر جامد، این مدل به نسبت مدل بستر مایع کم‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. برخلاف، مدل بستر با چگالی مایع که دارای معادلات کنترلی دیفرانسیلی می‌باشد، مدل بستر الاستیک به حل یک انتگرال یا حل معادلات دیفرانسیل نیاز دارد.

روابط وسترگارد براساس فرضیهٔ مدل بستر با چگالی مایع می‌باشد، همچنین نرم‌افزار EverFE2.24 نیز از این مدل استفاده می‌کند. البته در نرم‌افزارKENSLABS امکان انتخاب هر دو مدل بستر مایع و الاستیک جامد امکان‌پذیر است. لذا در این تحقیق برای سهولت مقایسهٔ نتایج، در تحلیل دال نمونه از مدل بستر مایع استفاده شده است.

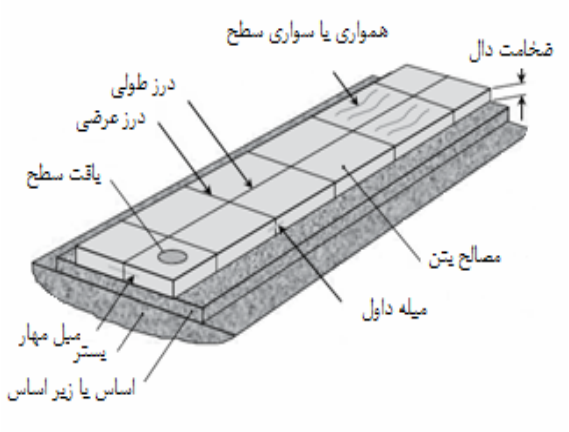
٤- انواع روسازی بتنی

روسازی بتنی در انواع مختلف ساخته می‌شوند، ولی بیش‌تر آنها دارای دو خصوصیت رایج هستند. در نوع اوّل مقاومت در برابر بار ترافیکی از طریق بافت بتن صورت می‌گیرد، و اگر میلگردی در آن استفاده شود، فقط برای کنترل ترک بوده و در حمل بار هیچ نقشی ندارد.

در نوع دوم، انقباض روسازی بتنی بر اثر انقباض بتن و انبساط و انقباض ناشی از اثرات گرمایی می‌باشد، که این حرکات باید بررسی شوند. لذا انواع رایج روسازی بتنی عبارت‌اند از:

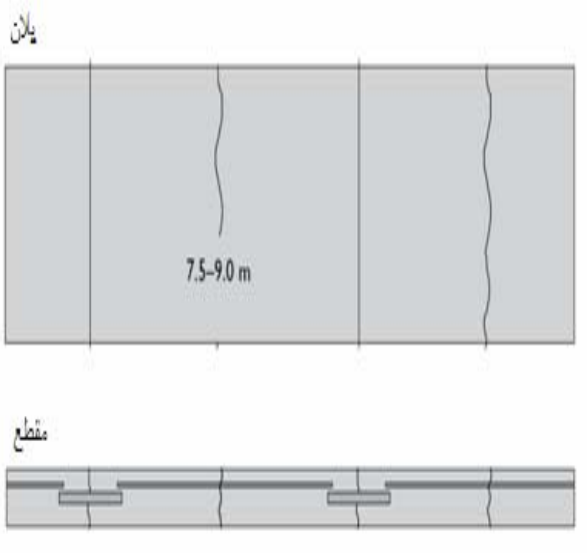
٤-١- روسازی بتنی ساده درزدار[1] (JPCP)

این روسازی بتنی شامل دال‌های بتنی بدون میلگرد به طول ۳/۶ تا ۶/۰ متر با درزهای اجرایی عرضی بین دال‌ها می‌باشند. فاصلهٔ درزها بدقت کافی باید تعیین شود تا در طول عمر روسازی ترکی در دال ایجاد نگردد. بنابراین برای این روسازی انبساط و انقباض در محل درزها انجام می‌شود. این روسازی در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل۹- روسازی بتنی غیرمسلح درزدار

[۴]



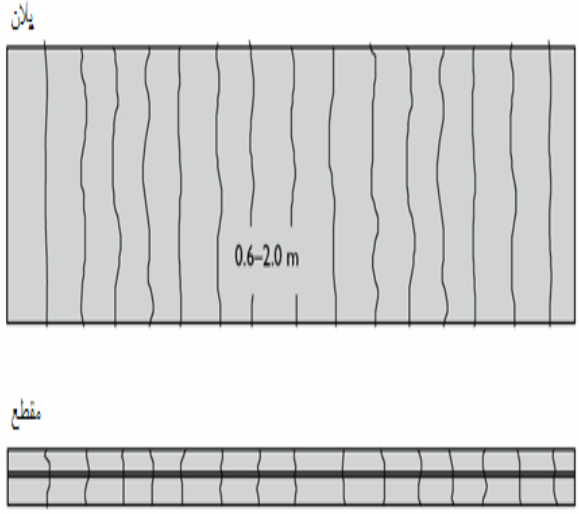
شکل ۱۰- روسازی بتنی مسلح درزدار JRCP
[۴]

٤-۲- روسازی بتن مسلّح درزدار [۲] (JRCP)

روسازی بتن مسلّح درزدار، یا JRCP با دال‌های بلندتر و کارگذاشتن فولاد در دال از JPCP متمایز می‌باشند. این فولادهای کم، اغلب به عنوان فولاد حرارتی استفاده می‌شوند. طول دال در JRCP معمولاً ۷/۵متر تا ۹ متر می‌باشند، هر چند طول دال بیش از ۳۰ متر هم قابل استفاده است. فولاد مصرفی دال در جهت طولی معمولاً بین ۱/. تا ۰/۲۵ درصد سطح مقطع دال می‌باشد و در جهت عرضی حداقل فولاد مصرفی به‌کار می‌رود. به دلیل جاگذاری فولاد در محور خنثی یا وسط دال، این میلگردها هیچ اثری در کارایی خمشی دال ندارند و فقط برای مراقبت از ترک‌خوردگی بتن استفاده می‌شوند. JRCP در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

٤-۳- روسازی بتنی مسلّح پیوسته [۳] (CRCP)

روسازی بتن مسلّح پیوسته، CRCP، یک روسازی با میلگردهای فولادی زیاد و بدون درز تعریف می‌شود. فولاد مصرفی در CRCP نسبت به JRCP خیلی بیش‌تر است و معمولاً به ۰/۴ تا ۰/۸ درصد سطح مقطع دال در جهت طولی می‌رسد. فولاد مصرفی در جهت عرضی نیز حداقل درصد فولاد می‌باشد، که همان فولاد حرارتی است. ترک‌ها در CRCP تقریباً در فاصله ۰/۶ تا ۲ متر تشکیل می‌شوند. این روسازی در شکل ۱۱ نشان داده



شکل ۱۱- روسازی بتنی مسلح پیوسته CRCP
[۴]

قابل ذکر است که در این تحقیق برای بررسی نرم‌افزارها از روسازی بتنی غیرمسلح درزدار استفاده شده است.

۵- انواع درز مرسوم در روسازی بتنی

کارایی یک روسازی بتن بستگی زیادی به کارایی مناسب درزها دارد. بیش‌تر خرابی‌های روسازی بتنی درزدار می‌تواند به شکست در محل درز در مقابل ظرفیت ناکافی سازه‌ای نسبت داده شود. خرابی‌هایی که ممکن است از شکست درز ناشی شود عبارت‌اند از: شکست، فرسایش، قطعه قطعه شدن، شکست گوشه‌ای بتن، نشست یا افتادگی و ترک‌های عمقی دال. علیرغم استفاده از مصالح درزگیر، آب‌بندی مجدد و دوره‌ای برای اطمینان از کارایی مناسب درز در طول عمر روسازی مورد نیاز است.

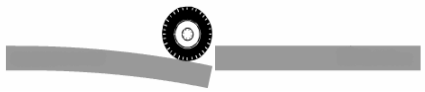
کارایی مناسب درز همچنین به استانداردهای طرّاحی مناسب روسازی، کیفیت مصالح کاربردی در زمان اجرا و روش‌های نگهداری بهتر روسازی نیازمند است.

دو روش برای فراهم کردن انتقال بار در محل درز در JPCP به کار می‌رود:

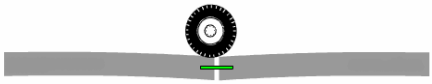
۱- استفاده از قفل‌وبست مصالح در محل درز

۲- استفاده از داول‌ها

وقتی روسازی، ترافیک وسایل نقلیه سنگین را عبور می‌دهد، به خصوص در سرعت‌های بالا، نمی‌توان از خرد شدن مصالح فشرده در طول عمر روسازی در محل درز جلوگیری کرد، در این موارد، بهتر است از داول‌ها برای انتقال بار استفاده شود. داول‌ها، میله‌های صافی هستند، که با اپوکسی پوشیده می‌شوند یا اطراف آنها گریس‌کاری یا روغن‌کاری می‌شوند تا به درز اجازهٔ باز و بسته شدن بدون مقاومت داده شود. اشکال ۱۲و ۱۳ تأثیر استفاده از داول را در هنگام عبور بار نشان می‌دهد.



شکل۱۲- اثر عبور چرخ از محل درز بدون داول [۴]



شکل۱۳- اثر عبور چرخ از درز دارای داول [۴]

انواع درز مرسوم در روسازی بتنی عبارتند از:

۵-۱- درزهای انقباضی عرضی

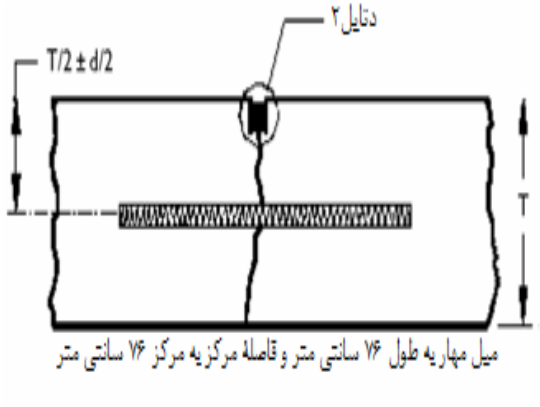
یک درز اجرایی عرضی به عنوان یک شیار بریده‌شده، شکل داده شده یا ابزار زده شده در یک دال بتنی تعریف می‌شود که یک نقطهٔ ضعیف در جهت عمودی پلان ایجاد می‌کند. این محل ترک، تغییراتی را که در ابعاد دال ایجاد می‌شود تنظیم می‌کند و رایج‌ترین نوع درز در روسازی‌های بتنی می‌باشد. روسازی درزدار با بار ترافیکی سبک ممکن است فقط به مصالح فشرده میان درز تکیه کند. روسازی‌ها با بارگذاری سنگین، اغلب از داول‌ها برای انتقال بار در درز استفاده می‌کنند. داول‌ها از حرکت عمودی یا شکست بین دال‌ها جلوگیری می‌کنند، امّا به درز اجازه باز و بسته شدن می‌دهند، تا تنش‌های بحرانی ناشی از تغییرات رطوبت و دما در روسازی بتنی را کاهش دهند.

۵-۲- درزهای طولی

یک درز طولی به عنوان یک درز بین دو دال تعریف می‌شود که اجازه پیچش دال بدون انفصال زیاد و ایجاد ترک در آن را می‌دهد. درزهای طولی برای کم کردن تنش‌های پیچشی به‌کار می‌روند و معمولاً برای زمانی که عرض دال بیش از ۴/۶ متر (۱۶ فوت) است، استفاده می‌شوند. دال به عرض‌های ۴/۶ متر و کم‌تر بدون درز طولی به طور قابل قبول اجرا می‌شوند، ولی ممکن است در بعضی موارد ترک‌های طولی در آنها مشاهده شود.

درز طولی باید حتی المقدور با خط‌های ترافیکی منطبق باشد تا عملکرد ترافیکی را بهبود ببخشد. عرض هر خط برای خط‌کشی باید ۳/۷ متر باشد و خط‌کشی‌های صدادار برای این منظور پیشنهاد می‌شوند. انتقال بار در درز طولی از طریق مصالح فشرده انجام می‌شود. برای کمک به انتقال بار میلگردهای مهاری اغلب در سراسر درزهای طولی استفاده می‌شود. میلگردهای مهاری از داول‌ها نازک‌تر هستند و از میلگردهای آجدار استفاده می‌شود، در صورتی‌که میلگرد داول صاف هستند. میلگردهای مهاری نیز برای حفاظت در برابر زنگ‌زدگی اپوکسی می‌شوند.

شکل ۱۴ جزئیات اجرایی درز طولی دارای میل مهار را نشان می‌دهد.



شکل ۱۴- مقطع درز طولی [۴]

۵-۳- درزهای اجرایی

معمولاً بتن در زمان‌های مختلف اجرا می‌شود و نیاز به قطع بتن ضروری می‌باشد، لذا از درز اجرایی در این مواقع استفاده می‌شود. این نوع درز می‌تواند به جای درزهای طولی و عرضی اجرا گردد. یک تیر عمودی و گروه داول‌ها برای یک درز اجرایی عرضی در شکل ۱۵ نشان داده شده‌است.

بعد از اجرای روسازی تا بالای تیر عمودی، این تیر برداشته خواهد شد. بعد از روسازی در یک روز، متصل کردن بتن جدید به قدیم شروع می‌شود. درز اجرایی عرضی معمولاً در پلان با درز

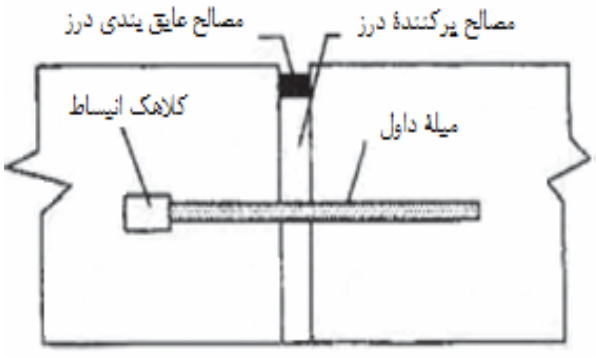
انقباضی منطبق می‌شود. ولی آنها نباید به صورت مورب باشند، چون کسب استحکام و کارایی کافی برای بتن مشکل خواهد بود

شکل ۱۵- داول در درز اجرایی [۴]

.

۵-٤- درزهای انبساط

درز انبساط یعنی درزی که در جای خاصّ قرار می‌گیرد تا بدون خسارت به سازه‌های مجاور و خود روسازی اجازه منبسط شدن به دال روسازی بدهد. این درز معمولاً در انتهای تکیه‌گاه پل‌ها و سازه‌های کاربردی جاسازی شده در خیابان‌ها مورد نیاز است. عرض درز انبساط معمولاً ۱۹میلی‌متر است. داول‌های صاف نیز در بیش‌تر موارد برای انتقال بار در محل درز انبساط به‌کار می‌روند. داول‌های درز انبساط به طور خاصّ ساخته می‌شوند با یک کلاهک مخصوص در یک انتهای آن، که یک فضای خالی را در داخل دال بوجود می‌آورد، تا وقتی که دال مجاور درز انبساط بسته می‌شود، داول در آن قرارگیرد. این جزئیات در شکل ۱۶ نشان داده شده‌است.



شکل ۱۶- جزئیات درز انبساط و داول مربوط به آن [۴]

٦- روش‌های طرّاحی روسازی بتنی

در طرّاحی روسازی بتنی اغلب تعیین ضخامت روسازی بتنی به نظر مهم می‌آید، ولی اجزای مهم دیگری نیز وجود دارند، شامل نوع و فاصله درزها (اگر باشد)، هم درزهای عرضی برای JPCP و هم درزهای طولی برای همه انواع روسازی. آنالیز تئوری یک روسازی بتنی به‌دلایل زیر مشکل است:

گوناگونی انواع درز و هندسهٔ دال، ضرایب مختلف انقباض مصالح، اثرات محیطی روی سازه، خواص و مقاومت‌های نامعلوم مصالح محلی، پاسخ مصالح غیرخطی مختلط، رفتار پیچیده فرسودگی، بارهای متحرّک و غیره.

در نتیجه طرّاحی روسازی به توسعه نسبی مدل‌های تحلیلی و مصالح آسان و یک راهنمای تجربی و آزمایشگاهی برای درزها و فواصل آن و غیره نیاز دارد، که بدون ایجاد زحمت نگهداری شوند.

تعیین ضخامت روسازی نیازمند حل یک مسئلهٔ پیچیدهٔ مهندسی است. روسازی‌ها تابع بارگذاری و شرایط محیطی گوناگون زیادی هستند. مراحل طرّاحی تعداد زیادی از عکس‌العمل‌های گوناگون را درگیر خود می‌کند، که تعیین آنها مشکل است. با این وجود توجّه محقّقان روی این موضوع رسیدن به یک حل مستقیم مکانیکی ممکن خواهد بود. در این راستا وسترگارد معادلاتی را برای تحلیل روسازی بتنی ارائه کرده است که این روابط در سال‌های بعد توسط محقّقان مانند هوانگ تکمیل گردیده است. برای سهولت تحلیل این نوع روسازی روش‌های نرم‌افزاری نیز در سال‌های اخیر در کشورهای مختلف توسعه یافته‌است. لذا ابتدا توضیحاتی در خصوص روش تحلیلی وسترگارد ارائه شده و سپس معرفی دو نرم‌افزار EverFE و KENSLABS انجام خواهد شد.

٦-١- روش وسترگارد

در روسازی‌های صلب، تنش‌ها، ناشی از اثرات محیطی و بارهای ترافیکی هستند.

٦-١-١- تنش‌های ناشی از پیچش و خمش

تنش‌های ناشی از پیچش و خمش به نسبت طول دال (L) و شعاع سختی نسبی(ℓ) وابسته است. شعاع سختی نسبی از معادلهٔ ۳-۱ به‌دست می‌آید:

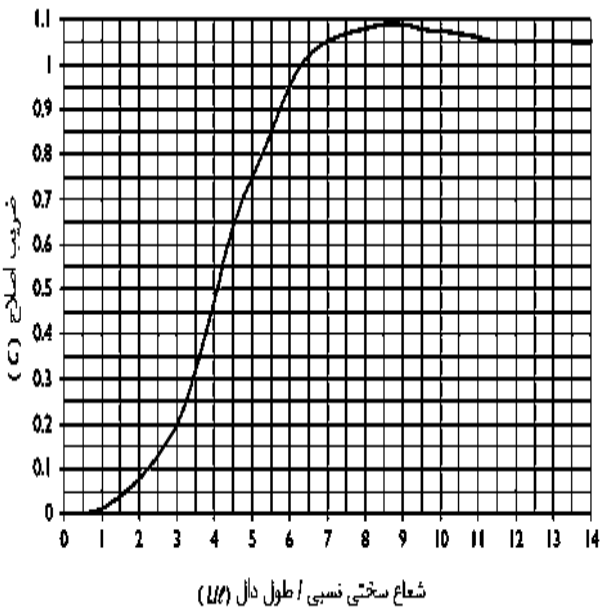
$$\ell = \sqrt[4]{\frac{ED^3}{12(1-\nu^2)k}} \qquad (۳)$$

که E مدول الاستیسیتهٔ بتن بوده وD ضخامت روسازی، κ ضریب عکس‌العمل بستر، وν ضریب پواسون بتن که معمولاً برابر ۰/۱۵می‌باشد.

چون ℓ واحد طول است، نسبتℓL/ بدون بعد است. تنش لبهٔ دال ناشی از پیچش حرارتی از رابطهٔ ۳ محاسبه می‌شود:

$$\sigma = \frac{CE\alpha_t\Delta t}{2(1-\nu^2)} \qquad (۴)$$

در این‌جا α_t ضریب انبساط حرارتی بتن، Δt اختلاف دما بین بالا و پایین دال. C یک ضریب تصحیح برای دال محدود است، که با توجه به نسبتℓL/ توسط نموداری که Bradbury در سال ۱۹۳۸ توسعه داد(شکل۱۷)، محاسبه می‌شود[Delatte, 2008].



شکل ۱۷- ضریب اصلاح تنش خمشی برای یک دال محدود [۲]

معادلات وسترگارد و هوانگ تنش‌های ناشی از بار ترافیک را در سه حالت بار در لبه، بار در گوشه و بار در داخل دال ارائه می‌دهد که عبارت‌اند از:

٦-١-٢- تنش‌های ناشی از بار گوشه

تنش‌های گوشه باعث شکست گوشهٔ دال می‌شوند، درحالی‌که تنش‌های لبه و داخل دال باعث ایجاد ترک عرضی در وسط دال می‌شوند. تنشها به عملکرد و شکل دال، ضخامت دال، ضریب عکس‌العمل بستر (k) و شعاع نسبی سختی (ℓ)، وابسته است.

تنش در گوشهٔ دال از معادلهٔ ۵ که در سال۱۹۲۶ توسط Westergaard و متعاقباً در سال ۱۹۸۵ توسط Ioannides به روز شده و در سال۲۰۰۴ توسط Huang به شکل زیر مطرح گردیده است، محاسبه می‌شود.

$$\sigma_c = \frac{3P}{D^2}\left[1-\left(\frac{c}{\ell}\right)^{0.72}\right] = \frac{3P}{D^2}\left[1-\left(\frac{1.772a}{\ell}\right)^{0.72}\right] \qquad (۵)$$

در این معادله c طول ضلع سطح تماس وa شعاع دایره‌ای برابر سطح تماس می‌باشد[Delatte, 2008].

$$\sqrt{\frac{P}{\pi p}} = a \qquad (۶)$$

٦-١-٣-تنش‌های ناشی از بارلبه

برای ترک‌های وسط دال، تنش‌های ناشی از بار لبه خیلی مهم است، چون از تنش‌های ناشی از بار در داخل دال بیش‌تر است. Westergaard چند معادلهٔ تنش در این خصوص ارائه کرد. آخرین معادله برای یک بارگذاری دایره‌ای توسط Ioannides در سال ۱۹۸۵ ارائه گردید و توسط Huang در سال ۲۰۰۴ بصورت رابطهٔ ۷ مطرح شد.

$$\sigma_e = \frac{0.803P}{D^2}\left[4\log\left(\frac{\ell}{b}\right) + 0.666\left(\frac{a}{\ell}\right) - 0.034\right] \qquad (۷)$$

طبق یک قاعدهٔ کلی تنش در حالت بار در لبه بزرگتر از تنش در حالت بار در گوشه است، بنابراین ترک‌های وسط بیش‌تر از شکست گوشه اتفاق می‌افتد مگر این‌که بارگذاری سنگین در گوشه باشد یا گوشه بدون تکیه‌گاه باشد. داول در نزدیکی گوشه به جلوگیری از شکست کمک می‌کند [Delatte, 2008].

٦-١-٤- تنش‌های ناشی از بار در داخل دال

معادلهٔ احتمالی تنش‌ها برای حالتی که بار در داخل دال قرار دارد توسط Westergaard به‌صورت زیر نوشته شده‌است.

$$\sigma_i = \frac{0.316P}{D^2}\left[4\log\left(\frac{\ell}{b}\right) + 1.069\right] \qquad (۸)$$

که اگر $a \geq 1.724D$ باشد در این‌صورت b=a

در غیر این‌صورت

$$b = -0.675D\sqrt{1.6a^2 + D^2} \qquad (۹)$$

این معادله در سال ۲۰۰۴ توسط Huang مطرح گردید [Delatte, 2008].

۶-۲- روش نرم‌افزار EverFE

نگارش کنونی EverFE یک ابزار آنالیز المان محدود برای شبیه‌سازی پاسخ‌های یک سیستم روسازی بتنی درزدار به بارهای محوری و تأثیرات محیطی می‌باشد. این نرم‌افزار یک نمایش گرافیکی از مدل ایجادشده و نتایج مدل به کاربر ارائه می‌کند.

بعضی از خصوصیات عمدهٔ EverFE شامل موارد زیر است:

۱- توانایی مدل‌کردن یک، دو یا سه دال با انواع شانه به‌طور طولی و یا عرضی (بیش از نه دال با انواع شانه در ابعاد ۳×۳). میلگردهای مهاری می‌توانند براحتی بین دال مجاور با شانه تعیین گردند.

۲- بیش از سه لایهٔ اساس الاستیک به‌طور چسبنده یا غیرچسبنده می‌تواند تعریف شود. انتقال برش اساس- دال می‌تواند از طریق توزیع افقی الاستوپلاستیک سختی بین دال و اساس انجام شود. یک بستر مایع متراکم بدون کشش یا فشار در زیر پایین‌ترین لایه مدل می‌شود.

۳- خطی یا غیرخطی بودن مصالح چسبنده می‌تواند در درزهای عرضی شبیه سازی شود.

۴- میلگردهای داول می‌توانند به‌طور دقیق در طول درزهای عرضی قرار گرفته و به‌صورت قابل حرکت مدل شوند. بجای مدل کردن آزادی داول، یک ضریب تکیه‌گاهی دال - داول می‌توان برای مدل کردن اندرکنش بین دال و داول تعیین کرد.

۵- داول غیر هم محور و نامیزان در این نرم‌افزار می‌تواند مدل شود.

۶- انواع مختلف اشکال محور می‌تواند با کم‌ترین مقدار ورودی تعریف شود.

۷- گرادیان دمایی خطی، درجهٔ دو و درجهٔ سه در طول ضخامت دال می‌تواند مدل شود.

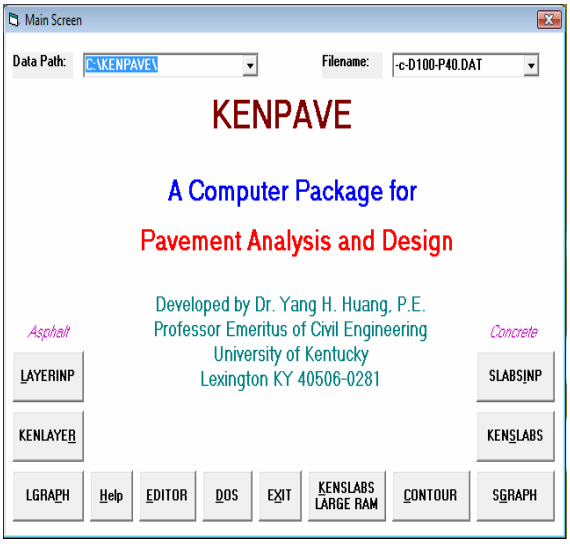
۸- امکانات پس‌پردازش گستردهٔ نرم‌افزار، نمایش تنش، تغییرمکان، نیروها و لنگرهای داخلی داول را اجازه می‌دهد.

مقادیر پاسخ بحرانی در هر نقطه در مدل به آسانی قابل بازبینی است.

۶-۳- روش نرم‌افزار KENSLABS

این نرم‌افزار قادر به آنالیز روسازی صلب و انعطاف‌پذیر به روش المان‌محدود می‌باشد، بخش روسازی صلب آن KENSLABS و بخش انعطاف‌پذیر KENLAYER نامگذاری شده است. شکل ۱۸ پنجرهٔ اصلی این نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

بعضی از خصوصیات عمدهٔ این نرم‌افزار عبارت‌اند از :



شکل۱۸- پنجرهٔ اصلی نرم‌افزار KENPAVE [۱]

۱- برنامه قادر به تحلیل حداکثر ۹ دال با برش و ممان انتقالی بین درزها می‌باشد که این برش و ممان انتقالی به‌صورت یک فنر با سختی معادل k مشخص در برنامه عمل می‌کند.

۲- هر دال می‌تواند ضخـامت و ابعاد خاص خود را داشته باشد و در هر دال ضخامت قابل تغییر خواهد بود. لازم است به ذکر است که دو دال مجاور بایستی دارای عرض‌های یکسان باشند.

۳- دالها می‌توانند به‌صورت دو لایهٔ صلب باشند که هر لایه اعم از چسبنده یا غیرچسبنده برای خود یک مدول الاستیسیته و یک ضریب پواسون داشته باشد. همچنین ماتریس سختی دال برابر با مجموع ماتریس‌های سختی دو لایه خواهد بود.

۴- اعمال نیرو می‌تواند به‌صورت بار وارده بر یک سطح چهارضلعی یا به‌صورت یک بار متمرکز باشد که در نهایت این بار بین گره‌ها توزیع خواهدشد.

۵- هنگامی که دال دارای تقارن باشد می‌توان براساس محورهای تقارن فقط بخشی از دال را در نظر گرفت. این عمل باعث کاهش داده‌ها و کاهش تعداد اعضای ماتریس سختی و در نتیجه کاسته شدن از حافظه و زمان اجرا توسط کامپیوتر خواهد شد.

۶- برنامه قادر به محاسبهٔ درجهٔ حرارت مؤثر بر پیچش و فضای خالی به‌وجود آمده در بین دال و بستر و تنش‌ها و تغییر مکان‌های حاصله می‌باشد.

۷- برنامه قادر به درک وضعیت تماس بین دال و بستر می‌باشد. که این عمل به‌صورت خودکار و بر اثر تکرار عملیات انجام می‌شود که در روش‌های تحلیلی موجود از جمله وسترگارد امکان‌پذیر نمی‌باشد.

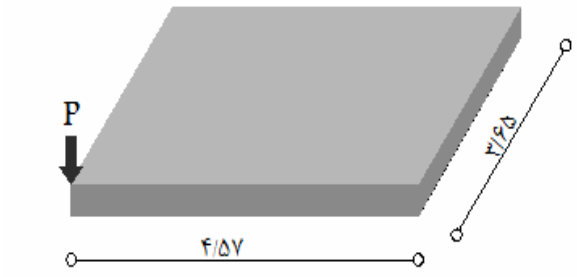
۸- برنامه قابلیت تحلیل دال‌های واقع بر بسترهای مایع، صلب و لایه‌ای را دارد [سنگتراش قمی، ۱۳۷۶].

۷- مقایسهٔ روش‌ها با حل یک دال نمونه

برای مقایسهٔ این سه روش یک دال ساده با مشخصات و پارامترهایی به شرح زیر مورد تحلیل قرار گرفته است.

۷-۱- مشخصات و پارامترهای انتخابی

برای تحلیل یک دال نمونه و استخراج نتایج هر روش، دالی با ابعادی که در شکل ۱۹ آمده است، در نظر گرفته شده است.



شکل ۱۹- نمایش مشخصات دال مورد بررسی در حالت بار در گوشه

پارامترهای مورد نیاز به همراه واحد انتخابی در نرم‌افزارها و روش وسترگارد به شرح زیر انتخاب شده‌اند:

E ضریب الاستیسیتهٔ بتن برابر ۲۷۶۰۰ MPa

K ضریب عکس‌العمل بستر برابر ۵۴/۲ MPa/m

α_t ضریب انبساط حرارتی بتن برابر $۹\times۱۰^{-۶}/^{O}C$

Δt اختلاف دمای بالا و پایین دال برابر $۱۱/۱\ ^{O}C$

ℓ شعاع سختی نسبی دال برحسب متر یا میلی‌متر

ν ضریب پواسون بتن برابر ۰/۱۵

L طول دال برابر ۴/۵۷ متر

B عرض دال برابر ۳/۶۵ متر

D ضخامت دال برحسب میلی‌متر که برابر ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ و ۲۵۰ میلی‌متر می‌باشد.

a شعاع دایرهٔ بار گسترده که توسط تایر به دال وارد می‌شود و برابر ۶۲۰ KPa می‌باشد.

σ_c تنش گوشهٔ دال (MPa)

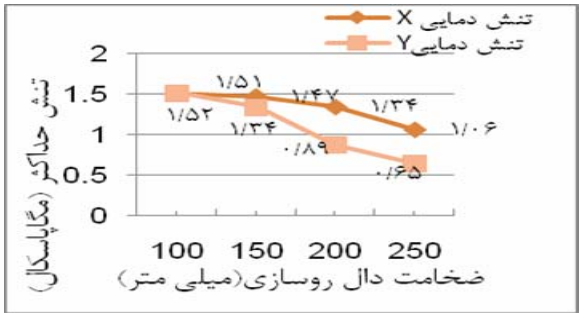
σ_e تنش لبهٔ دال (MPa)

σ_i تنش داخل دال (MPa)

σ_t تنش دمایی دال (MPa)

۷-۲-نتایج روش وسترگارد برای بار ۸۰ کیلونیوتن

برای بار ۸۰ کیلونیوتن و حالت‌های قرارگیری بار در گوشه، لبه و وسط دال، نتایج روش وسترگارد در جدول۱ مشخص شده‌است.

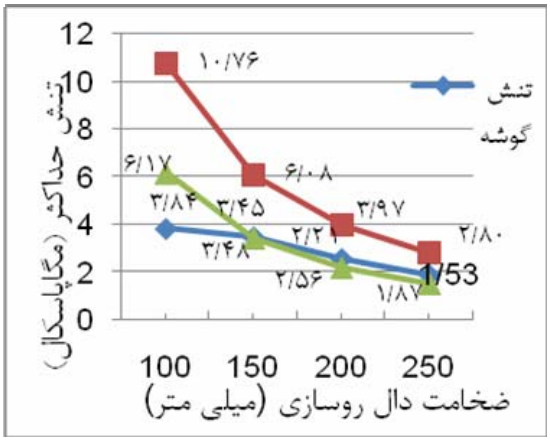


نمودار ۱- نتایج تنش‌ها برای بار ۸۰ کیلونیوتن

جدول۱- نتایج حاصل از روابط وسترگارد برای بار ۸۰ کیلونیوتن

P =۸۰KN				
ردیف	ضخامت (mm)	تنش گوشه (MPa)	تنش لبه (MPa)	تنش داخل (MPa)
۱	۱۰۰	۳/۸۴	۱۰/۷۶	۶/۱۷
۲	۱۵۰	۳/۴۸	۶/۰۸	۳/۴۵
۳	۲۰۰	۲/۵۶	۳/۹۷	۲/۲۱
٤	۲۵۰	۱/۸۷	۲/۸۰	۱/۵۳

نمودار ۲- نتایج تنش ناشی از اختلاف دما



همان‌طور که انتظار می‌رود با کاهش ضخامت دال تنش‌ها افزایش یافته و حداکثر تنش در حالت بار در لبه ایجاد شده است.

جدول۲- نتایج حاصل از روابط وسترگارد برای تنش ناشی از اختلاف دما

ردیف	ضخامت (mm)	تنش در جهت (MPa)x	تنش در جهت (MPa)y
۱	۱۰۰	۱,۵۱	۱,۵۲
۲	۱۵۰	۱,٤۷	۱,۳٤
۳	۲۰۰	۱,۳٤	۰,۸۸
٤	۲۵۰	۱,۰٦	۰,٦۵

مشاهده می‌شود که تنش دمایی در دو جهت x و y تقریباً برابر هستند که این به‌دلیل نزدیکی اندازهٔ طول و عرض دال به هم می‌باشد.

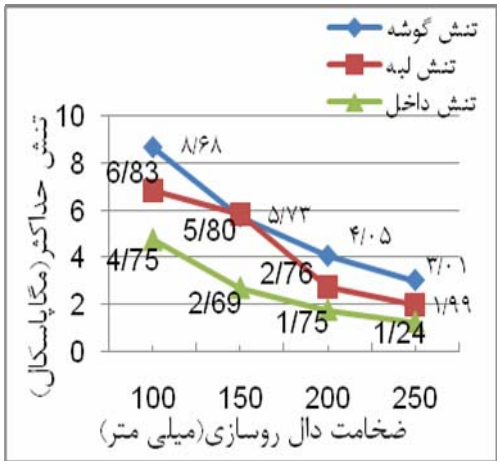
۷-۳- نتایج روش KENSLABS ناشی از بار ۸۰ کیلونیوتن

نتایج حاصل از روش نرم‌افزار KENSLABS برای بار ۸۰ کیلونیوتن در جدول و نمودار ۳ آمده است.

طبق یک قاعدهٔ کلی تنش لبهٔ روسازی از تنش گوشه در حالتی که گوشه دارای تکیه‌گاه باشد بیش‌تر خواهد بود [Delatte,2008].

جدول ۳- نتایج حاصل از نرم‌افزار KENSLABS برای بار ۸۰ کیلونیوتن

ردیف	ضخامت (mm)	تنش دمایی (MPa)
۱	۱۰۰	۱/۷۱
۲	۱۵۰	۱/۷۰
۳	۲۰۰	۱/٦۹
٤	۲۵۰	۱/٦۸

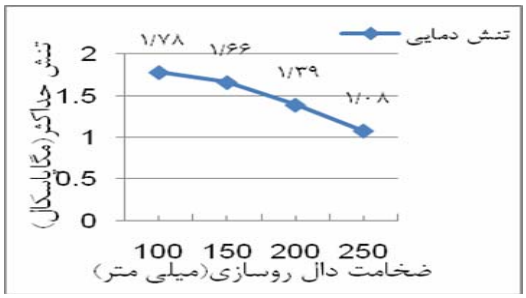


نمودار ۳- نتایج تنش‌ها برای بار ۸۰ کیلونیوتن با نرم‌افزار KENSLABS

این موضوع در نتایج تنش محاسبه شده توسط وسترگارد در قسمت قبل مشاهده می‌شود. ولی ملاحظه می‌شود که در روش KENSLABS تنش گوشه بیش‌تر از دیگر تنش‌ها شده که این موضوع به‌دلیل فرض پی مایع در تحلیل این دال می‌باشد.

جدول ۴- نتایج تنش ناشی از دما حاصل از نرم‌افزار KENSLABS

P=۸۰KN				
ردیف	ضخامت (mm)	تنش گوشه (MPa)	تنش لبه (MPa)	تنش داخل (MPa)
۱	۱۰۰	۸/۶۸	۶/۸۳	۴/۷۵
۲	۱۵۰	۵/۷۳	۵/۸۰	۲/۶۹
۳	۲۰۰	۴/۰۵	۲/۷۶	۱/۷۵
۴	۲۵۰	۳/۰۱	۱/۹۹	۱/۲۴



نمودار ۴- نتایج تنش ناشی از اختلاف دما

تنش‌های دمایی در این نمودار نمایانگر تغییرات ناچیز تنش دمایی در ضخامت‌های کوچک می‌باشد.

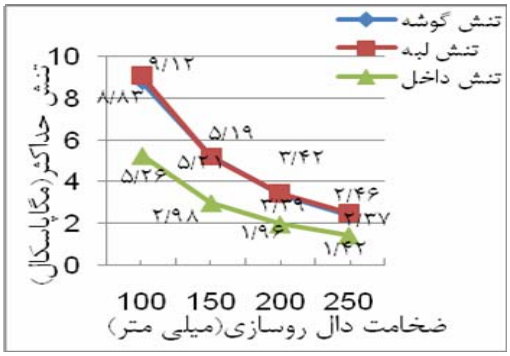
۷-٤- نتایج روش نرم‌افزار EverFE ناشی از بار ۸۰ کیلونیوتن

برای مقایسهٔ این نرم‌افزار با دو روش دیگر نمونهٔ دال مورد تحقیق را با این نرم‌افزار تحلیل نموده و نتایج آن به‌صورت جداول و نمودارهایی در زیر نشان داده شده است.

این نتایج نیز اهمیّت بار گوشه در حالتی که بستر مایع برای دال فرض می‌شوند، را نشان می‌دهند. مقادیر بار لبه و بار گوشه در این نرم‌افزار خیلی به‌هم نزدیک می‌باشند.

جدول ۵- نتایج حاصل از نرم‌افزار EverFE برای بار ۸۰ کیلونیوتن

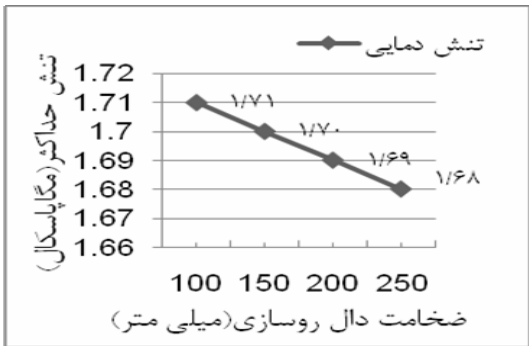
P= ۸۰KN				
ردیف	ضخامت (mm)	تنش گوشه (Mpa)	تنش لبه (Mpa)	تنش داخل (Mpa)
۱	۱۰۰	۸/۸۳	۹/۱۲	۵/۲۶
۲	۱۵۰	۵/۲۱	۵/۱۹	۲/۹۸
۳	۲۰۰	۳/۳۹	۳/۴۲	۱/۹۶
۴	۲۵۰	۲/۳۷	۲/۴۶	۱/۴۲



نمودار ۵- نتایج تنش‌ها برای بار ۸۰ کیلونیوتن

جدول ۶- نتایج تنش ناشی از اختلاف دما با نرم‌افزار EverFE

ردیف	ضخامت (mm)	تنش دمایی (MPa)
۱	۱۰۰	۱,۷۸
۲	۱۵۰	۱,۶۶
۳	۲۰۰	۱,۳۹
۴	۲۵۰	۱,۰۸

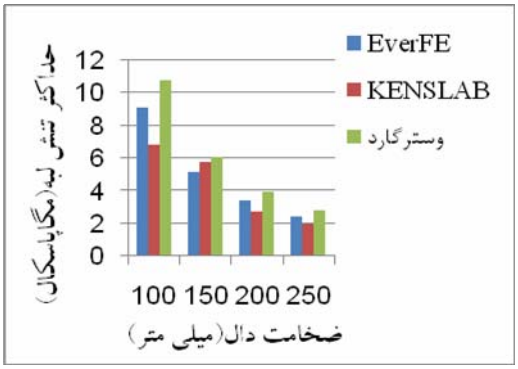


نمودار ۶- نتایج تنش ناشی از اختلاف دما

چون نرم‌افزار EverFE در جهت ضخامت دال نیز المان‌بندی انجام می‌دهد لذا تنش‌های دمایی را به‌طور دقیق‌تری نسبت به دو روش دیگر ارائه می‌دهد. این موضوع در نمودار مشخص است.

۷-۵- تحلیل نتایج روش‌ها

برای مقایسهٔ بهتر نتایج این سه روش برای دال نمونه، می‌توان نتایج هر سه روش را برای حالت‌های بارگذاری داخل، گوشه و لبه و ضخامت‌های مختلف دال در جداول و نمودارهایی مشخص نمود که با توجه به اهمیت بار لبه این مقایسه در جدول و نمودار ۷ برای بار ۸۰ کیلونیوتن، آمده است.



نمودار ۷- مقایسهٔ نتایج تنش لبه برای بار ۸۰ کیلونیوتن

جدول ۷- مقایسهٔ نتایج تنش لبهٔ دال برای بار ۸۰ کیلونیوتن

تنش ناشی از بار در لبه دال				
P= ۸۰KN				
ردیف	ضخامت (mm)	EverFE (Mpa)	KENSLABS (Mpa)	وسترگارد (Mpa)
۱	۱۰۰	۹/۱۲	۶/۸۳	۱۰/۷۶
۲	۱۵۰	۵/۱۹	۵/۸۰	۶/۰۸
۳	۲۰۰	۳/۴۲	۲/۷۶	۳/۹۷
۴	۲۵۰	۲/۴۶	۱/۹۹	۲/۸۰

۸- جمع بندی

پس از حل دال مورد نظر در قسمت‌های قبل و با مقایسهٔ جمیع موارد می‌توان نتیجه‌گیری کلی زیر را ارائه کرد:

۱- در حالت بار در لبهٔ دال، روش وسترگارد بیش‌ترین تنش‌ها و KENSLABS کم‌ترین مقادیر تنش را نشان می‌دهد.

۲- دو روش نرم‌افزاری نسبت به روش دستی وسترگارد نتایج نزدیک به هم ارائه نموده‌اند.

۳- با توجه به انجام المان‌بندی بهتر توسط نرم‌افزار EverFE، نتایج متوسط و بهتری نسبت به دو روش دیگر ارائه داده است.

۴- هرچه ضخامت دال بزرگتر شده است فاصلهٔ بین نتایج در تمام حالت‌ها کم‌تر شده است.

پانوشت

۱- Jointed Plain Concrete Pavement

۲- Jointed Reinforced Concrete Pavement

۳- Continuously Reinforced Concrete Pavement

۹- مراجع

[1].Hung&Yang.,KENSLABS Computer Program, Available from: http: // www. webs1. Uidaho. Edu, 1993..

[2].Delatte, N., Concrete Pavement Design, Construction, and Performance. London and Newyork: Taylor and Francis 2008.

[3]. Kumara, M. "Analysis and Verification of Stresses and Strains and their Relationship to Failure in Concrete Pavements under Heavy Vehicle Simulator Loading." Ph.D. thesis, University of Florida, 2005.

[4].WSDOT, Washington State Department of Transportation Pavement. Guide, [online] Available from:http://www.training.ce. Washing - ton. Edu, 2003.