«یادداشت تحقیقاتی»

تحلیل عددی رفتار داولها در روسازه بتنی فرودگاه

فریدون مقدس نژاد[1*]، رضا احمدي جيردهي[2]

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

۲- کارشناس ارشد راه و ترابری ، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

[*] تهران، صندوق پستی ۴۴۱۳- ۱۵۸۷۵

moghadas@aut.ac.ir

(دریافت مقاله: تیر ۱۸۲، پذیرش مقاله:اسفند ۱۳۸۳)

چکیده– در روسازی فرودگاهها استفاده از داول برای انتقال بخشی از بار ـ از دال بارگذاری شده به دال بارگذاری نشده ـ به منظور کاهش تنشها و تغییرمکانها بسیار معمول است. روشهای کنونی برای طراحی این داولها، با ساده‌سازیهای بسیاری همراه است. در این مقاله با مدلسازی سه بعدی تمامی اجزای روسازی (دال، داول) و بستر، به‌روش المانهای محدود و در نظر گرفتن وضعیت آنها نسبت به یکدیگر (پیوسته یا لغزنده)، رفتار داولها مطالعه می‌شود. مطالعه پارامتری مفصلی دربارهٔ اثر متغیرهایی مانند طول داول و دال، لقی داول و عرض درز بر رفتار داولها انجام می‌شود. همچنین معیارهای مختلف تعریف کارایی درز را ارزیابی می‌کنیم.

نتایج این تحقیق بیانگر این واقعیت است که اولا نیروی برشی وارد بر داول ـ که از روشهای کنونی طراحی داول به دست می‌آید ـ کمتر از مقدار واقعی است و ثانیا استفاده از ماده کاهش دهنده اصطکاک (قیر یا مواد مشابه) بین دال بتنی و بستر، سبب افزایش انتقال بار به دال مجاور تا ۱۵ درصد نسبت به حالت معمولی خواهد شد. بعلاوه به منظور افزایش کارایی درز در انتقال بار، عرض درز باید به حداقل ممکن کاهش یابد. در پایان براساس نتایج تحلیل برای چند نوع بار گذاری هواپیما و مقاومتهای مختلف خاک بستر، جداول طراحی برای داولها ارائه شده است.

کلید واژگان: روسازی بتنی، دال، داول، کارایی درز، اجزای محدود.

۱- مقدمه

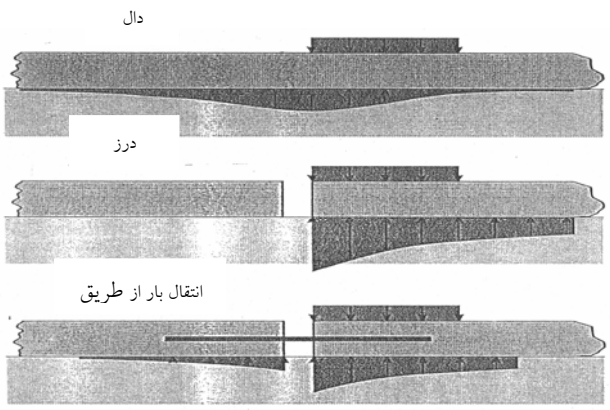
در روسازی فرودگاهها استفاده از دالهای بتنی ـ که در امتداد درزها با داول به یکدیگر متصلند ـ بسیار معمول است. درزهای باریک بین دالهای بتنی، این امکان را فراهم می‌سازد تا انقباض و انبساط بتن براحتی انجام شود. وجود این درز موجب انتقال نیافتن بار از یک دال به دال مجاور آن می‌شود. لذا با استفاده از داولها انتقال این بار انجام می‌شود. شکل ۱ سازوکار این انتقال را نشان می‌دهد. دال پیوسته، می‌تواند بار اعمال شده را در تمام طول دال بارگذاری شده توزیع کند در صورتی که در دال غیر پیوسته، بار فقط دال بارگذاری شده را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ در نتیجه، تنش در زیر دال بار گذاری شده، بزرگتر از تنش ایجاد شده در حالت دال پیوسته است.

استفاده از داول این امکان را فراهم می‌آورد تا مقداری از بار اعمال شده به دال مجاور انتقال یابد. این انتقال بار از طریق عمل برشی داول صورت گرفته و موجب می‌شود

Archive of SID

www.SID.ir

که دال مجاور نیز در تحمل بار نقش داشته و در نتیجه تنش در زیر دال بار گذاری شده کاهش یابد.



شکل ۱ مکانیسم انتقال بار در دالهای داول شده

از آنجا که هدف از استفاده از درزهای دارای داول، انتقال بار از دال بار گذاری شده به دال بار گذاری نشده است به پارامتری برای سنجش کارایی درز داول شده نیاز است. پارامتری که در این مقاله برای سنجش کارایی درز استفاده می‌شود چنین است:

$$LTE_{shear} = \frac{V_{dowel}}{V_{slab}} \qquad (۱)$$

که در آن پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شود:

LTE_{Shear}: کارایی درز با در نظر گرفتن برش انتقال یافته به‌عنوان مشخصه کارایی درز؛

V_{dowel}: نیروی برشی موجود در داول؛

V_{slab}: نیروی برشی که توسط دال پیوسته منتقل می‌شود.

نرم افزار مورد استفاده در این تحقیق، برنامه المانهای محدود ANSYS نگارش ۵/۴ است. در کل مدلسازی اجزای روسازه و بستر، از روش اجزای محدود جامد[1] استفاده شده و با هدف واقع گرایی بیشتر، از استفاده از اجزای فنری در خاک بستر اجتناب شده است.

۲- بررسی صحت تحلیل

قبل از هر چیز، درستی نتایج تحلیل باید ارزیابی می‌شد. به منظور بررسی صحت تحلیل در این بخش، با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده در فرودگاه بین المللی دنور [۱] مقایسه‌ای بین مقادیر حاصل از نتایج تحلیل سه‌بعدی این تحقیق و مقادیر اندازه‌گیری شده، انجام شده است. البته مقادیر اندازه‌گیری شده شامل پارامترهای مربوط به داول نمی‌شود، اما این مطالعه نتایج قابل توجهی را به‌دست می‌دهد که در ادامه به تفضیل بیان می‌شوند.

در آوریل ۱۹۹۲ که فرودگاه بین المللی دنور در دست ساخت بود، سازمان مرکزی هوانوردی امریکا تصمیم به انجام یک پروژه اندازه‌گیری بر روی روسازی صلب گرفت که این اندازه‌گیریها از ژوئن ۱۹۹۳ آغاز شد. نخستین هواپیمای مورد استفاده در آزمایش، جنگنده F-15 بود و در اکتبر ۱۹۹۳ نیز هواپیماهای نظامی C–30 و C–41 برای جمع آوری داده‌ها استفاده شد.

فرودگاه بین المللی دنور در ۳۷ کیلومتری شمال شهر دنور قرار دارد و در فوریه ۱۹۹۵ افتتاح شده است. دراین فرودگاه پنج باند خزش هر یک به‌طول ۳۶۵۸ متر و عرض ۴۶ متر وجود دارد که سه باند آن در امتداد شمال– جنوب و دو تای دیگر در امتداد شرق– غرب قرار گرفته است.

قسمت مورد مطالعه، در انتهای باند 16L-34R، شامل ۱۶ دال بتنی است که در قسمت غربی خط مرکزی باند قرار گرفته‌اند (شکل۲). کرنشهای طولی و عرضی کف دال، به‌وسیله کرنش‌سنجها و افت و خیز روسازه در مقایسه با نقاط مرجع در عمقهای ۳ و ۶ متری به‌وسیله تعدادی LVDT[2] اندازه‌گیری شده است. توضیحات کامل در باره مشخصات سیستم ابزار دقیق در مرجع [۱] ارائه شده است.

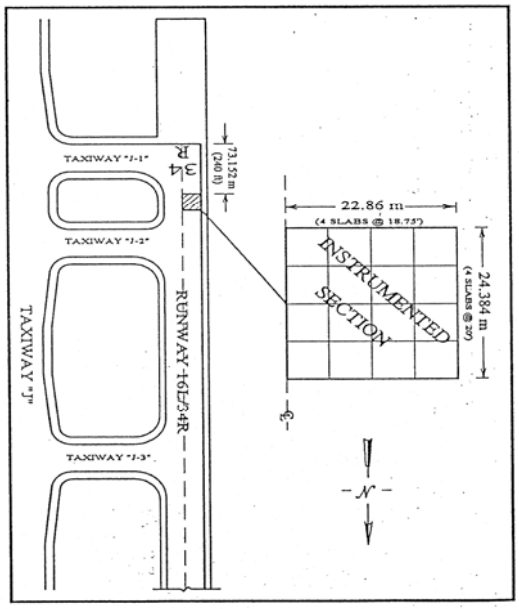
این فرودگاه برای ترافیک سال ۲۰۳۵ یعنی دوره‌ای ۴۰ ساله طراحی شده و در طراحی آن، ضوابط اداره هواپیمایی امریکا[3] و همچنین ضوابط انستیتو سیمان

1. Solid

2. Linear Variable Differential Transducer
3. FAA

Archive of SID
www.SID.ir

پرتلند[1] مورد توجه قرار گرفته است. روسازه این فرودگاه شامل دال بتنی، لایه کاهش دهنده اصطکاک (امولسیون قیر)، اساس تثبیت شده با سیمان، زیراساس تثبیت شده با آهک و خاکریز رسی متراکم شده است.

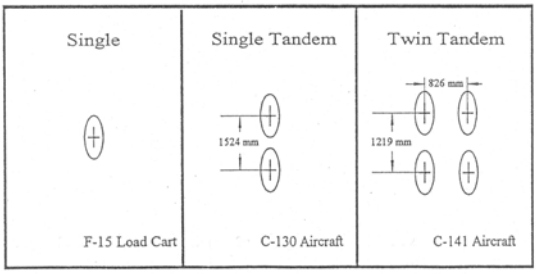


شکل۲ ناحیه مجهز به اندازه‌گیری بر روی باند خزش 16L/34R که ابزار اندازه‌گیری رفتار روسازی در آن نصب شده است [۱].

همانطور که گفته شد سه هواپیمای F-15 ، C-141 و C-130 در این مطالعه استفاده شده که مشخصات این هواپیماها و تعداد آ زمایش با هر هواپیما و همچنین زمان آزمایش در جدول ۱ و شکل ۳ آورده شده است.

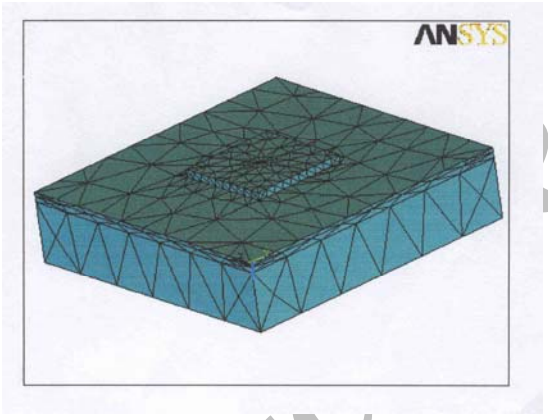
جدول۱ اطلاعات آزمایشها در فرودگاه بین المللی دنور[۱]

وسیله بارگذاری	بار (Kg.)		فشار باد چرخ (Mpa)	تعداد عبور	زمان آزمایش	
	حداکثر	حداقل			روز	شب
هواپیمای جنگنده F-15	۱۳۸۴۸	۱۳۸۴۸	۲/۳۴	۵۴	x	x
هواپیمای C-130	۵۱۶۱۹	۵۶۰۱۹	۰/۵۱	۲۴	x	
هواپیمای C-141	۸۰۴۲۲	۱۰۸۰۸۰	۱/۳۴	۲۶	x	



شکل ۳ مشخصات هواپیماهای مورد استفاده در فرودگاه بین المللی دنور [۱]

مشخصات لایه‌ها که در تحلیل استفاده شده بر طبق آزمایشهای انجام شده بر روی مصالح به‌کار رفته در این روسازی، در جدول ۲ ارائه شده است. المان‌بندی مدل (مش) نیز در شکل ۴ آورده شده و لایه فوقانی بتن و سایر لایه‌ها بترتیب اساس، زیر اساس و خاکریز است.



شکل ۴ المان بندی لایه‌های روسازی

برای مدلسازی لایه‌ها از اجزای جامد و برای مدلسازی لغزش بین لایه‌ها از اجزای تماس[2] استفاده شده است و مدل به صورت ارتجاعی تحلیل شده است. مشخصات لایه‌های روسازی در جدول ۲ ارائه شده است.

در مورد مشخصات اجزای تماس، مقادیر دقیقی در مراجع ارائه نشده و اصولا روش خاصی برای اندازه‌گیری آنها وجود ندارد و عموما مقادیر فرضی برای آنها در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که هدف امکان ایجاد لغزش بین

1. PCA

2. Contact

www.SID.ir

دال و اساس است ضرایب مورد استفاده به‌صورت زیر فرض شد.

جدول ۲ مشخصات مصالح و ضخامت لایه‌های روسازه و بستر مورد استفاده در مدل اجزای محدود [۱]

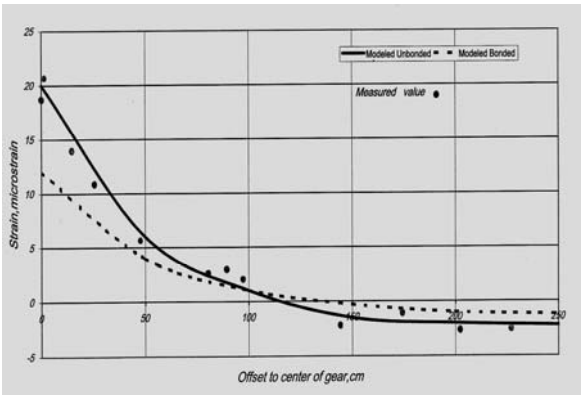
لایه	ضخامت لایه (میلیمتر)	مدول الاستیسیته (کیلوگرم بر سانتیمتر مربع)	ضریب پواسون
دال بتنی	۴۳۲	۳۲۴۰۵۰	۰/۲
اساس تثبیت شده با سیمان	۲۰۳	۶۸۹۵۰	۰/۲
زیر اساس تثبیت شده با آهک	۳۰۵	۴۱۴۰	۰/۴
خاکریز رسی	–	۱۳۷۹	۰/۵

سختی عمودی (کیلوگرم بر سانتیمتر) K_N=۱۰۰۰ ، سختی مماسی (کیلوگرم بر سانتیمتر) K_T=۱، ضریب اصطکاک Mu۰/۰۰۱ .

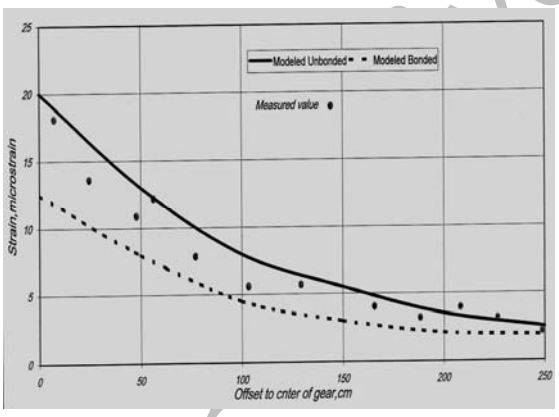
به علت محدودیت حجم مقاله، در اینجا فقط هواپیمای جنگنده F-15 بررسی می‌شود. چرخ این هواپیما با استفاده از یک سطح دایره ای با مساحت ۵۷۹/۳ سانتی متر مربع و فشار یکنواخت ۲۳/۴ کیلوگرم بر سانتی مترمربع مدل شده که معادل ۱۳۸۴۸ کیلوگرم بار است.

برای تحلیل مدلها از دو وضعیت استفاده شده است. درحالت اول برای معرفی وضعیت بین دال بتنی و اساس، از شکل پیوسته[1] استفاده شد و در حالت دوم، وضعیت به‌صورت ناپیوستگی[2] با استفاده از المانهای تماس مدلسازی شده است.

شکلهای ۵ و ۶ نشان‌دهنده کرنشهای اندازه‌گیری شده و کرنشهای محاسبه شده برای دو حالت پیوسته و ناپیوسته است. شکلهای مذکور نشان می‌دهند که مدل پیوسته تطابق بهتری با کرنشهای طولی اندازه‌گیری شده دارد در حالی‌که کرنشهای عرضی اندازه‌گیری شده با مدل ناپیوسته تطابق بهتری دارند. این نتیجه بیانگر احتمال لغزش بین دال و اساس در جهت عرضی به علت بزرگ بودن مقادیرکرنش برشی در این ناحیه است (مقدار کرنش برشی از شیب انحنای منحنی تغییرات کرنشهای عرضی و طولی مشخص می‌شود). همانطور که از اشکال ۵ و۶ معلوم است این شیب در کرنشهای عرضی بیشتر از کرنش طولی است.



شکل ۵ کرنشهای عرضی در زیر دال بتنی برای جنگنده F-15



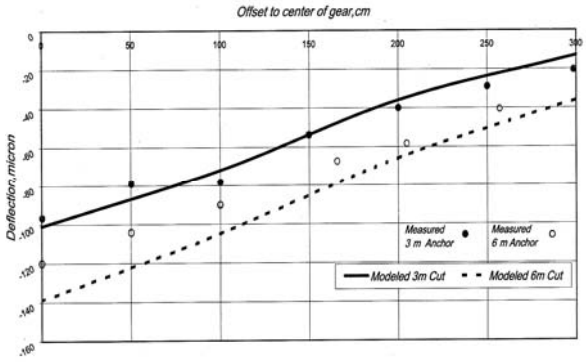
شکل ۶ کرنشهای طولی در زیر دال بتنی برای جنگنده F-15

شکل ۷ نشان دهنده تغییر شکلهای اندازه‌گیری شده و تغییر شکلهای محاسبه شده است. نمودار مذکور نشان می‌دهد که افتهای اندازه‌گیری شده با افت سنجهایی که نشست را نسبت به عمق ۳ متری اندازه گرفته‌اند، با افتهای محاسبه شده توسط مدلی که تکیه گاههای زیری

1. Bonded
2. Unbonded

Archive of SID
www.SID.ir

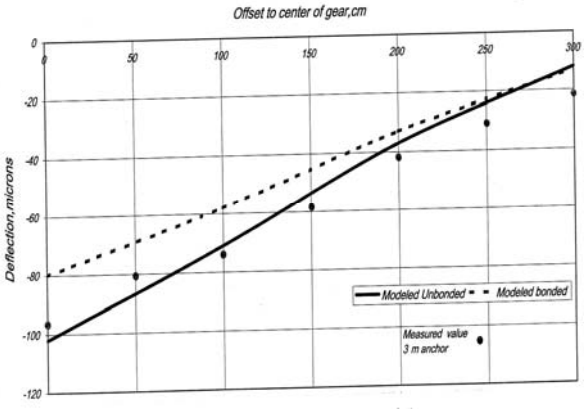
آن در عمق ۳ متری مدل شدهاند، تطابق خوبی دارنـد. در حالی که افتهای اندازهگیری شده توسط افت سنجهایی که نشست را نـسبت بـه عمـق ۶ متـری انـدازه گرفتـهانـد ، تغییرشکلهایی را کمتر از آنچـه مـدل دارای تکیـه گـاه در عمق ۶متر نشان میدهد، ارائه میکند.



شکل ۷ مقایسه تغییر شکلهای اندازهگیری شده و تغییر شکلهای محاسبه شده در مدل ناپیوسته برای جنگنده F-15

تفاوت بین مقادیر اندازهگیری شده توسط افتسنجهای نصب شده در عمق ۳متری و ۶متری مطابق شکل ۷ حدود ۲۰ میکرون است. در حالی که این تفاوت درمقادیر محاسبه شده حدود ۳۵ میکرون است، یعنی مقادیر محاسبه شده توسط مدل با عمق ۶ متر، از مقدار واقعی بیشتر است. دلیل این ناهماهنگی بین نتایج تحلیلی و مقادیر اندازهگیری شده را میتوان به افزایش ضریب ارتجاعی الاستیسیته ناشی از افزایش فشار محدود کننده با عمق نسبت داد. زیرا در مدل مورد استفاده برای خاک بستر از ضریب ارتجاعی در عمق استفاده شده که با آنچه در واقعیت وجود دارد، تطبیق نمیکند.

شکل ۸ مقادیر محاسبه شده افت را در مدلی که تکیه گاههای آن درعمق سه متری قرار دارند، در دوحالت پیوستگی و ناپیوستگی در زیر دال بتنی با مقادیر اندازهگیری شده مقایسه میکند. این مقایسه نشان میدهد که مدل ناپیوسته هماهنگی بهتری با مقادیر اندازهگیری شده دارد.

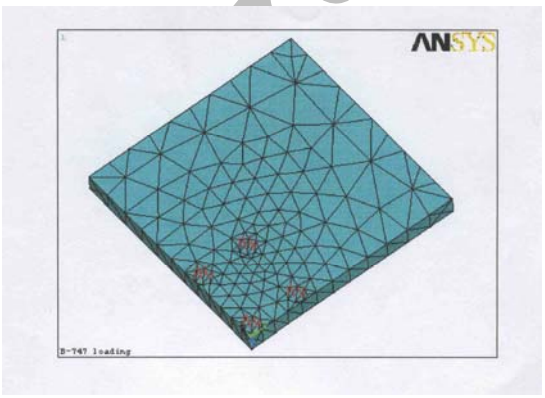


شکل ۸ مقایسه تغییر شکلهای اندازهگیری شده در عمق ۳ متری و تغییر شکلهای محاسبه شده در مدل دارای تکیه گاه در عمق ۳ متری برای جنگنده F-15

۳- مطالعه پارا متری

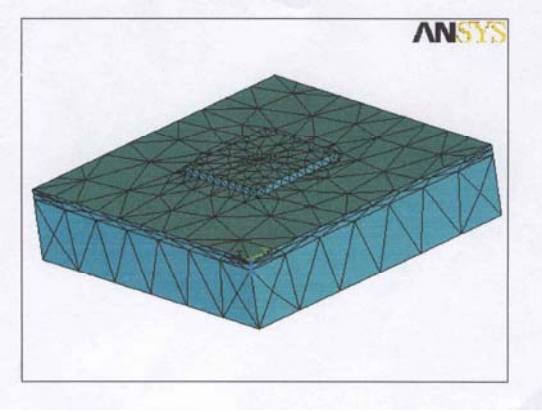
دراین بخش مطالعهای پارامتری به صورت سه بعدی و بـا فرض رفتار ارتجاعی خطی، بر روی روسازه صلب انجـام شده و در هر قسمت، با تغییر دادن یک پارامتر مانند طول دال، اندازهٔ درز، طول داول و مانند آن، تاثیر این تغییـرات بررسی میشود.

شکل ۹ نشان دهندهٔ تقـسیم بنـدی اجـزا در دال بتنـی است که بارگذاری بوئینگ ۷۴۷ به آن اعمال شده و شکل ۱۰ نیز تقسیمبندی اجزای لایههای روسازه مـورد اسـتفاده در این بخش را نشان مـیدهـد. شـکل ۱۱ نـشان دهنـدهٔ چگونگی تقسیم اجزای داولها است.

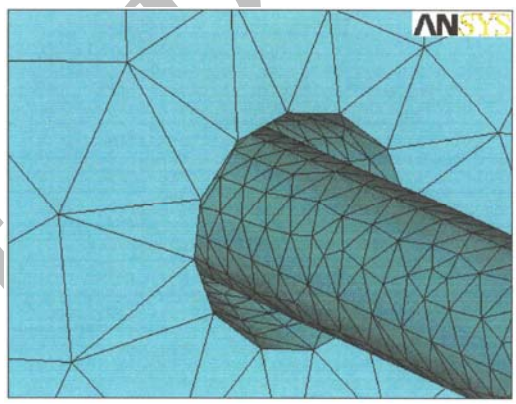


شکل ۹ تقسیم اجزای دال بتنی با بارگذاری

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱۰ تقسیم اجزای لایه‌های روسازی بوئینگ ۷۴۷



شکل ۱۱ تقسیم اجزا در داولها

۳-۱- مدل مورد استفاده برای تحلیل

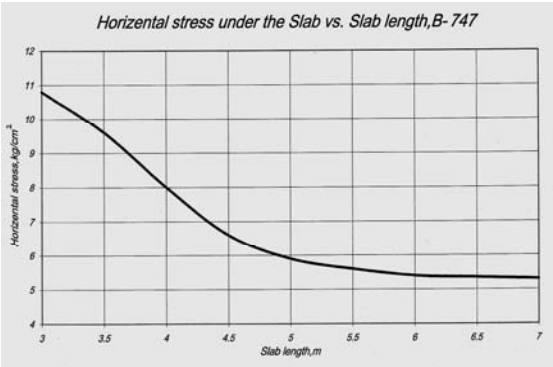
برای مدلسازی لایه‌های روسازه، از المان سه بعدی جامد که ۱۰ گره و در هر گره سه درجه آزادی انتقالی دارند استفاده شده است. مشخصات لایه‌های روسازه مورد استفاده به‌شرح جدول ۳ است.

جدول ۳ مشخصات لایه‌های مورد استفاده در مطالعات پارامتری

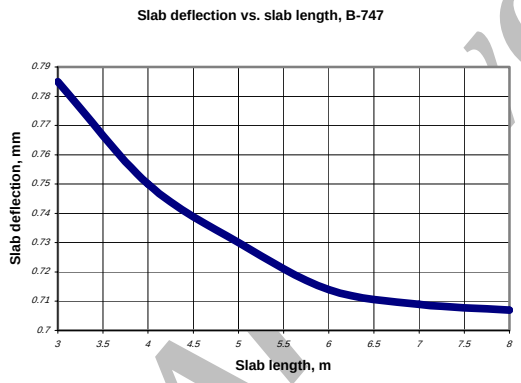
نام لایه	ضخامت (سانتیمتر)	ارتجاعی (کیلو ضریب گرم بر سانتیمتر مربع)	ضریب پواسون
دال بتنی	۴۰	۲۷۶۰۰۰	۰/۱۵
اساس تثبیت شده	۲۰	۱۳۸۰۰۰	۰/۲
زیر اساس	۳۰	۳۴۰۰	۰/۳۵
خاک بستر	۳۰۰	۶۰۰	۰/۴۵

۳-۲- طول دال

در این بخش بار بوئینگ ۷۴۷ درحالت بحرانی (بارگذاری گوشه، شکل ۹) روی دالهایی با ابعاد مختلف قرار داده و طول دال تاحدی افزایش داده می‌شود که این افزایش، تأثیر محسوسی بر تغییر مکانها و تنشها نداشته باشد. نتایج این مطالعات در شکلهای ۱۲ تا ۱۳ آورده شده است.



شکل ۱۲ تغییرات تنش کششی افقی به صورت تابعی از افزایش طول دال



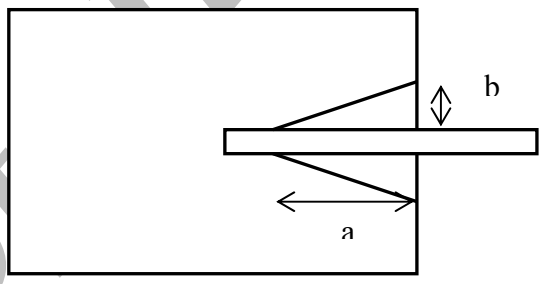
شکل ۱۳ تغییرات خیز دال به صورت تابعی از افزایش طول دال

بررسی این نمودارها نشان می‌دهد که با افزایش طول دال بتنی، تنشها و تغییر مکانها بتدریج کاهش می‌یابد به نحوی که پس از یک طول معیّن (۶ متر)، این افزایش طول اثر محسوسی بر کاهش تنش یا تغییز مکان ندارد. لذا این طول را می‌توان به عنوان طول مناسب برای دال بتنی در نظر گرفت.

Archive of SID
www.SID.ir

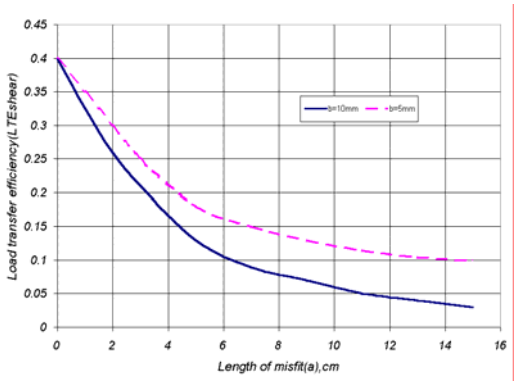
۳-۳- لقی داول

یکی دیگر از مواردی که در این مقاله بررسی می‌شود، تأثیر لقی داول بر روی کارایی درز است. به مرور زمان و با بارگذاریهای متعدد، روسازی بتنی ناحیه اطراف داول در نزدیکی درز بتدریج خرد شده و این خردشدگی بتن، تأثیر منفی بر انتقال بار از دال بارگذاری شده به دال بارگذاری نشده خواهد داشت. مقدار لقی داول، با اندازهٔ b (ارتفاع لقی) از کنار دال شروع شده و این مقدار به‌صورت خطی کاهش می‌یابد تا در فاصله a (عمق لقی) از کنار دال به صفر برسد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴ ابعاد لقی دال

نتایج این مطالعات در شکل ۱۵ آورده شده است.



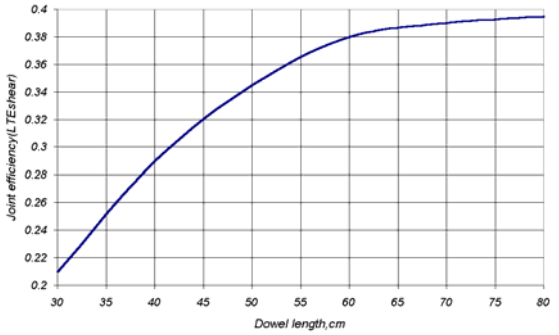
شکل ۱۵ تأثیر لقی داول بر روی کارایی درز درمدل دارای داول لغزان

همانطور که ملاحظه می‌شود هر دو پارامتر a وb، در کاهش ضریب انتقال بار به دال مجاور، نقش دارند. با افزایش a، انتقال بار کاهش پیدا می‌کند به طوری که برای a = ۶، ضریب انتقال بار به ۰/۱ می‌رسد (در حالت ایدئال این ضریب برابر ۰/۵ است). این می‌تواند در برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری روسازه نقش تعین کننده‌ای داشته باشد.

۳-۴- طول داول

پارامتر دیگری که تأثیر آن بر کارایی درز بررسی می‌شود، طول داول است. برای این منظور در مدل، کارایی درز برای داولهایی به طول ۳۰، ۴۰، ۶۰ و ۹۰ سانتی متر محاسبه و نتیجه تحلیل در شکل ۱۶ آورده شده است.

بررسی نمودار نشان می‌دهد که با افزایش طول به بیش از ۶۰ سانتیمتر، افزایش چندانی در کارایی درز مشاهده نمی‌شود.



شکل ۱۶ تأثیر طول داول بر روی کارایی درز در مدل دارای داول لغزان

۴- تأثیر اندازه درز بر میزان انتقال بار در داولها

فاصله بین درزها در دالها بیش از آنکه تابع تنشها در دال بتنی باشد تابع خاصیت جمع شدگی بتن[1] است، به‌طوری که هرچه طول دالها بیشتر باشد، عرض درز بیشتری برای مقابله با خاصیت جمع شدگی بتن مورد نیاز است. رابطه زیر عرض درز را به‌صورتی تابعی از طول دال بتنی و پارامترهای دیگر بیان می‌کند [۲]:

$$\Delta L = CL(\alpha \Delta T + \varepsilon) \qquad (۲)$$

1. Shrinkage

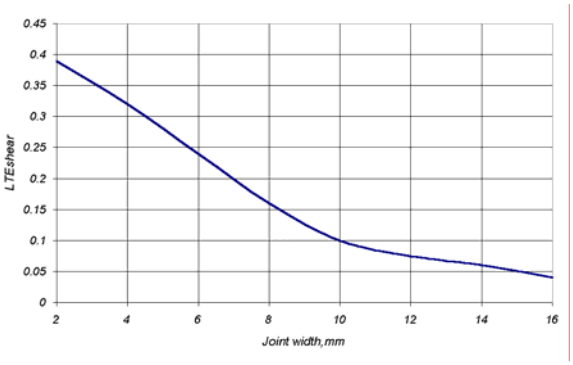
Archive of SID
www.SID.ir

که درآن ΔL، عرض درزو؛ α، ضریب انبساط حرارتی بتن، که بین 9×10^{-6} /°c تا $10/8\times10^{-6}$ /°c تغیر می‌کند؛ ε، ضریب انقباض بتن است که برابر $0/5\times10^{-4}$ تا $2/5\times10^{-4}$ است؛ L، فاصله بین درزها یا طول دال؛ ΔT، تفاوت دمای میانگین ماهیانه گرمترین و سردترین ماه؛ C، ضریب تصحیح که برای اساس تثبیت شده برابر ۰/۶۵ و برای اساس سنگدانه ای برابر ۰/۸ در نظرگرفته می‌شود.

برای مدل دال به طول ۶ متر، اختلاف درجه حرارت ۴۰ درجه سانتی گراد، ضریب انبساط حرارتی 10^{-6} و ضریب انقباض بتن $1/5\times10^{-4}$، عرض درز برطبق رابطه فوق برابر است با:

$$L = CL(\alpha\Delta T+\varepsilon) =$$
$$0/65(6000)(10^{-6} \times 40 + 0/00015)=2/145 \text{ میلیمتر}$$

بنابراین برای مدل مزبور، حداقل ۲ میلی متر عرض درز ضروری است. همین مدل برای تعیین اثر عرض درز بر انتقال بار از طریق داول برای درزهای ۶،۱۰،۱۶، ۴ و ۲ میلیمتری تحلیل و نتایج آن در شکل ۱۷ آورده شده است.



شکل ۱۷ تأثیر اندازه درز بر کارایی درز داول شده

این شکل نشان می‌دهد که با افزایش عرض درز از ۲ میلیمتر تا حدود ۱۰ میلیمتر، به ازای هر میلیمتر افزایش عرض درز، کارایی درز[1] (رابطه ۱) ۴ درصد کاهش می‌یابد و از عرض ۱ سانتیمتری به بعد، کاهش کارایی به ازای هر میلیمتر افزایش عرض درز، به حدود ۱/۵ درصد می‌رسد.

۵- بررسی اثر متقابل اجزای روسازی

دراین بخش برای یک مدل روسازی با ابعاد معین، دال و لایه‌های روسازی با جنس معلوم و بارگذاری مشخص (بوئینگ ۷۴۷)، تحلیل در چهار حالت مختلف انجام شده است (جدول ۴). درحالت اول تمام اجزای (دال، داول و بستر) به صورت تماس کامل[2] مدل شده است. در حالت دوم بین داول و یکی از دالهای بتنی، حالت لغزنده[3] تعریف شده و درحالت سوم، بین دال بتنی و بستر، حالت لغزنده[4] در نظر گرفته شده و بالاخره درحالت چهارم نیز بین داول و یکی از دالهای بتنی وهمچنین بین بستر و دال بتنی، حالت لغزنده[5] فرض شده است.

جدول ۴ حالات ممکن برای تماس دال، داول و بستر

وضعیت بین دال و داول / وضعیت بین دال و بستر	پیوسته	لغزنده
پیوسته	پیوستگی کامل بین دال، داول و بستر[2]	لغزندگی بین دال و داول[3]
لغزنده	لغزندگی بین دال و بستر[4]	لغزندگی بین دال، داول و بستر[5]

تحلیل به صورت سه‌بعدی انجام شده و برای چهار حالت فوق از داولهایی به قطر۴/۵ سانتیمتر و فاصله مرکز

1. LTE_{shear}
2. Full Bond
3. Dowel Slip
4. Base Slip
5. Full Slip

Archive of SID
www.SID.ir

به مرکز ۲۰ سانتیمتر و طول داول ۶۰ سانتیمتر استفاده شده است. نتایج حاصل در جدول ۵ آورده شده است. برای تعیین کارایی درز، نسبت نیروی برشی انتقال یافته در هر یک از حالات فوق به برش انتقال یافته ازطریق دال پیوسته، محاسبه شده است. برای این منظور، یک دال بدون درز تحلیل شده و با بررسی تنشهای برشی در مقطع میانی دال، برش انتقال یافته از طریق دال پیوسته (V_{slab}) محاسبه شده است.

کارایی درز در این چهار حالت در جدول ۵ آورده شده است.

مطالعه جداول نکات زیر را روشن می‌سازد:

- ایجاد لغزندگی بین دو جزء موجب می‌شود که انتقال بار بیشتر از طریق جزء دیگر انجام شود؛ یعنی لغزنده کردن سطح بین دال و بستر موجب می‌شود که بار بیشتری از طریق داول به بستر انتقال یابد.
- جدول ۵ نشان می‌دهد که حالتهای پیوستگی کامل بین دال، داول و بستر و لغزندگی بین دال و بستر، بیشترین کارایی را دارند، اما ایجاد حالت مزبور ـ به این علت که در عمل، لغزش بین دال و داول وجود دارد ـ امکان پذیر نیست. اما نگاهی به دو حالت دیگر نشان می‌دهد که حالت لغزندگی بین دال، داول و بستر، به اندازهٔ ۱۵درصد ـ در مقایسه با حالت لغزندگی بین دال و داول ـ کارایی بهتری دارد. به‌بیان دیگر، ایجاد لغزندگی بین دال بتنی و بستر (مثلاً با استفاده از قیر) کارایی درز را افزایش می‌دهد.

جدول ۵ کارایی درز داول شده

کارایی درز	وضعیت تماس
۰/۷۲	پیوستگی کامل بین دال، داول و بستر
۰/۳۹	لغزندگی بین دال و داول
۰/۸۷	لغزندگی بین دال و بستر
۰/۵۳	لغزندگی بین دال، داول و بستر

۶- بررسی برش در داولها

هنگامی‌که بار چرخ در محل درز اعمال می‌شود، بخشی از آن توسط گروه داولها به دال مجاور منتقل می‌شود و در طراحی داولها، آنچه مطرح است این است که در چه محدوده‌ای و چه تعدادی داول، در انتقال این نوع نیروی برشی نقش دارند. فرایبرگ[1] [۳] بر اساس نتایج تئوری وسترگارد، به این نتیجه رسید که حداکثر لنگر منفی (یا محل برش صفر)، برای هر دو بارگذاری گوشه و لبه دال، در فاصله ۱/۸ شعاع سختی نسبی (۱/۸ L) اعمال می‌شود که در آن L شعاع سختی نسبی است. آیین‌نامه انستیتو سیمان پرتلند [۴] نیز از همین فرض در طراحی داولها استفاده می‌کند.

مقدار شعاع سختی نسبی از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$L = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12\left(1-V^2\right)K}} \qquad (۳)$$

بر این اساس فرض می‌شود که هر داول به نسبت عکس فاصله از نقطه اعمال بار، برش را تحمل می‌کند. در این رابطه، حداکثر برش مربوط به نزدیکترین داول به بار است و برطبق آیین‌نامه انستیتو سیمان پرتلند، در فاصله (۱/۸L) مقدار برش برابر صفر خواهد شد.

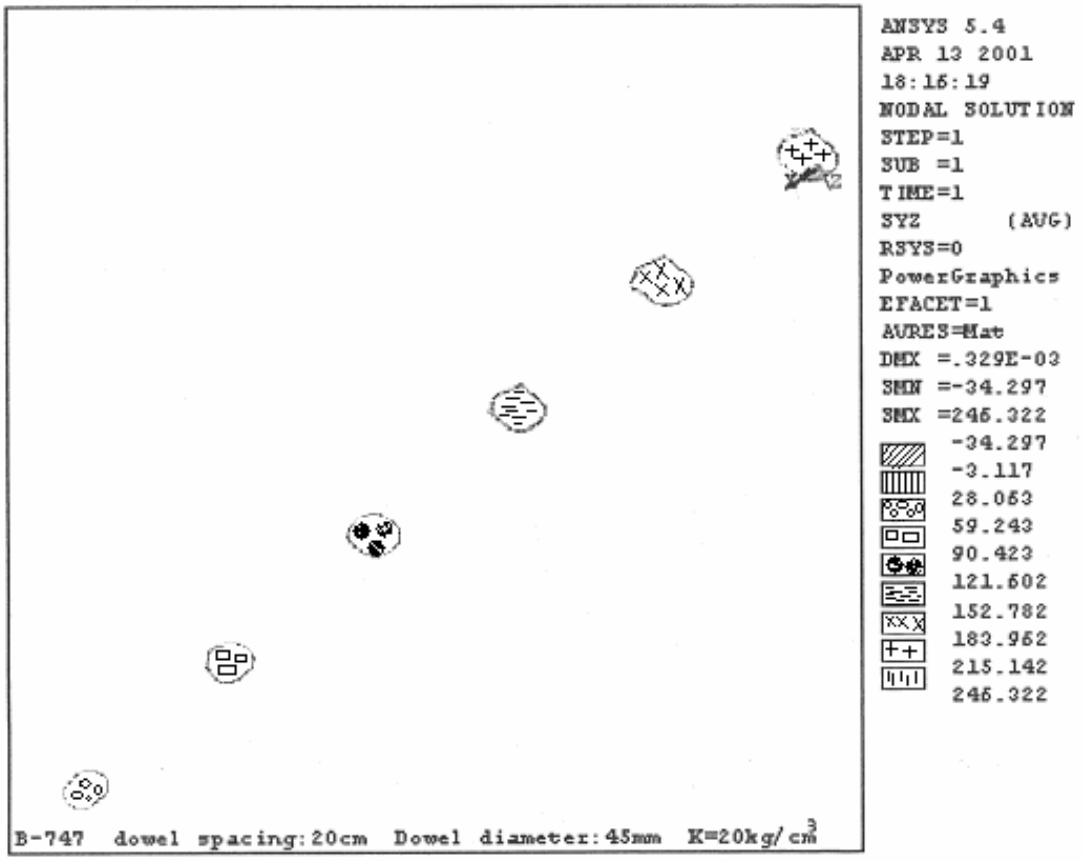
برای مقطع مورد بررسی در بخشهای قبلی ـ که در آن ضریب ارتجاعی بتن برابر $۲/۸ \times ۱۰^۵$ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع، ضخامت دال برابر ۴۰ سانتیمتر، ضریب تصحیح شده عکس‌العمل خاک بستر برابر ۱۳ کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب و ضریب پواسن برابر ۰/۱۵ است ـ با استفاده از رابطه (۳) مقدار شعاع سختی نسبی برابر است با:

L =۱۰۴ سانتیمتر

شکل ۱۸ تنشهای برشی موجود در مقطع عرضی داولها را برای مقطع فوق نشان می‌دهد.

1. Friberg

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱۸ تنشهای برشی در مقطع عرضی داولها

با توجه بـه شـکل ۱۸ طـول محـدوده ای کـه در آن داولها تحت برش قرار گرفته‌اند، ۱۲۰ سـانتیمتری اسـت که حدودا برابر ۱/۱۵ برابر شعاع سختی نسبی است.

همانطور که بررسی مدل مورد استفاده در این مقاله نشان می‌دهد، فاصلهٔ برش صفر از محل تأثیر بار، برابر ۱/۱۵L است. مطالعات المان محدود انجام شده توسط هینریچس[1] و دیگران [۵] بر روی دال بتنی، نشان می‌دهد که حداکثر لنگر خمشی یا به بیان دیگر نیروی برشی صفر، در فاصلهٔ L از محل تأثیر بار به وجود می‌آید که تقریبا با نتایج حاصل در این تحقیق منطبق است. به عبارت دیگر فرض ۱/۸L مورد استفاده در آیین‌نامه انستیتو سیمان پرتلند، منجر به مقدار کمتری برای برش حداکثر می‌شود، که در نزدیکترین داول به محل بار ایجاد می‌گردد. البته اندازه‌گیری دقیق نیروی برشی در داولها می‌تواند به تعین دقیق آن کمک کند.

۷- طراحی داولها

با استفاده از نتایج تحلیل این تحقیق، جداولی بـه منظـور طراحـی داولهـا بـرای بارگـذاری هواپیماهـای مختلـف، ضخامتهای مختلف دال بتنی و مقاومتهای مختلف خـاک بستر ارائه شده که نمونـه ای از آنهـا در جـدول ۶ آورده شده است.

۸- نتیجه‌گیری

- انطباق قابل قبول نتایج تحلیل اجزای محدود بـر نتـایج اندازه‌گیری در مطالعه موردی فرودگاه دنور، بیانگر این است که با دقت قابل قبولی می‌توان رفتار روسـازیهای بتنی را به این روش پیش‌بینی کرد.

1. Heinrichs

Archive
www.SID.ir

جدول ۶ طراحی داول برای دال ۴۰ سانتیمتری و داولهای با فواصل ۲۰ سانتیمتر و بارگذاری بوئینگ۷۴۷

طول داول (سانتیمتر)	قطر داول (میلیمتر)	مدول عکس‌العمل بستر (کیلو گرم بر سانتیمتر مربع)
۵۰	۳۵	۲
۵۰	۳۵	۵
۵۰	۴۰	۱۰
۶۰	۴۵	۱۵
۶۰	۴۵	۲۰
۶۰	۵۰	۲۵

- مطالعات مربوط به تأثیر طول داول بر کارایی درز نشان می‌دهد که با افزایش طول داول، کارایی درز نیز افزایش می‌یابد به نحوی که در یک طول معین این کارایی به حداکثر ممکن رسیده و پس از آن ثابت می‌ماند. بنابراین طول مورد نظر را می‌توان به عنوان طول بهینهٔ داول برای بارگذاری اعمال شده، در نظر گرفت. در بخش طراحی داول، این طول بهینه برای بارگذاری‌های مختلف ارائه شد. نتیجه دیگر مطالعات این بخش این است که طول بهینه داول در حالت لغزندگی بین دال، داول و بستر کمی‌بیشتر از طول مورد نیاز در حالت لغزندگی بین دال و داول است.
- در قسمت بررسی اثر متقابل کارایی درز و چگونگی تماس سه جزء روسازه، این نتیجه به‌دست آمد که استفاده از مادهٔ کاهش دهندهٔ اصطکاک بین دال بتنی و بستر، افزایش کارایی درز تا ۱۵ درصد را سبب می‌شود.
- مطالعات مربوط به تأثیر عرض درز بر انتقال بار از طریق داول‌ها نشان می‌دهد که افزایش عرض درز، کارایی درز را کاهش می‌دهد. بنابراین توصیه می‌شود که اگر از نظر اجرایی امکان پذیر باشد، حداقل عرض درز به دست آمده از رابطهٔ (۲)، افزایش داده نشود.
- نتایج تحلیل نشان می‌دهد که برش صفر در فاصلهٔ ۱/۱ از محل تأثیر بار به دست می‌آید که منطبق است با نتایج تحقیق هینریچس و دیگران [۵]. این کمتر از مقداری است که در روش انستیتو سیمان پرتلند در نظر گرفته می‌شود (L ۱/۸). لذا روش انستیتو سیمان پرتلند، مقدار کمتری را برای حداکثر برش در داولها ارائه می‌دهد. توصیه می‌شود که با اندازه‌گیری دقیق، مقدار این برش تعین شود.

۹- منابع

[1] Harrison, A. and Barker, W.R. "Comparison of Elastic Layered Theory and In-Situ Rigid Pavement Response at Denver International Airport";Air Craft Pavement Technology In the Midst of Change; ASCE;Washington; 1997; pp 61-76.

[2] Darter, M.I and Barenberg, E.J. () "Design of Zero-Maintanence Plain Jointed Concrete Pavement"; Report No. FHWA-RD-77-111, Vol. 1; Federal Highway Administration; 1977.

[3] Friberg, B.F. "Design of Dowels in Transverse Joints of Concrete Pavement" Transaction ASCE Vol. 105; 1940; pp1076-1095.

[4] PCA; "Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavement"; Portland Cement Association.; 1984.

[5] Heinrichs, K.W., Liu, M.J.,. Darter, M.I., Carpenter, S.H., Ioannides, A.M.; "Rigid Pavement Analysis and Design"; Report No. FHWA-RD-88-068, Federal Highway Administration; 1989.

Archive of SID
www.SID.ir