تاثیر کاربرد پد زیر تراورس و پد زیر ریل بر روی رفتار خط ریلی بالاستی در محل پل‌های دهانه کوتاه خطوط ریلی

مقاله علمی – پژوهشی

حمید رضا حیدری نوقابی*، استادیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران
علی‌رضا قاری قرآن، استادیار، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
علی معینی کربکندی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: h_heydari@iust.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۵– پذیرش: ۱۴۰۲/۱۰/۲۵
صفحه ۱۷۲-۱۵۹

چکیده

تغییر ناگهانی و غیر یکنواخت سختی قائم خط ریلی در محل پل‌های خطوط ریلی، موجب افزایش بارهای دینامیکی، تغییرشکل نامتقارن، آسیب دیدن اجزاء خط و در نتیجه افزایش هزینه‌های نگهداری می‌گردد. بعنوان یک راهکار جهت کاهش این اثرات منفی، استفاده از پد زیر تراورس و پد زیر ریل باعث کاهش سختی و مدول بستر خط ریلی در روی عرشه پل شده و در نهایت تغییرات دینامیکی در محل خط بالاستی و عرشه پل را کاهش خواهد داد. جهت بررسی این موضوع یک مدل اجزاء محدود از خط ریلی بالاستی و پل بتنی دهانه کوتاه با در نظر گرفتن اجزای روسازی و زیرسازی ایجاد و اعتبارسنجی شد تا تاثیر استفاده از پدهای ارتجاعی (پد زیر تراورس و پد زیر ریل) در روی عرشه پل از منظر معیارهای مختلف استاتیکی و دینامیکی مورد ارزیابی قرار گیرد. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از پد زیر تراورس در روی عرشه باعث بهبود ۲۰ ، ۷ و ۹ درصدی رفتار خط ریلی به ترتیب از منظر تغییرمکان قائم ریل، تنش لایه بستر و شتاب قائم دینامیکی ریل در محل پل‌های دهانه کوتاه خواهد شد. همچنین در صورت استفاده ترکیبی از روش تقویت خاکریز به همراه پدهای ارتجاعی زیر ریل در روی عرشه، رفتار خط ریلی را از نظر تغییرمکان قائم ریل، تنش نرمال لایه بستر و شتاب قائم ریل به ترتیب حدوداً ۳۱، ۲۴ و ۳۴ بهبود یافته است.

واژه‌های کلیدی: پد زیر تراورس، پد زیر ریل، تحلیل دینامیکی خطوط ریلی، مدل‌سازی اجزاء محدود، ناحیه انتقال پل

۱- مقدمه

به دلیل تغییرات ناگهانی سختی قائم خط در ناحیه انتقال، اجزاء خط ریلی در این نواحی تنش بیشتری را متحمل می‌شوند و از این رو تعمیر و نگهداری بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند (Hsi, 2008). وقتی قطار از روی یک خط بالاستی به روی سازه‌ای سخت همچون پل‌ها حرکت می‌کند به علت تغییرات ناگهانی و غیریکنواخت سختی قائم خط، بار دینامیکی چرخ افزایش یافته و در نتیجه نرخ خرابی و نشست نسبی بین خاکریز و سازه بیشتر می‌شود و این شرایط نیز باعث اختلاف ارتفاع در تراز طولی خط ریلی شده و افزایش نیروهای اندرکنشی بین چرخ و ریل را به همراه دارد (David, Li, 2006) و این روند تا زمانی که تعمیر و نگهداری انجام نشود، ادامه خواهد یافت. ناحیه انتقال یکی از منابع اصلی خرابی‌های هندسی خط ریلی است و در هلند تخمین زده شده که هزینه‌های تعمیر و نگهداری ناحیه انتقال ۲ تا ٤ برابر بیشتر از یک خط‌آهن عادی

است (Holscher, Meijers, 2007). بر اساس مطالعات Sasaoka and Davies (2005) حدود ۲۰۰ میلیون دلار سالانه در خطوط راه‌آهن امریکا برای تعمیر و نگهداری ناحیه انتقال هزینه می‌شود و این در حالی است که در اروپا سالانه ۸۵ میلیون یورو هزینه می‌شود (Hyslip, Li, McDaniel, 2009). برای رفع مشکلات مذکور در نواحی انتقال و داشتن بهره برداری مناسب و ایمن، انتقال سختی و انتقال تغییر مکان مطلوب امری ضروری به نظر می‌رسد. یکی از روش‌های انتقال سختی خط بین خطوط ریلی بالاستی و پل‌ها استفاده از المان‌های ارتجاعی و نرم کننده سختی روی عرشه پل است. از مهم ترین این المان‌ها پدهای زیر تراورس (Under Sleeper Pad-USP) و پدهای ارتجاعی زیر ریل است. در این روش سختی و مدول بستر خط در روی عرشه کاهش یافته و در نهایت اختلاف تغییرمکان قائم بین خط بالاستی و عرشه پل کاهش می‌یابد. برای بررسی و ارزیابی این روش حالت‌های مختلف آن مورد ارزیابی قرار گرفته تا بهترین و موثرترین حالت آن مشخص شود.

۲-پیشینه تحقیق

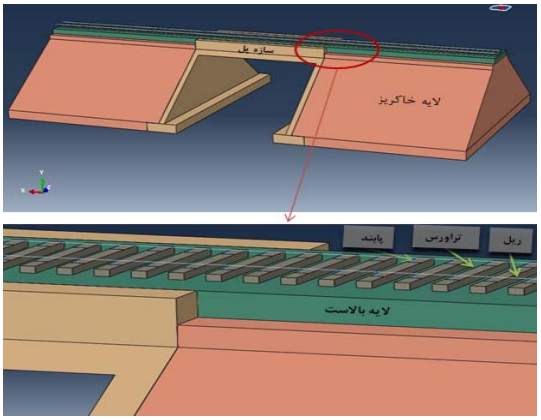
محققان متعددی تاثیر تغییرات سختی روی نیروهای اندرکنشی چرخ و ریل و سایر مسائل مرتبط در نواحی انتقال را بررسی کرده‌اند (Paixao, Fortunato and Calcada,2015 – Coelho et al,2015- Zhang, Burrow and Zhou, 2015). نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که در نواحی انتقال افزایش سرعت و وجود بستر با خاک‌های نرم و ایجاد نشست دائمی ناگهانی باعث افزایش نیروهای اندرکنشی خط و قطار شده و تاثیر بسیاری روی ارتعاشات خط می‌گذارد. الگوی انتقال سختی خط، تاثیر بسیاری روی رفتار دینامیکی خط و قطار دارد و توزیع سختی ملایم خط می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای نیروهای اندرکنشی چرخ و ریل و شتاب قائم ریل را کاهش دهد. با این حال روی شتاب قائم قطار به خاطر وجود سیستم تعلیق اولیه و ثانویه مناسب اثر زیادی ندارد. ایجاد تغییرمکان قائم یکنواخت ریل در طول ناحیه انتقال و در غیر این صورت جلوگیری از ایجاد تغییر مکان ناگهانی و داشتن تغییرات تدریجی سختی و تغییرمکان در طول خط دو اصل اساسی برای یک ناحیه انتقال مناسب است. (2001) Kerr and Bathurs و (2009) (Hyslip, Li, McDaniel) به منظور رفتار دینامیکی مناسب خط ریلی در ناحیه انتقال ایجاد کاهش سختی خط در محل سازه سخت و استفاده از پدهای نرم در زیر خط ریلی در روی سازه‌های سخت (عرشه پل) را توصیه کرده‌اند به نحوی که میزان سختی و تغییرمکان خط روی سازه (قسمت سخت) و خط بالاستی یکنواخت شود که در این صورت هیچ گونه انتقالی دیگر نیاز نخواهد بود. همچنین در همین راستا مطالعات مختلفی تاثیر کاربرد پد زیر ریل و پد زیر تراورس روی نیروهای دینامیکی اندرکنش خط و قطار و سایر پارامترها را بررسی کرده است (Sasaoka,Davies, 2005 - Varandas,2013- Ricardo et al.,2012- Nicks, 2009- Alejandro et al.,2010). نتایج نشان می‌دهد که پدهای زیر تراورس، تاثیر مناسب روی رفتار دینامیکی خط ریلی و افزایش انعطاف پذیری قائم خط ریلی دارد و نرخ خرابی و تعداد عملیات‌های تعمیر و نگهداری را کاهش داده و باعث میرا شدن نیروهای اندرکنشی خط- قطار در محل خط بالاستی می‌شود. البته برای بهره‌مندی از مزایای پدهای زیر ریل، طراحی مناسب آن امری مهم است و اگر مشکلات ناحیه انتقال مرتبط با تغییرات سختی خط باشد استفاده از پد زیر ریل نرم روی قسمت سخت سازه بسیار موثر و مفید است و همچنین Varandas (2013) با توجه به شبیه‌سازی دینامیکی سیستم بستر- خط و قطار بیان می‌کند که دال دسترسی بتنی به تنهایی به عنوان ناحیه انتقال کارآیی مطلوبی ندارد لذا استفاده از پد زیر ریل روی سازه به همراه دال دسترسی توصیه شده است.

همچنین در مطالعاتی (Bronsert and et al,2013),(Chen et al., 2016) و (معینی کربکندی،۱۳۹٤) مشخص شد که به طور جداگانه هر کدام از روش‌های اصلاحی و ناحیه انتقال مزایایی دارند ولی ترکیب استفاده از خاکریز تثبیت شده به همراه استفاده از پدهای ارتجاعی مناسب‌تر است.

۳- مدل سازی و اعتبار سنجی

مدل ۳ بعدی ایجاده شده به صورت المان محدود و در محیط نرم افزار ABAQUS استاندارد انجام شده است. مدل مورد نظر شامل خط ریلی بالاستی، پل و بستر خاکی است که پل مورد نظر از نوع پورتال فریم است که معمولاً در محل عبور خط راه آهن از روی جاده‌های باریک ساخته می‌شوند. نمونه‌ای از این پل‌های پرکاربرد در کشور سوئد و مدل اجزاء محدود آن به ترتیب در شکل (۱) و (۲) نشان داده شده است (Kylen, 2010). در جدول (۱) خواص مکانیکی اجزاء به کار رفته در مدل‌سازی با توجه به مراجع مختلف ارائه شده است.

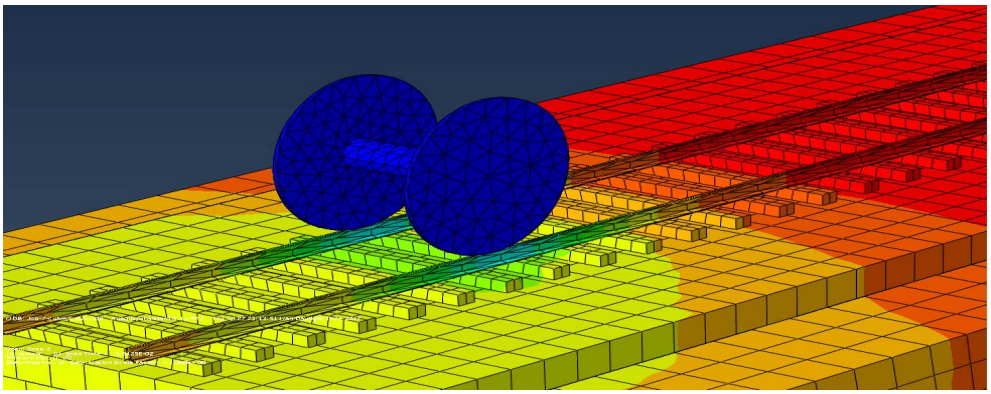
شکل ۱. نمونه‌ای از پل پورتال فریم در سوئد (Kylen, 2010)



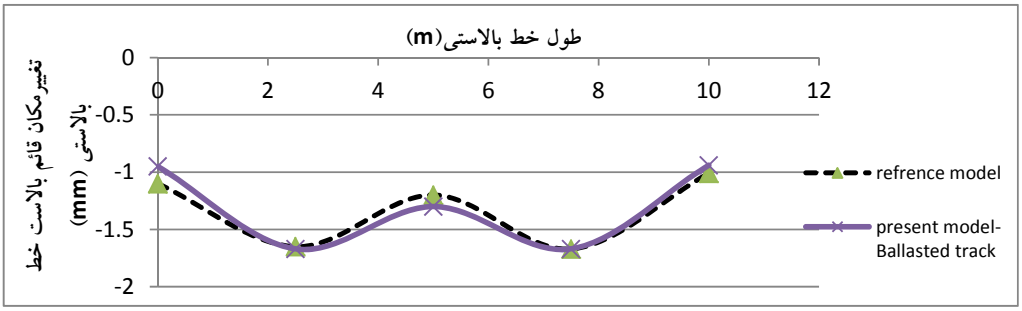
شکل ۲. مدل اجزاء محدود خط ریلی بالاستی و پل دهانه کوتاه

جدول ۱. خواص مکانیکی اجزا به کار رفته در مدل سازی

اجزای مدل	مدول الاستیسیته (E) مگاپاسکال	ضریب پواسون	دانسیته کیلوگرم بر متر مکعب
ریل (Alejandro et al, 2010)	۲۰۰۰۰۰	۰/۳	۷۸۵۰
تراورس (Kylen, 2010)	۲۰۰۰۰	۰/۲۵	۲۵۰۰
بالاست (Bronsert et al, 2013)	۲۰۰	۰/۲	۱۹۰۰
بتن پل (Kylen, 2010)	۲۰۰۰۰	۰/۲	۲۵۰۰
بستر- خاکریز (Kylen, 2010)	۶۰	۰/۱	۱۷۰۰



شکل ۳. نحوه‌ی اعمال بارگذاری با مدل سازی یک محور واگن



شکل ٤. اعتبارسنجی خط بالاستی و محدوده ناحیه انتقال

طول کل مدل شامل خط بالاستی و سازه پل، ٥٦/٤ متر است و ریل به صورت المان تیری اولر – برنولی و دارای سطح مقطع مشابه ریلUIC60 در نظرگرفته شده است. همچنین ابعاد تراورس بتنی ۱۵ در ۲۵ سانتی‌متر و به طول ۲/۵ متر و فاصله بین تراورس‌ها ٦۰ سانتی‌متر است. لایه بالاست دارای ضخامت ٦۰ سانتی‌متر و عرض ٦ متر بوده و لایه خاکریز به ضخامت ۷ متر با مصالح یکنواخت مدل شده و دهانه پل ۱۵ متر است. در مدل‌های ایجاد شده اندرکنش بین سطوح مختلف مطابق با مراجع (Kylen, 2010- Coelho,2010) با قید tie تعریف شده است و در پایین‌ترین قسمت مدل‌سازی از شرایط تکیه گاهی کاملاً گیردار برای پایدار کردن مدل‌سازی استفاده شده است. برای بارگذاری مدل سازی های ایجاده شده از بار یک محور قطار سریع السیر با بار محوری ۱۸ تن و سرعت عبوری ۳۰۰ کیلومتر بر ساعت مطابق شکل (۳) استفاده شده و برای اعتبارسنجی مدل‌سازی انجام شده از نتایج مطالعات Feng (2011) استفاده شده است. شکل (٤) مقدار تغییرمکان وسط لایه بالاست را برای خط بالاستی و محدوده ناحیه انتقال تحت بار بحرانی ناشی از ۲ واگن با بار محوری ۲۲ تن را نشان می‌دهد. نتایج بیان می‌دهد که خطای مدل سازی کمتر از ۳ درصد می باشد.

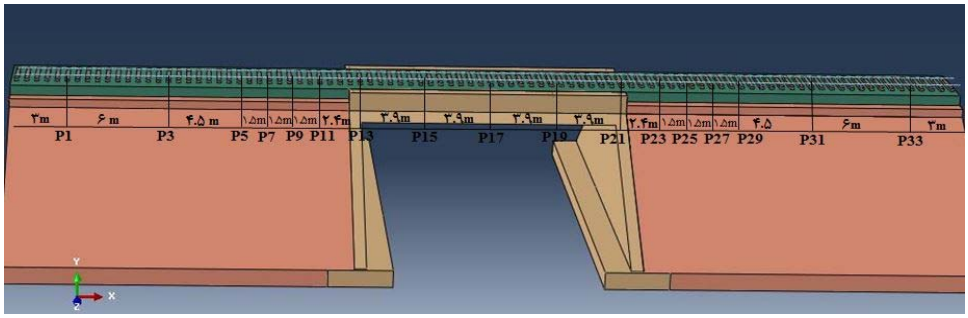
٤- بررسی کاربرد پد زیر تراورس به عنوان کاهش دهنده‌ی سختی خط در روی عرشه پل دهانه کوتاه

یکی دیگر از روش‌های انتقال سختی قائم بین خطوط ریلی بالاستی و پل‌ها استفاده از المان‌های ارتجاعی و نرم کننده سختی روی عرشه پل است. از مهم ترین این المان‌ها پدهای زیر تراورس یا همان **USP** است. در این روش با توجه به اینکه تغییرمکان خط ریلی در محل نواحی انتقال و خط بالاستی نسبت به خط ریلی روی عرشه پل بیشتر است، استفاده از پدهای زیر تراورس باعث می‌شود که سختی و مدول بستر خط روی عرشه کاهش یابد و در نتیجه تغییرمکان قائم خط ریلی روی عرشه پل بیشتر شود و در نهایت اختلاف تغییرمکان قائم بین خط بالاستی و عرشه پل کاهش یابد. حالت‌های مختلف این روش از منظر تغییرمکان قائم استاتیکی ریل و لایه بالاست، مقدار تنش استاتیک در بستر، تغییرمکان قائم دینامیکی ریل و شتاب قائم ریل ارزیابی شده است تا بهترین و موثرترین حالت آن مشخص شود. برای ارزیابی معیارهای مختلف از میانگین اختلاف داده‌ها در دو حالت وجود پدهای زیر تراورس و حالت عدم وجود پد استفاده شده است. برای این منظور کاهش تغییرمکان در روی خط بالاستی و افزایش تغییرمکان خط ریلی در روی عرشه تا حد مجاز، عاملی مثبت برای تعیین تاثیر و عملکرد حالت‌های کاربرد پد زیر تراورس هستند. در شکل (۵) موقعیت نقاط مورد بررسی که در سطح ریل و وسط لایه بالاست هستند و مقادیر آن‌ها برای پارامترهای مختلف تعیین می‌شود نشان داده شده است.

جزئیات حالت‌های مورد ارزیابی کاربرد پدهای زیر تراورس در روی عرشه پل در جدول (٤) با توجه به مطالعات ارائه شده است.

(Ricardo et al.,2012- Alejandro et al., 2010)

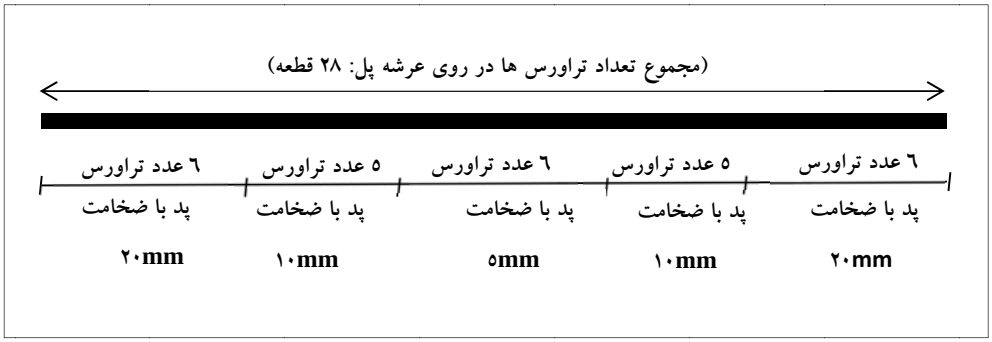
در شکل‌های (٦) و (۷) دو حالت آخر مذکور در جدول (٤) که ترتیب قرار گرفتن پدهای زیر تراورس با ضخامت و مدول الاستیسیته متفاوت می‌باشد را نشان می‌دهد. مطابق است. همچنین در شکل (۸) و (۹) موقعیت پد زیر تراورس مدل‌سازی شده در روی عرشه پل و نحوه قرارگیری آن در خط ریلی نشان داده شده است. در شکل‌های (۱۰) تا (١٤) به ترتیب تغییرمکان قائم استاتیکی ریل، تغییرمکان قائم استاتیکی وسط لایه بالاست، تنش نرمال استاتیک در لایه بستر، تغییرمکان قائم دینامیکی ریل و شتاب قائم ریل برای حالت‌های مختلف کاربرد پد زیر تراورس نشان داده شده است.



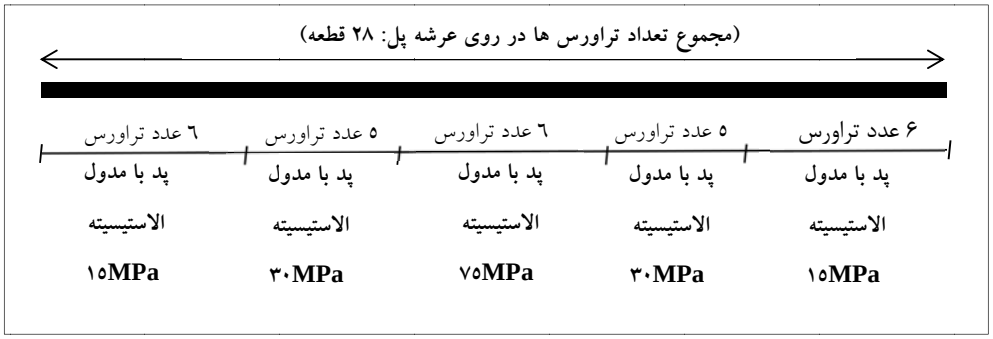
شکل ۵. موقعیت نقاط مورد بررسی در وسط لایه بالاست و در سطح ریل

جدول ٤. جزئیات حالت‌های مورد ارزیابی کاربرد پدهای زیر تراورس در روی عرشه پل

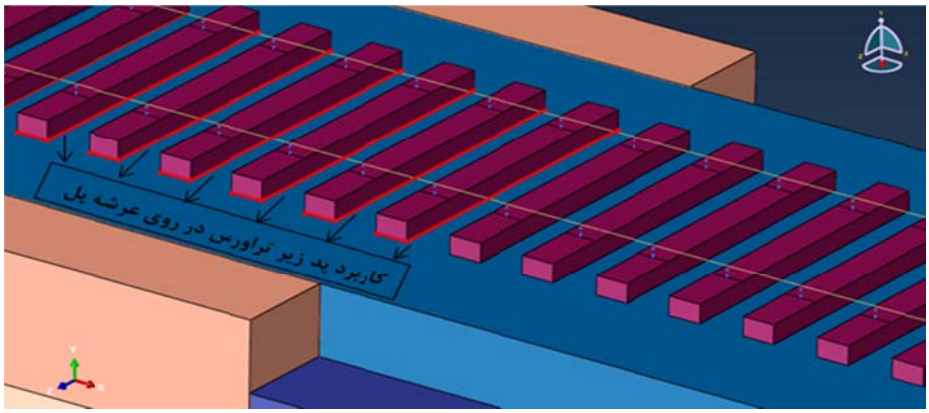
حالت	مشخصات
N,sleeper=3	استفاده از پد زیر تراورس برای ۳ عدد تراورس ابتدایی و انتهایی عرشه با مدول الاستیسیته ۱۵ مگاپاسکال
N,sleeper=6	استفاده از پد زیر تراورس برای ٦ عدد تراورس ابتدایی و انتهایی عرشه با مدول الاستیسیته ۱۵ مگاپاسکال
N,sleeper=9	استفاده از پد زیر تراورس برای ۹ عدد تراورس ابتدایی و انتهایی عرشه با مدول الاستیسیته ۱۵ مگاپاسکال
N,sleeper=All	استفاده از پد زیر تراورس برای تمامیتراورس‌های روی عرشه (۲۸ عدد) با مدول الاستیسیته ۱۵ مگاپاسکال
Different-H-USP	استفاده از پد زیر تراورس برای تمامی‌تراورس‌های روی عرشه (۲۸ عدد) با مدول الاستیسیته ۳۰ مگاپاسکال و ۳ نوع ضخامت متفاوت مطابق شکل (٦)
Different-E-USP	استفاده از پد زیر تراورس برای تمامی‌تراورس‌های روی عرشه (۲۸ عدد) با ۳ مقدار مدول الاستیسیته متفاوت و ضخامت یکسان مطابق شکل (۷)



شکل ٦. جزئیات تغییرات ضخامت پد در روش استفاده از پد زیر تراورس بر روی عرشه

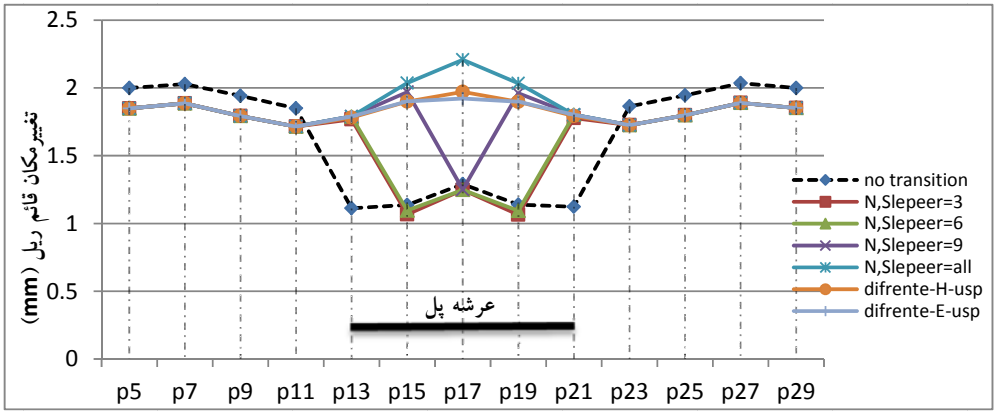


شکل ۷. جزئیات تغییرات سختی پد در روش استفاده از پد زیر تراورس بر روی عرشه

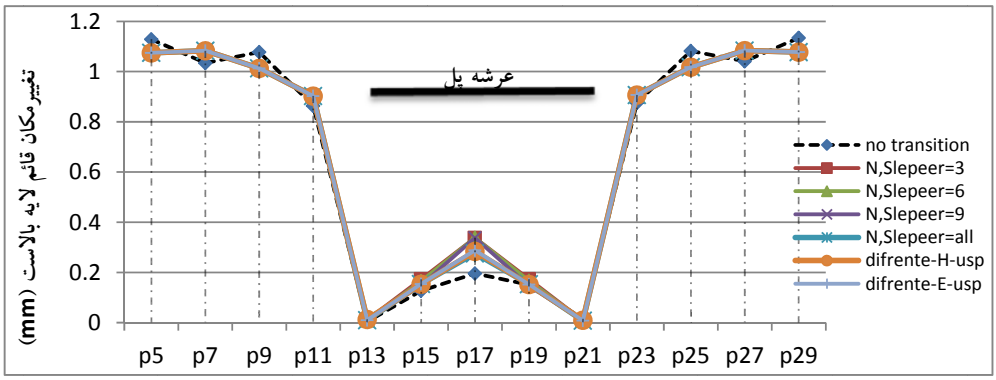


شکل ۸. موقعیت استفاده از پد زیر تراورس در روی عرشه پل مدل

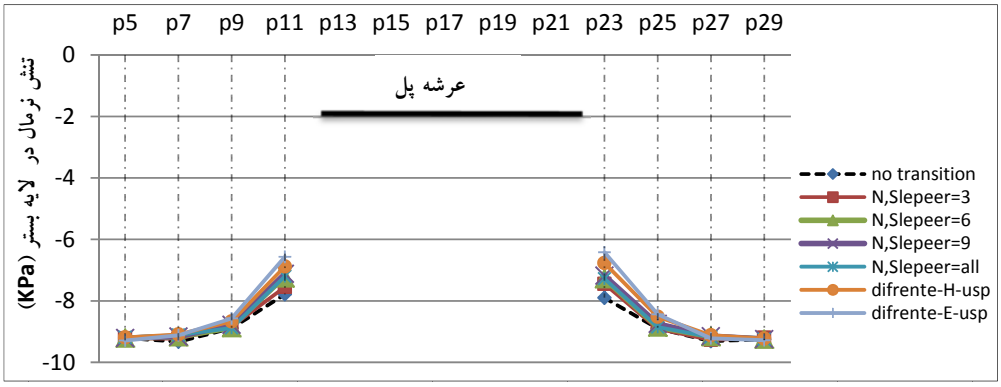
شکل ۹. نحوه قرارگیری پد زیر تراورس در خط ریلی (**Getzner**)



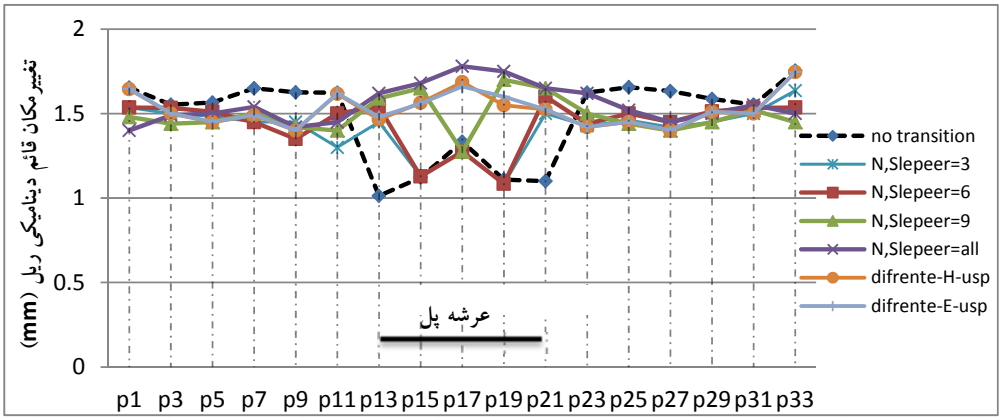
شکل ۱۰. تغییرمکان قائم استاتیکی ریل برای حالت‌های مختلف کاربرد پد زیر تراورس در روی عرشه



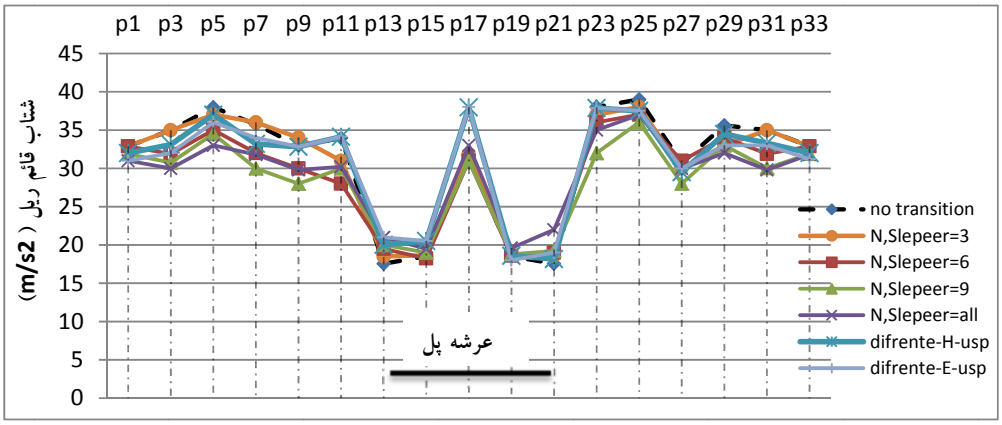
شکل ۱۱. تغییرمکان استاتیکی لایه بالاست برای حالت‌های مختلف کاربرد پد زیر تراورس در روی عرشه



شکل ۱۲. تنش نرمال استاتیک در لایه بستر برای حالت‌های مختلف پد زیر تراورس در روی عرشه



شکل ۱۳. تغییرمکان قائم دینامیکی ریل برای حالت‌های مختلف کاربرد پد زیر تراورس در روی عرشه



شکل ۱۴. تغییرمکان قائم دینامیکی ریل برای حالت‌های مختلف کاربرد پد زیر تراورس در روی عرشه

بر اساس شکل (۱۰) و (۱۳) مشخص است که وجود پدهای زیر تراورس باعث افزایش تغییرمکان قائم ریل برای نقاط روی عرشه می‌شوند و همچنین حالت‌هایی که از تعداد محدودی پد زیر تراورس در طرفین عرشه پل استفاده شده مثل ۳، ۶ و ۹ عدد پد زیر تراورس عملکرد مناسب یکنواختی روی انتقال تدریجی سختی ندارند. مواقعی که از یک نوع پد با سختی یکسان برای تمامی تراورس‌های روی عرشه استفاده شود باعث افزایش بیش از حد تغییرمکان قائم ریل در وسط دهانه پل شده و این حالت نیز خیلی موثر نیست ولی مشخص است حالت‌هایی که در آن برای تمامی تراورس‌های روی عرشه از پد زیر تراورس با مدول الاستیسیته و یا ارتفاع متفاوت استفاده شده که در واقع بیانگر سختی متفاوت هستند بهترین تاثیر و عملکرد برای خط ریلی از نظر تغییرمکان قائم ریل فراهم شده است. در این حالت خط ریلی در روی عرشه و در خط بالاستی دارای تغییرمکانی بین ۱/۷ تا ۱/۹ میلی‌متر است. این در حالی است که در حالتی که هیچ‌گونه روش انتقالی وجود ندارد اختلاف تغییرمکان قائم ریل یا همان نشست نسبی بین خط ریلی بالاستی و عرشه پل در حدود ۰/۸ میلی‌متر است. با توجه به شکل (۱۱) پد زیر تراورس تاثیر بسیار کمی روی کاهش تغییرمکان قائم لایه بالاست دارد. همچنین شکل (۱۲) نشان می‌دهد که پد زیر تراورس مقادیر تنش در نقاط نزدیک به کوله‌های پل (ناحیه انتقال) را کمی کاهش داده و روی نقاط دیگر تاثیرگذار نمی‌باشد. در جدول (۵) ارزیابی تاثیر حالت‌های مختلف کاربرد پد زیر تراورس در روی عرشه پل ارائه شده است.

جدول ۵. ارزیابی تاثیر حالت‌های مختلف کاربرد پد زیر تراورس در روی عرشه پل

حالت‌های مختلف پد زیر تراورس	ارزیابی تاثیر کاربرد پد زیر تراورس بر اساس معیار (بر حسب درصد)				
	تغییرمکان قائم استاتیکی ریل	تغییرمکان قائم استاتیکی بالاست	کاهش تنش نرمال استاتیکی در لایه بستر	شتاب قائم ریل	تغییرمکان قائم دینامیکی ریل
N,sleeper= 3	+۱۲/۳٤	+٥/۳۹	+٤/۰٤	+۳/۸۹	+۹/۲٤
N,sleeper= 6	+۱۳/۰٤	+٥/۲۸	+٤/٦۸	+٥/۲۸	+۱۰/۰٤
N,sleeper= 9	+۱۳/۳٦	+٥/۰۷	+٥/۰٤	+٦/۰۷	+۱۱/۳٦
N,sleeper= All	+۹/۲۷	+٤/٦۲	+٤/٥۱	+٤/٦۲	+۸/۲۷
Different-H-USP	+۱۹/۹۸	+٤/٦۷	+٦/۷۲	+۸/٦۷	+۱٥/۹۸
Different-E-USP	+۱۹/٤٦	+٤/۷۰	+۷/٦٥	+۹/۱۱	+۱٦/٤٦

توجه در مقادیر جدول فوق نشان می‌دهد که از نظر تغییرمکان قائم استاتیک و دینامیک ریل حالتی که در آن برای تمامی‌تراورس‌ها از پد زیر تراورس با مدول الاستیسیته متفاوت و یا ضخامت متفاوت استفاده شود بهترین عملکرد مشاهده می‌شود. با توجه با اینکه سختی المان ها با مقدار مساحت و مدول الاستیسیته رابطه مستقیم و با مقدار ضخامت (طول) رابطه عکس داشته لذا در حالتی که ضخامت پدها در طول عرشه کاهش می‌یابد یا مدول الاستیسیته پد زیاد می‌شود با افزایش تدریجی سختی روبه رو هستیم. برای حالت‌های Different-H-USP و Different-E-USP تغییرمکان قائم استاتیک و دینامیک ریل به ترتیب تقریباً ۲۰ و ۱٦ بهبود یافته است. همچنین برای حالت‌های مختلف پد زیر تراورس میزان کاهش تغییرمکان قائم لایه بالاست و تنش استاتیک در لایه بستر به ترتیب در حدود ٥ و ۷ درصد است. در واقع وجود پد زیر تراورس باعث جذب و میرا نمودن تنش های انتقالی از تراورس به بالاست شده و روی توزیع یکنواخت تر تنش در لایه بالاست موثر بوده که در نهایت منجر به کاهش تغییرمکان قائم لایه بالاست خواهد شد. همچنین مشخص میشود به علت اینکه پدها فقط برای تراورس روی عرشه استفاده می‌شوند تنها در نقاط نزدیک کوله‌های پل تاثیرگذار هستند و تاثیر کمیبر کاهش تنش نرمال در لایه بستر و خاکریز ناحیه انتقال دارند. از طرفی مشخص می‌شود که حدوداً ٪ ۹ شتاب قائم دینامیکی ریل را کاهش داده است در واقع استفاده از پدهای زیر تراورس با سختی متغیر از یک سو تاثیر مثبت و مطلوبی روی کاهش نشست نسبی ریل در ناحیه انتقال دارند ولی چون تغییرمکان ریل در روی پل را افزایش می‌دهند در نهایت شتاب ریل را به مقدار کمی کاهش خواهد داد. در نهایت بهترین حالت برای این روش انتقال سختی، موقعی است که برای تمامی‌تراورس روی عرشه از پدهای زیر تراورس با ضخامت و یا مدول الاستیسیته مختلف مطابق شکل (٦) و (۷) که در واقع استفاده از پد زیر تراورس با سختی مختلف
می‌باشد استفاده شده است.

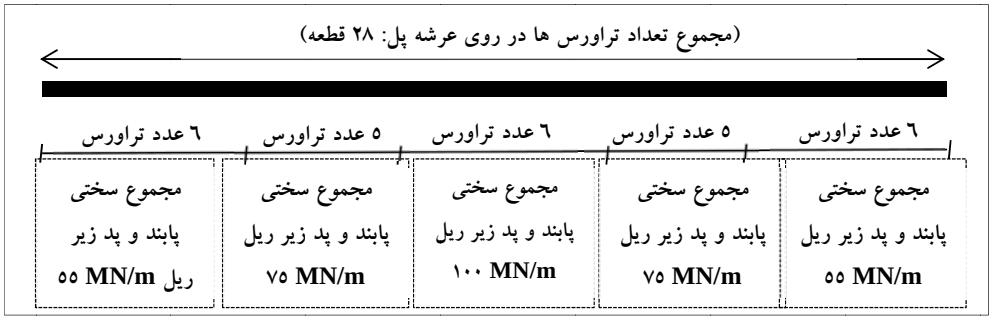
بررسی کاربرد پد زیر تراورس و پد زیر ریل در روی عرشه پل به همراه اصلاح خاکریز ناحیه انتقال به عنوان روش ترکیبی انتقال سختی خط

مطالعات متعددی نشان می‌دهد که استفاده تنها از یک روش انتقال سختی هم چون انتقال تدریجی سختی یا استفاده از پدهای ارتجاعی روی عرشه پل به منظور نرم کردن و کاهش سختی خط در روی پل بسیار موثر و مطلوب نیست (Varandas,2013- Bronsert et al, 2013) (معینی کربکندی، ۱۳۹٤). لذا معمولاً استفاده ترکیبی از روش‌های انتقال سختی شامل انتقال تدریجی سختی قائم خط به همراه استفاده از پدهای ارتجاعی برای نرم کردن سختی روی پل توصیه و پیشنهاد می‌شود. در این تحقیق نیز برای ارزیابی روش ترکیبی انتقال سختی که همزمان افزایش تدریجی سختی در قسمت بالاستی و کاهش آن در روی پل را داریم، از روش اصلاح و تثبیت خاکریز ناحیه انتقال در قبل و بعد از پل (پشت پل) برای افزایش تدریجی سختی و حالت‌های متعددی از کاربرد پدهای زیر تراورس و پدهای زیر ریل برای کاهش سختی در روی عرشه پل مورد بررسی قرار گرفته است. جزئیات حالت‌های مختلف مورد بررسی در جدول (۷) با توجه به مطالعات بیان شده است.
(Ricardo et al.,2012- Alejandro et al., 2010- Bronsert et al, 2013)

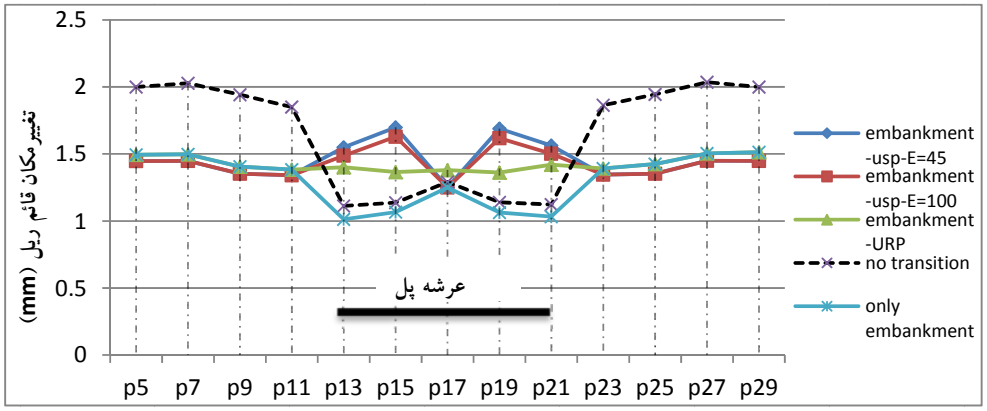
حالت embankment-URP ذکر شده در جدول (۷) که ترتیب قرار گرفتن پدهای زیر ریل با سختی‌های متفاوت را نشان می‌دهد مطابق آرایش شکل (۱٥) است.

جدول ۷. جزئیات حالت‌های مورد ارزیابی روش انتقال سختی ترکیبی

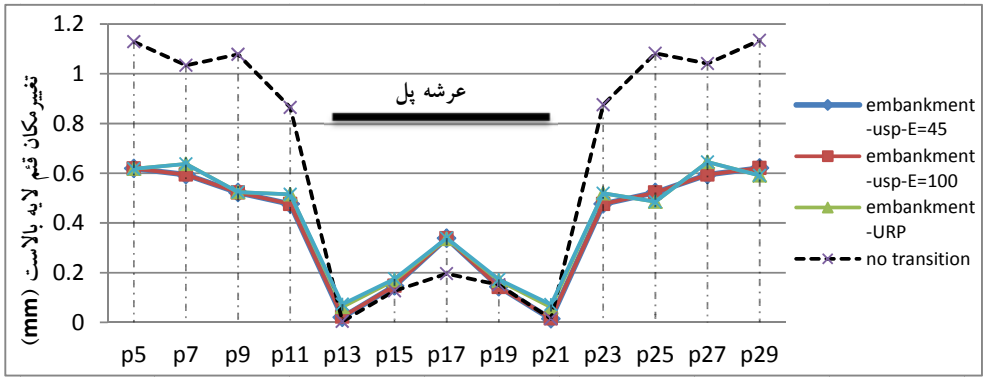
حالت	مشخصات
embankment-USP-E=45	خاکریز اصلاح شده به همراه استفاده از پد زیر تراورس برای ۹ تراورس ابتدایی و انتهایی عرشه با ضخامت ۵ میلی‌متر و مدول الاستیسیته ۴۵ مگاپاسکال
embankment- USP -E=100	خاکریز اصلاح شده به همراه استفاده از پد زیر تراورس برای ۹ تراورس ابتدایی و انتهایی عرشه با ضخامت ۵ میلی‌متر و مدول الاستیسیته مگاپاسکال
embankment-URP	خاکریز اصلاح شده به همراه استفاده از ۳ نوع پد زیر ریل با سختی متفاوت مطابق شکل (۱۵)
only embankment	تنها از خاکریز اصلاح شده برای مقایسه حالت‌های مختلف استفاده شده است.



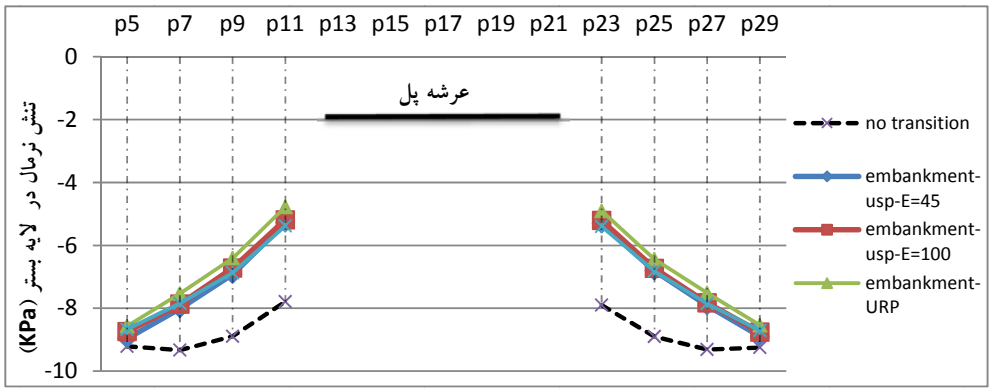
شکل ۱۵. جزئیات حالت embankment-URP در روش انتقال سختی ترکیبی



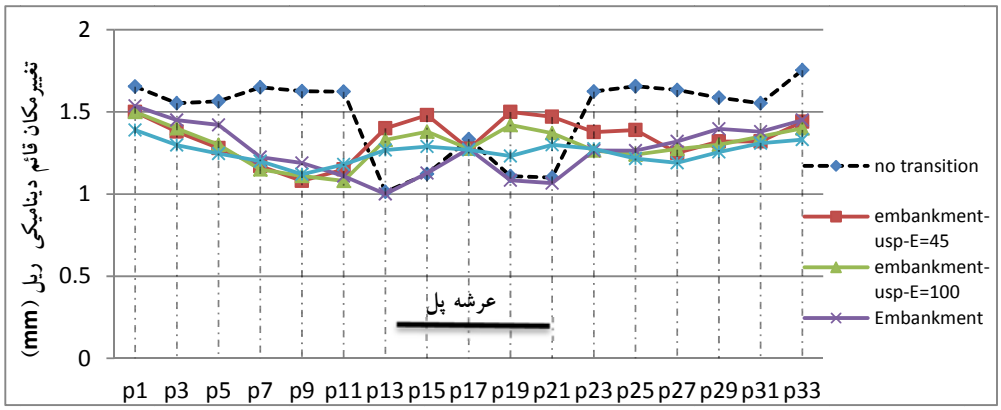
شکل ۱۶. تغییرمکان قائم استاتیکی ریل برای حالت‌های مختلف روش انتقال سختی ترکیبی



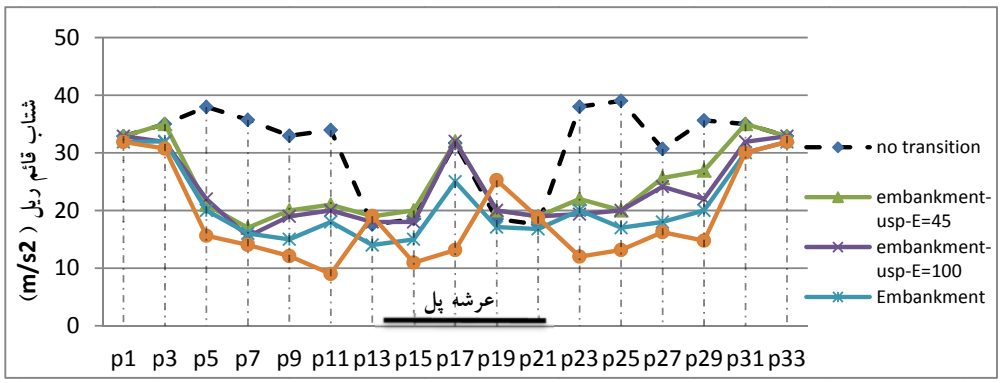
شکل ۱۷. تغییرمکان قائم استاتیکی لایه بالاست برای حالت‌های مختلف روش انتقال سختی ترکیبی



شکل ۱۸. تنش نرمال استاتیک در لایه بستر برای حالت‌های مختلف روش انتقال سختی ترکیبی



شکل ۱۹. تغییرمکان قائم دینامیکی ریل برای حالت‌های مختلف روش انتقال سختی ترکیبی



شکل ۲۰. شتاب قائم ریل برای حالت‌های مختلف روش انتقال سختی ترکیبی

در شکل‌های (۱۶) تا (۲۰) به ترتیب میزان تغییرمکان قائم استاتیکی ریل، لایه بالاست، تنش نرمال استاتیک در لایه بستر، تغییرمکان دینامیکی ریل و شتاب قائم ریل برای حالت‌های مختلف روش انتقال سختی ترکیبی نشان داده شده است. برای این منظور کاهش تغییرمکان در روی خط بالاستی و افزایش تغییرمکان خط ریلی در روی عرشه تا حد مجاز عاملی مثبت برای تعیین تاثیر و عملکرد حالت‌های روش انتقال سختی ترکیبی هستند. با توجه به شکل (۱۶) و (۱۹) مشخص است که در حالتی که از پدهای ارتجاعی زیر ریل با سختی متفاوت روی عرشه پل استفاده می‌شود تغییرمکان قائم ریل عملکرد مناسب و یکنواختی را در ناحیه انتقال خواهد داشت. همچنین در روش ترکیبی حالت‌هایی که شامل پدهای زیر تراورس هستند کارآیی مناسبی ندارند و باعث ایجاد تغییر مکان‌های نوسانی و افزایشی بیش از حد مجاز روی عرشه می‌شوند یعنی میزان سختی خط در روی عرشه را به مقدار زیادی کاهش داده و در نتیجه تغییرمکان بیشتر از حد مجاز خواهد شد. توجه در شکل (۱۷) نشان می‌دهد که از نظر تغییرمکان قائم لایه بالاست روش‌های انتقال سختی ترکیبی با روشی که تنها از خاکریز

اصلاح شده ناحیه انتقال استفاده شده نسبتاً مشابه همدیگر هستند و این نشان می‌دهد که استفاده از المان‌های ارتجاعی تاثیر کمی روی تغییرمکان لایه بالاست دارد. در جدول (۸) ارزیابی تاثیر حالت‌های مختلف کاربرد روش انتقال سختی ترکیبی ارائه شده است. توجه در مقادیر این جدول نشان می‌دهد که رفتار روش انتقال سختی ترکیبی شامل خاکریز اصلاح شده ناحیه انتقال به همراه پدهای ارتجاعی زیر ریل بهترین عملکرد را نسبت به سایر حالت‌های روش انتقال سختی ترکیبی دارد. بر این اساس رفتار خط ریلی در محل ناحیه انتقال با وجود روش انتقال سختی ترکیبی که در آن برای کاهش سختی در روی عرشه از المان‌های ارتجاعی پد زیر ریل استفاده شده است (حالت embankment-URP) بر اساس معیارهای تغییرمکان قائم ریل، تغییرمکان قائم وسط لایه بالاست و کاهش تنش نرمال در لایه بستر به ترتیب به تقریباً ۳۱، ۳۱ و ۲٤ درصد و همچنین از لحاظ تغییرمکان دینامیکی و شتاب قائم ریل به ترتیب تقریبا ۲۷ و ۳۵ درصد رفتار خط ریلی را بهبود داده است. نکته قابل توجه در شکل (۱۹) کاهش اختلاف تغییرمکان و نشست نسبی بین خط ریلی بالاستی و پل در روش ترکیبی انتقال سختی می‌باشد که تقریباً خط ریلی در محل ناحیه انتقال و روی عرشه پل دارای تغییر مکان قائم یکنواختی است و نشست نسبی در ناحیه انتقال از ۰/۵۵ به ۰/۱۱ میلی‌متر کاهش یافته و این بیانگر حالت بسیار مناسبی است که این حالت نیز باعث کاهش نیروهای اعمالی، تنش دینامیکی و خرابی در خط ریلی خواهد شد. البته استفاده از المان‌های ارتجاعی پدهای زیر تراورس باعث نرم شدن بیش از حد خط ریلی روی عرشه شده و لذا دارای انتقال سختی و انتقال تغییر مکان مناسبی نخواهد بود. پس در مجموع بهترین حالت برای روش انتقال سختی ترکیبی در ناحیه انتقال مجاور پل‌های بتنی پورتال فریم با دهانه کوتاه شامل خاکریز اصلاح شده ناحیه انتقال به همراه پدهای ارتجاعی زیر ریل با سختی متفاوت است.

جدول ۸. ارزیابی تاثیر حالت‌های مختلف روش انتقال سختی ترکیبی

حالت روش انتقال سختی ترکیبی	ارزیابی تاثیر حالت‌های مختلف روش انتقال سختی ترکیبی بر اساس معیار (بر حسب درصد)				
	تغییرمکان قائم استاتیکی ریل	تغییرمکان قائم استاتیکی بالاست	کاهش تنش نرمال استاتیکی در لایه بستر	شتاب قائم ریل	تغییرمکان قائم دینامیکی ریل
embankment-USP-E=45	+۱۱/٤٤	+۳۰/۷۷	+۱۸/۳۱	+۲۱/۱۷	+۱٤/۹۷
embankment- USP -E=100	+۱۲/۳٤	+۳۰/۸	+۱۹/۷۷	+۲٦/۸	+۱۵/۸
embankment-URP	+۳۱/۰٦	+۳۰/۸۲	+۲۳/۱٦	+۳٤/۷۲	+۲٦/۸۲
only embankment	+۱۵/۳٦	+۲۵/۸۸	+۱۹/۰۰	+۳۰/۰۸	+۱۷/۸۸

۵- نتیجه‌گیری

برای کاهش سختی و مدول بستر خط در روی عرشه پل‌ها به منظور یکنواخت نمودن سختی و جلوگیری از تغییرات ناگهانی آن در ناحیه انتقال و روی پل استفاده از المان‌های ارتجاعی و نرم کننده سختی در روی عرشه پل همچون پد زیر تراورس و پد زیر ریل روشی مناسب است. برای این منظور، حالت‌های مختلف این روش در مجاورت پل های دهانه کوتاه مورد ارزیابی قرار گرفته تا بهترین و موثرترین حالت آن مشخص شود. نتایج نشان می‌دهد در روش کاربرد پد زیر تراورس در روی عرشه حالت استفاده از پدهای زیر تراورس با ضخامت متغیر و مدول الاستیسیته متفاوت برای تمامی تراورس‌های روی عرشه که نشان دهنده سختی متغیر هستند از بهترین عملکرد برخوردار است و تقریباً باعث بهبود ۲۰ ، ۵ و ۷ درصدی رفتار خط ریلی به ترتیب از نظر تغییرمکان قائم استاتیکی ریل و لایه بالاست و کاهش تنش استاتیکی در لایه بستر شده و نتایج تحلیل دینامیکی نشان می‌دهد که تغییرمکان و شتاب قائم دینامیکی ریل در محل پل‌های دهانه کوتاه با وجود پد زیر تراورس با سختی تدریجی به ترتیب به میزان ۱٦ و ۹ درصد بهبود می‌یابد و در روش انتقال ترکیبی سختی خط، حالت خاکریز اصلاح شده به همراه پدهای ارتجاعی زیر ریل در روی عرشه با سختی‌های متفاوت دارای مطلوب‌ترین رفتار سازه‌ای است و تقریباً باعث بهبود ۳۱ درصدی رفتار خط ریلی از نظر تغییرمکان قائم استاتیکی ریل و لایه بالاست و ۲٤ درصدی تنش نرمال استاتیکی در لایه بستر می‌شود و میزان ۲۷ و ۳۵ درصد به ترتیب رفتار خط ریلی را از لحاظ تغییرمکان و شتاب قائم دینامیکی ریل بهبود داده است.

٦-مراجع

-Alejandro,R., Carballeira, J., Rovira, A., and Vila, P., (2010). Influence of Transition Zone Configurations on Train-Track-Bridge Dynamic Response. 17th International Congress on Sound and Vibration (ICSV17), *Cairo,* Egypt, 18-22.

-Bronsert, J., Baeßler, M., Cuellar, P., and Rucker, W., (2013). Numerical Modeling of Train-Track-Interaction at Bridge Transition Zones Considering the Long-Term Behavior 11th International Conference on Vibration Problems. *Lisbon*, Portugal, 9–12 September.

-David, R. and Li, D. (2006). Design of track transitions Research results digest 79, *Transportation Technology Center, Inc., Pueblo, Colorado.* 4–15.

-Getzner Company, www.getzner.com

-Holscher, P. and Meijers, P., (2007). Literature study of knowledge and experience of transition zones. *Technical Report*, Geo Delft.

-Hyslip, J. P., Li, D., and McDaniel, C. R., (2009). Railway bridge transition case study. In E. Tutumluer and L. Al-Qadi (Eds.), Proceedings of the 8th International Conference Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, *CRC Press.* 1341–1348.

-José N. Varandas., (2013). Long-Term Behavior of Railway Transitions under Dynamic Loading. Master of Science.

-Keer, A. D. and Bathurst, A., (2001). A method of upgrading the performance of track transitions for high–speed service. *Technical report*, U.S. Department of Transportation.

-Kylen, J., 2D-model of a portal frame railway bridge for dynamic analysis. Master Thesis. Royal Institute of Technology (KTH). (2010). Department of Civil and Architectural Engineering. Division of Structural Design and Bridges Stockholm, Sweden.

-Moieni Korkbandi, A., (2015). Optimization of the Common Methods of Enhancing Railway Stiffness Transition in Transition Zones between Express Line and Bridge, M.A. Thesis, *Isfahan University, Isfahan.*

-Nicks, J. E., (2009). The bump at the end of the railway bridge. (Doctor of Philosophy), Texas A & M University.

-Ricardo, I., Salvado, P., Inarejos, J., and Roda, A., (2012). Analysis of the influence of under sleeper pads on the railway vehicle/track dynamic interaction in transition zones. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 226: 409.

-Sasaoka, C. D. and Davies, D., (2005). Implementing track transition solutions for heavy axle load service. In AREMA.

-Chen, H.Y., Ma,. J.L., Qin,. X.G and Aziz, H.Y. (2016). Influence of Pile Cap Effect on Piled Embankment Supporting High-Speed Railway, *Advances in Structural Engineering.*

-Coelho., B ,.Z., Michael., A and Hicks (2015). Numerical analysis of railway transition zones in soft soil, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. *Journal of Rail and Rapid Transit.* Vol. 230 Issue: 6, 1601-1613.

-Feng, H ., (3011). 3D-models of Railway Track for Dynamic Analysis. Master Degree Project, Division of Highway and Railway Engineering, Department of Transport Science, School of Architecture and the Built Environment, *Royal Institute of Technology,* Sweden, Stockholm.

-Hsi, J., (2008). Bridge approach embankments supported on concrete injected columns. GeoCongress 612 -619.

-Paixão, A., Fortunato., E., and Calçada., R. (2015). A numerical study on the influence of backfill settlements in the train/track interaction at transition zones to railway bridges, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. *Journal of Rail and Rapid Transit.* Vol. 230 Issue: 3, 866-878.

-Zhang,. X. Burrow, M. Zhou., S. (2015). An investigation of subgrade differential settlement on the dynamic response of the vehicle–track system. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F. *Journal of Rail and Rapid Transit.*

Influence of under Sleeper Pads and Railpads on Ballasted Railway Track Behavior in Short Span Bridges

Hamidreza Heydari, Assistant Professor, School of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
Alireza Gharighoran, Assistant Professor, Department of Civil and Transportation Engineering, Isfahan University, Isfahan, Iran.
Ali Moeini Korbekandi, M.Sc., Student, Department of Civil and Transportation Engineering, Isfahan University, Isfahan, Iran.

E-mail: h_heydari@iust.ac.ir

Received: September 2023 Accepted: January 2024

ABSTRACT
Sudden and non-uniform changes in track vertical stiffness along railway bridges increased dynamic loads, asymmetric deformations, and damaged track components and as a result, increased maintenance costs. Using elastic elements such as under sleeper pads and railpads has the potential to reduce the track vertical stiffness of the bridge deck and so decrease the dynamic impacts on the railway ballasted track. To investigate this issue, a 3D model including the ballasted track and short-span bridge was created and validated based on the finite element method. The effect of elastic pad application on the bridge deck was evaluated based on different static and dynamic criteria. The results show that the use of under sleeper pads on the bridge deck caused the rail vertical displacement, normal stress of the subgrade layer, and rail acceleration to decrease by nearly 20%, 7%, and 9% respectively. Also in the combinatorial transition case includes improved embankment with the use of resilient railpads on the bridge deck, the rail vertical displacement, normal stress of subgrade, and rail vertical acceleration decreased by about 31%, 24%, and 34% respectively.

Keywords: Railway Ballasted Track, Under Sleeper Pad, Rail Pad, Short Span Bridge, Finite Element Model