بررسی تأثیر دال دسترسی بتنی بر رفتار خط ریلی بالاستی و تعیین مقدار مناسب پارامترهای هندسی آن در ناحیه انتقال پل های دهانه کوتاه خطوط راه آهن

علی معینی کربکندی، کارشناس ارشد مهندسی راه‌آهن، دانشگاه اصفهان
علی رضا قاری قرآن*، استادیار دانشکده حمل و نقل، دانشگاه اصفهان
حمید رضا حیدری، دانشجوی دکتری مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

E-mail: Gharighoran@yahoo.com
دریافت: ۱۳۹٤/۱۲/۱٦ – پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۲۰

چکیده

تغییر ناگهانی و غیریکنواخت سختی قائم خط ریلی در ناحیه انتقال پل‌های خطوط راه‌آهن موجب افزایش بارهای دینامیک، تغییرشکل‌های نامتقارن، آسیب دیدن اجزای خط و در نتیجه افزایش هزینه‌های نگهداری می‌گردد. یکی از روش‌های مورد استفاده جهت رفع مشکلات مذکور، ساخت دال دسترسی بتنی در اطراف سازه پل است. لذا، در تحقیق حاضر، بهینه‌سازی پارامترهای هندسی دال دسترسی بتنی در ناحیه انتقال پل‌های دهانه کوتاه بر اساس معیارهای تغییرمکان قائم ریل، تغییرمکان قائم وسط لایه بالاست و توزیع تنش نرمال در لایه بالاست بررسی شده است. برای این منظور، مدل اجزای محدود از خط ریلی بالاستی در محل پل‌های دهانه کوتاه بتنی، با در نظر گرفتن اجزای روسازی بالاستی و زیرسازی، ایجاد و اعتبارسنجی شده است. نتایج نشان می‌دهد که ابعاد بهینه و مناسب دال دسترسی بتنی در ناحیه انتقال برای پل‌های با دهانه کوتاه و از نوع پورتال فریم از نظر ضخامت، طول و شیب به ترتیب ۵۰ سانتی‌متر، ٦ متر و ۵٪ هستند. همچنین، تغییرمکان قائم ریل و تغییرمکان قائم وسط لایه بالاست خط ریلی با وجود دال دسترسی مناسب در اطراف سازه پل‌های دهانه کوتاه و با فرض عدم وجود حالت تراورس‌های آویزان، به ترتیب تقریباً به میزان ٢٤ و ١٨ درصد کاهش یافته است. در مقابل، توزیع تنش نرمال در وسط لایه بالاست حدوداً ٤٠٪ غیریکنواخت‌تر شده، ولی در حد مجاز برای لایه بالاست است.

واژه‌های کلیدی: دال دسترسی، خط ریلی، ناحیه انتقال، بهینه‌سازی، مدل‌سازی اجزای محدود

۱. مقدمه

در محل عبور خط ریلی بالاستی از روی سازه‌های فنی همچون پل‌ها و یا تغییر وضعیت آن به خط غیر-بالاستی، وجود تغییرات ناگهانی سختی قائم خط در این نواحی می‌تواند منجر به ایجاد تغییرشکل‌های نامتقارن، ناهمواری ریل، آسیب دیدن اجزای خط و ناوگان و در نتیجه افزایش هزینه‌های نگهداری شود. در کشور هلند، تخمین زده شده که ٤٠٪ از هزینه‌های تعمیر و نگهداری مربوط به حفظ شرایط هندسی در وضعیت استاندارد است و هزینه‌های تعمیر و نگهداری ناحیه انتقال ۲ تا ٤ برابر بیشتر از یک خط‌آهن عادی است (هولشر و میجرز، ۲۰۰۷). بر اساس مطالعات (ساسائوکا و دیویس، ۲۰۰۵)، سالانه در حدود ۲۰۰ میلیون دلار در خطوط راه‌آهن آمریکا برای تعمیر و نگهداری ناحیه انتقال

هزینه می‌شود و این در حالی است که در اروپا سالانه ۸۵ میلیون یورو هزینه می‌شود (هیسلیپ و همکاران، ۲۰۰۹). برای رفع مشکلات مذکور در نواحی انتقال و داشتن بهره‌برداری مناسب، لزوم انتقال سختی مطلوب امری ضروری به نظر می‌رسد. یکی از موثرترین روش‌های مورد استفاده برای انتقال سختی بین خط بالاستی و یک سازه، ساخت دال دسترسی بتنی در اطراف سازه است. لذا، در این تحقیق، تأثیر وجود دال دسترسی بتنی بر رفتار خط ریلی بالاستی و بهینه‌سازی پارامترهای هندسی آن در ناحیه انتقال پل‌های دهانه کوتاه خطوط راه‌آهن بررسی شده است.

۲. مروری بر مطالعات پیشین

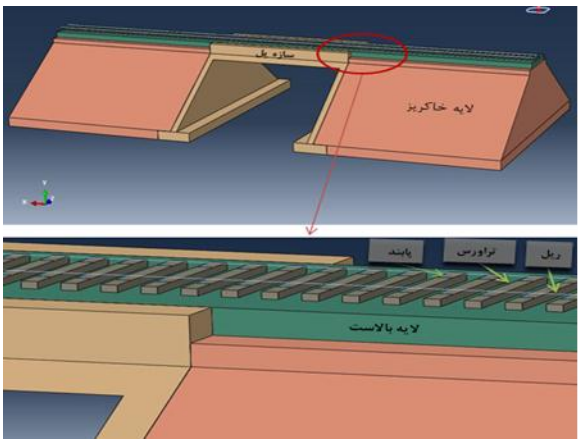
وقتی قطار از خط بالاستی به روی سازه‌ای سخت همچون پل‌ها حرکت می‌کند به علت تغییرات ناگهانی و غیریکنواخت سختی قائم خط، بار دینامیک چرخ و در نتیجه نرخ خرابی افزایش یافته و نشست نسبی بین خاکریز و سازه ایجاد می‌شود و این شرایط باعث افزایش نیروهای اندرکنشی بین چرخ و ریل می‌شود (دیوید و لی، ۲۰۰۶) و تا زمانی که تعمیر و نگهداری انجام نشود، این روند ادامه خواهد یافت. همچنین، اجزای خط ریلی در ناحیه انتقال تنش بیشتری را متحمل می‌شوند و از این رو تعمیر و نگهداری بیشتری را به خود اختصاص می‌دهند (هسی، ۲۰۰۸). محققین متعددی تأثیر تغییرات سختی روی نیروهای اندرکنشی چرخ و ریل و سایر مسائل مرتبط در نواحی انتقال را بررسی کرده‌اند (کریستینا و همکاران، ۲۰۱٤؛ رئال و همکاران، ۲۰۱۵؛ شهباز، ۲۰۱۱). نتایج نشان می‌دهد که در نواحی انتقال، افزایش سرعت و وجود بستر با خاک‌های نرم و ایجاد نشست دائمی باعث افزایش نیروهای اندرکنشی خط و قطار شده و تأثیر بسیاری روی ارتعاشات خط می‌گذارد. با استفاده از مدل‌سازی عددی و بررسی نواحی انتقال مختلف مشخص شده که الگوی انتقال سختی خط، تأثیر بسیاری روی رفتار دینامیک خط و قطار دارد و توزیع سختی ملایم خط می‌تواند به طور چشمگیری نیروهای اندرکنشی چرخ و ریل و شتاب ریل را کاهش دهد (چن و مک‌داول، ۲۰۱٤؛ برونسرت و همکاران، ۲۰۱٤؛ شهرکی و همکاران، ۲۰۱۵). همچنین، مروری بر تحقیقات مرتبط با ناحیه انتقال (گالاژ و همکاران، ۲۰۱۳) نشان می‌دهد که دلایل اصلی زوال و خرابی خط و عملکرد ضعیف آن در ناحیه انتقال به خاطر خرابی سریع هندسه خط، شکست اجزای خط ریلی و نفوذ گل و لای به سمت بالای خط می‌باشد. در مطالعات بورد تحقیقات حمل و نقل (TRB، ۲۰۰۰) استفاده از دال دسترسی بتنی شیب-دار با ضخامت متغیر و طول ٦/۱ متر به عنوان روشی برای انتقال سختی معرفی شده است. در مطالعات پیوسته‌ای طی دوره‌های زمانی چند ماهه، رفتار کوتاه-مدت و بلندمدت نواحی انتقال، شامل دال دسترسی بتنی در اطراف سازه آبروها، بررسی شده است (کوئلهو، ۲۰۱۰؛ وارانداس، ۲۰۱۳). مشخص شده که میزان تغییرمکان قائم خط ریلی در بالای دال دسترسی بتنی بیشتر از خط روی سازه آبرو و یا حتی در محلی قبل از دال دسترسی است و این باعث ایجاد نشست نسبی در این محل می‌شود. همچنین، خط ریلی، حرکت الاکلنگی نسبت به سازه آبرو دارد و در بالای دال دسترسی حالت تراورس‌های آویزان (وجود فاصله آزاد بین زیر تراورس و بالاست) وجود دارد که دلیل اصلی برای عملکرد ضعیف دال دسترسی است و به جای افزایش تدریجی سختی قائم بین خط ریلی بالاستی و سازه آبرو، کاهش سختی در روی دال دسترسی ایجاد می-شود. در مطالعات دیوید و لی (۲۰۰٦) مشخص شده که اگر با اقداماتی نشست بالاست محدود شود و شرایط تراورس های آویزان وجود نداشته باشد، دال دسترسی برای انتقال ملایم سختی مناسب است و باعث افزایش میزان مدول بستر خط و کاهش تغییرمکان ریل می‌شود.

توجه به مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که معمولاً در تحقیقات قبلی چندین روش با همدیگر مقایسه شده و به طور خاص و پارامتریک، بهینه‌سازی ابعادی و سازه‌ای روش انتقال دال دسترسی بتنی در محل ناحیه انتقال پل‌های دهانه کوتاه بررسی نشده است.

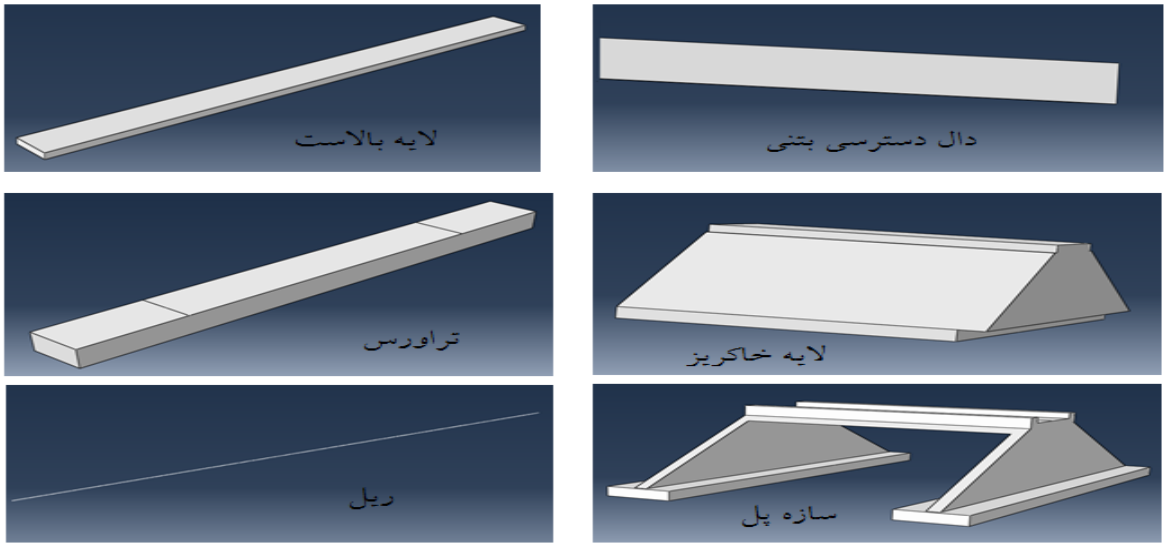
۳. مدل‌سازی و اعتبارسنجی

مدل سه بعدی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس استاندارد انجام شده که شامل اجزای خط ریلی بالاستی، پل و بستر خاکی است. پل مورد نظر از نوع پورتال فریم است که معمولاً در محل عبور خط راه‌آهن از روی جاده‌های باریک ساخته می‌شود. نمونه‌ای از این پل‌های پرکاربرد در کشور سوئد، مدل اجزای محدود آن و نمای کلی از اجزای مختلف به کار رفته در مدل‌سازی به ترتیب در شکل‌های ۱ تا ۳ نشان داده شده است (کایلن، ۲۰۱۰). در جدول ۱، خواص مکانیکی اجزای به کار رفته در مدل‌سازی، با توجه به مراجع مختلف، ارائه شده است.

شکل ۱. نمونه‌ای از پل پورتال فریم در سوئد (کایلن، ۲۰۱۰)



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



شکل ۳. اجزای مختلف به کار رفته در مدل‌سازی در یک نمای کلی

جدول ۱. خواص مکانیکی اجزای به کار رفته در مدل‌سازی

اجزای مدل	مدول الاستیسیته (E) (Mpa)	ضریب پواسون	دانسیته (kg/m^3)
ریل (رودا و همکاران، ۲۰۱۰)	۲۰۰۰۰۰	۰/۳	۷۸۵۰
تراورس (کایلن، ۲۰۱۰)	۲۰۰۰۰	۰/۲۵	۲۵۰۰
بالاست (برونسرت و همکاران، ۲۰۱۳)	۲۰۰	۰/۲	۱۹۰۰
بتن پل (کایلن، ۲۰۱۰)	۲۰۰۰۰	۰/۲	۲۵۰۰
دال دسترسی بتنی (کایلن، ۲۰۱۰)	۲۰۰۰۰	۰/۲	۲۵۰۰
بستر- خاکریز (کایلن، ۲۰۱۰)	۶۰	۰/۱	۱۷۰۰

طول کل مدل شامل خط بالاستی و سازه پل، ۵۶/۴ متر است و ریل به صورت المان تیری اولر – برنولی و دارای سطح مقطع مشابه ریل UIC60 در نظر گرفته شده است. ابعاد تراورس بتنی ۲۵×۱۵ سانتی‌متر، به طول ۲/۵ متر، و فاصله بین تراورس‌ها ۶۰ cm است. سیستم اتصالات (پابند) با استفاده از المان‌های connector با مقدار الاستیسیته ۱۵۰ MPa در جهت قائم و مقدار میرایی ۱۳۰۰۰ Ns/m، با توجه به مرجع برونسرت و همکاران (۲۰۱۳)، مدل شده است. لایه بالاست دارای ضخامت ۶۰ cm و عرض ۶ متر بوده و لایه خاکریز به ضخامت ۸ متر با مصالح یکنواخت مدل شده است. در مدل‌های ایجاد شده، اندرکنش بین سطوح مختلف مطابق با مراجع کایلن (۲۰۱۰) و کوئلهو (۲۰۱۰) با قید tie تعریف شده است. در پایین‌ترین قسمت مدل‌سازی، از شرایط تکیه‌گاهی کاملاً گیردار برای پایدار کردن مدل‌سازی استفاده شده است.

برای اعتبارسنجی قسمت پل، ابتدا عرشه آن بر اساس روابط آیین‌نامه ایران و آشتو طراحی شده و سپس با توجه به روابط تئوری مربوط به تغییرمکان تیرهای دو سرگیردار و نتایج مدل‌سازی، اعتبارسنجی آن بررسی شده است. طول دهانه پل ۱۵ متر و عرشه بتن مسلح با سیستم سازه‌ای یک عنصری و عرض ۶ متر است که با شرایط گیرداری کامل روی کوله‌ها قرار می‌گیرد. تغییرمکان وسط دهانه پل معادل تغییرمکان وسط تیر دو سر گیردار تحت بار P است و از رابطه (۱) به‌دست می‌آید.

$$\Delta = PL3/192EI \quad (1)$$

که E مدول الاستیسیته بتن و I ممان اینرسی سطح مقطع عرضی طراحی شده عرشه پل است. باید توجه نمود که چون میزان آرماتورها در محدوده تکیه‌گاه‌ها و وسط دهانه عرشه متفاوت است، از میانگین ممان اینرسی در این دو محدوده استفاده شده است. پس داریم:

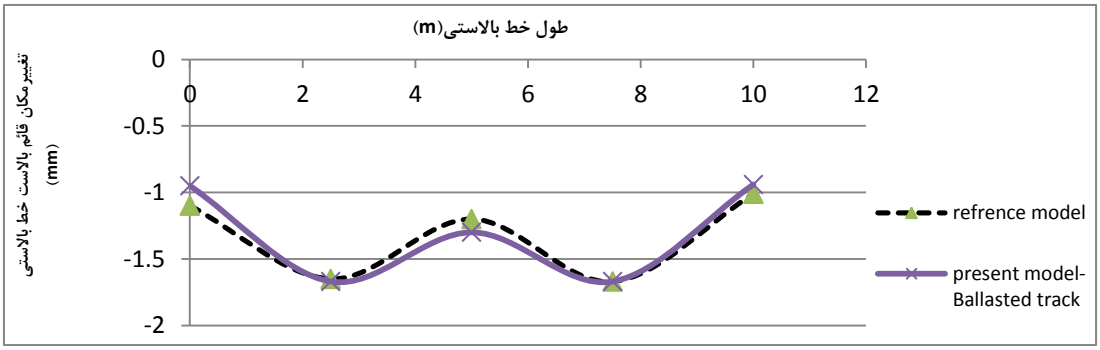
L= ۱۵/۷ m , E= ۲۰ Gpa , I= ۱/۲۶۵ , P= ۲۰۰ KN $\longrightarrow$ Δ= ۰/۱۵۹ mm

در ادامه، تغییرمکان قائم وسط عرشه پل مدل‌سازی شده تحت بارگذاری ثابتP تعیین شده و در جدول ۲، مقایسه و اعتبارسنجی مربوط به محاسبات تئوری و مدل‌سازی عددی پل ارائه شده است.

جدول ۲. اعتبارسنجی پل بر اساس محاسبات تئوری و مدل‌سازی عددی

خطای نسبی (٪)	تغییرمکان مدل‌سازی (mm)			تغییرمکان تئوری (mm)	مکان نقطه روی عرشه
	وسط عرشه	زیر عرشه	روی عرشه		
۴/۷	۰/۱۶۶۵	۰/۱۶۶	۰/۱۶۷	۰/۱۵۹	وسط دهانه پل

برای اعتبارسنجی بخش خط بالاستی، از نتایج مطالعات فنگ (۲۰۱۱) استفاده شده است. شکل ٤ مقدار تغییرمکان وسط لایه بالاست برای خط بالاستی و محدوده ناحیه انتقال تحت بار بحرانی ناشی از دو واگن با بار محوری ۲۲ تن را نشان می‌دهد. نتایج اعتبارسنجی نشان می‌دهد که خطای مدل‌سازی کمتر از ۳٪ می‌باشد.



شکل ٤. اعتبارسنجی خط بالاستی و محدوده ناحیه انتقال

بارگذاری را از دو جهت می‌توان در نظر گرفت: یکی در نظر گرفتن تحلیل استاتیک با بار محوری ton ۲٤ مربوط به قطار باری و دیگری در نظر گرفتن تحلیل شبه‌استاتیک برای قطارهای سریع‌السیر از نوع TGV فرانسه با بار محوری ton ۱۷ و سرعت عبوری Km/h ۳۰۰ که جزئیات این بارگذاری در جدول ۳ و ضریب ضربه در تحلیل شبه‌استاتیک در رابطه (۲) (صادقی و کهوتک، ۱۹۹۵) ارائه شده است.

$$\phi = 1.098 + 8\times10^{-4}V + 10^{-6}V^2 \qquad (۲)$$

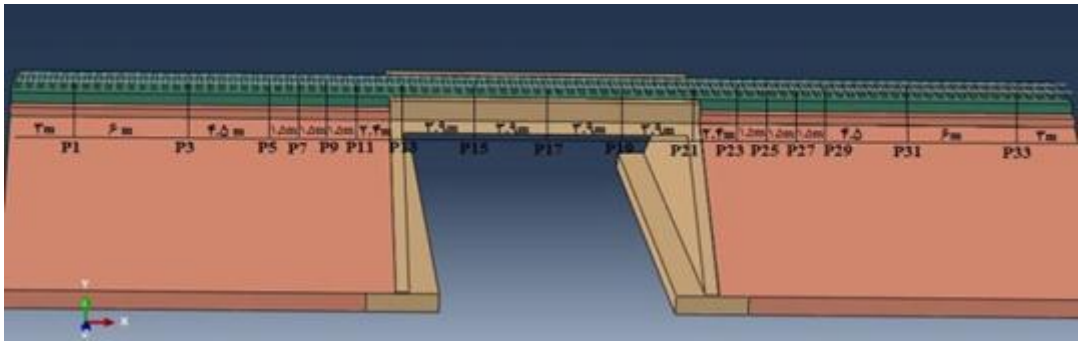
جدول ۳. جزئیات بار اعمالی با در نظر گرفتن ضریب ضربه در تحلیل شبه‌استاتیک

بار محوری استاتیک P_s (ton)	سرعت طراحی (km/h)	ضریب ضربه ϕ	بار محوری شبه‌استاتیک (ton) $P_d=\phi . P_s$	بار هر چرخ (ton)
۱۷	۳۰۰	۱/٤۲	۲٤	۱۲

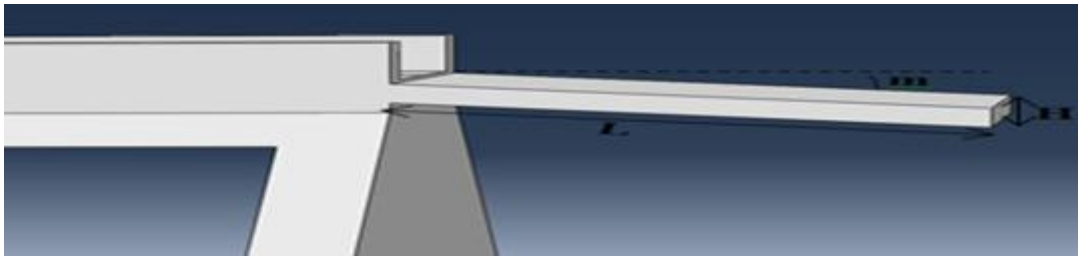
٤. بررسی تأثیر دال دسترسی بتنی بر رفتار خط ریلی در محل ناحیه انتقال پل‌ها

اجرای دال دسترسی بتنی در اطراف سازه پل‌ها روشی رایج برای انتقال تدریجی سختی و جلوگیری از نشست نسبی در اطراف پل‌ها است. در این تحقیق، تأثیر پارامترهای هندسی دال دسترسی یعنی طول، ضخامت و شیب آن روی رفتار خط ریلی در ناحیه انتقال مجاور پل‌ها بر اساس معیارهای تغییرمکان قائم ریل، تغییرمکان قائم وسط لایه بالاست و نحوه‌ی توزیع تنش نرمال در وسط لایه بالاست بررسی شده و در نهایت ابعاد هندسی بهینه آن تعیین می‌شود. سپس، میزان تأثیر وجود دال دسترسی بهینه شده نسبت به حالتی که هیچ‌گونه دال دسترسی وجود نداشته بررسی شده است. برای این منظور، با فرض شرایط مطلوب تکیه‌گاهی برای تراورس‌ها در محل نواحی انتقال و در واقع عدم وجود حالت تراورس‌های آویزان و با فرض رفتار الاستیک برای مصالح، مدل‌های مورد نظر ایجاد و تحلیل می‌شوند. در شکل‌های ۵ و ٦ به ترتیب موقعیت نقاط مورد بررسی که در سطح ریل و وسط لایه بالاست

هستند و نمایی از دال دسترسی بتنی و پارامترهای مورد بررسی آن نشان داده شده است. در جدول ٤، تمامی حالت‌های مورد بررسی دال دسترسی برای بهینه‌سازی پارامترهای مختلف آن ارائه شده است.



شکل ٥. موقعیت نقاط مورد بررسی در وسط لایه بالاست و در سطح ریل



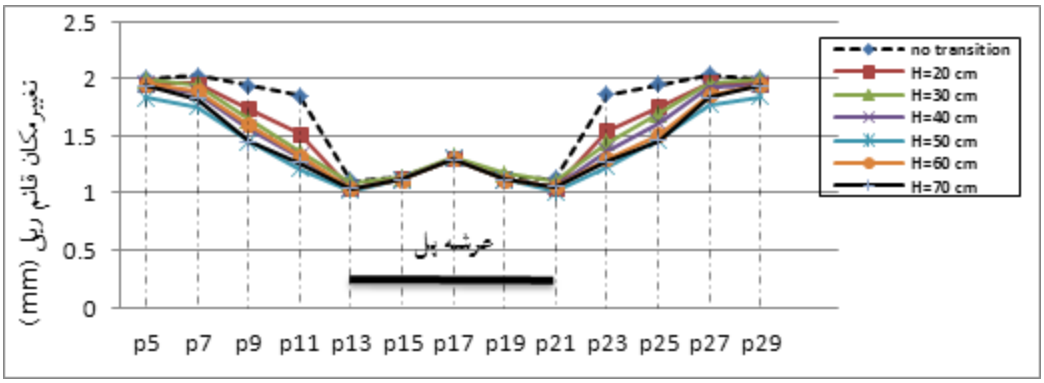
شکل ٦. دال دسترسی مدل‌سازی شده و پارامترهای هندسی آن

جدول ٤. حالت‌های مختلف مورد بررسی دال دسترسی برای بهینه‌سازی پارامترهای آن

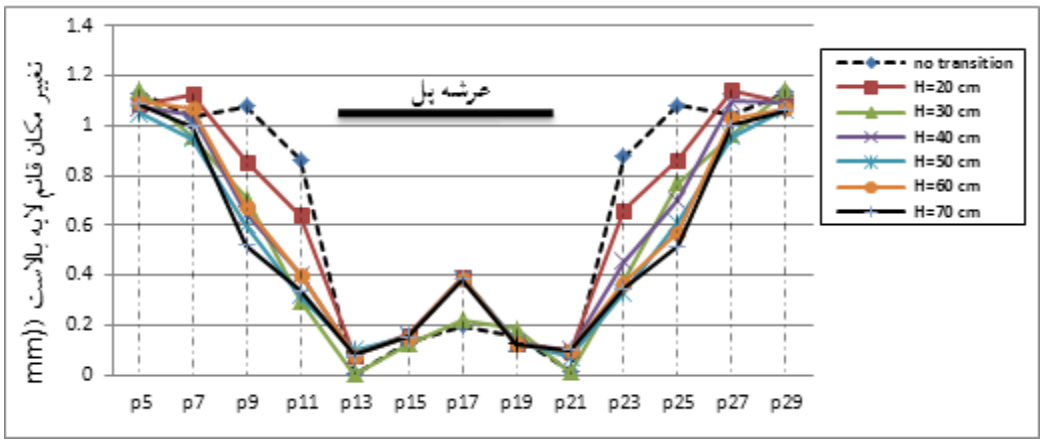
پارامتر مورد بهینه‌سازی	حالت‌های مختلف	نام مختصر در مدل‌سازی
ضخامت دال	ضخامت ٢٠cm ، شیب ٪ ٢/٥، طول ٤ m	H=20 cm
	ضخامت ٣٠cm ، شیب ٪ ٢/٥، طول ٤ m	H=30 cm
	ضخامت ٤ cm ، شیب ٪ ٢/٥، طول ٤ m	H=40 cm
	ضخامت ٥٠cm ، شیب ٪ ٢/٥، طول ٤ m	H=50 cm
	ضخامت ٦٠cm ، شیب ٪ ٢/٥، طول ٤ m	H=60 cm
	ضخامت ٧٠cm ، شیب ٪ ٢/٥، طول ٤ m	H=70 cm
شیب دال (به سمت پایین)	شیب ٪ ٠ ، ضخامت ٣٠ cm، طول ٤ m	slab-m=0 %
	شیب ٪ ١ ، ضخامت ٣٠ cm، طول ٤ m	slab-m=1 %
	شیب ٪ ٢/٥ ، ضخامت ٣٠ cm، طول ٤ m	slab-m=2.5 %
	شیب ٪ ٥ ، ضخامت ٣٠ cm، طول ٤ m	slab-m=5 %
	شیب ٪ ١٠، ضخامت ٣٠ cm، طول ٤ m	slab-m=10 %
طول دال	طول ٣ m، ضخامت ٣٠ cm، شیب ٪ ٢/٥	L=3 m
	طول ٤ m، ضخامت ٣٠ cm، شیب ٪ ٢/٥	L=4 m
	طول ٥ m، ضخامت ٣٠ cm، شیب ٪ ٢/٥	L=5 m
	طول ٦ m، ضخامت ٣٠ cm، شیب ٪ ٢/٥	L=6 m

٤-١. تأثیر ضخامت دال دسترسی بتنی

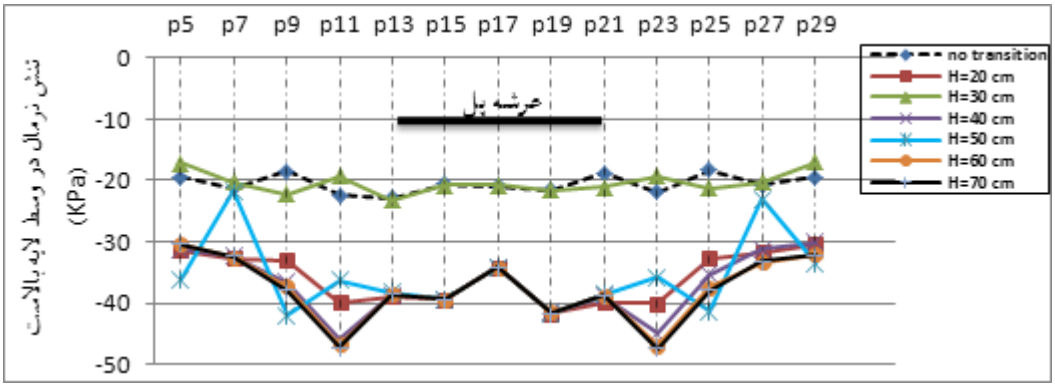
دال دسترسی بتنی در طرفین سازه پل دارای ضخامت ثابت ولی به صورت شیب‌دار به سمت پایین در نظر گرفته شده است. ضخامت‌های مورد بررسی به ابعاد ۲۰، ۳۰، ٤٠، ٥٠ ، ٦٠ و ۷۰ سانتی‌متر هستند و حالتی که دال دسترسی بتنی وجود ندارد با نمودار no transitionنشان داده شده است. شکل‌های ۷ تا ۹ به ترتیب تغییرمکان قائم ریل، تغییرمکان قائم وسط لایه بالاست و تنش نرمال در وسط لایه بالاست را برای دال دسترسی با ضخامت‌های مختلف نشان می‌دهند.



شکل ۷. تغییرمکان قائم ریل برای دال دسترسی بتنی با ضخامت‌های مختلف



شکل ۸. تغییرمکان قائم بالاست برای دال دسترسی بتنی با ضخامت‌های مختلف



شکل ۹. تنش نرمال در وسط لایه بالاست برای دال دسترسی بتنی با ضخامت‌های مختلف

برای ارزیابی تـأثیر وجـود دال دسترسـی بـر اسـاس معیـارهـای تغییرمکـان، از میـانگین اخـتلاف مقـادیر تغییرمکان در نقاط مورد بررسی برای دو حالـت وجـود و عدم وجود دال دسترسی استفاده شده است. در واقـع، کاهش تغییرمکان قائم ریل بیانگر تأثیر مثبت وجـود دال دسترسی نسبت به حالتی است که دال دسترسـی وجـود ندارد. برای تعیین تأثیر توزیع تنش در لایـه بالاسـت از شاخص آماری ضریب تغییرات استفاده شده اسـت. هـر چه ضریب تغییرات برای مقادیر تنش به‌دست آمـده در طول خط کمتر شود نشان از توزیع بهتر تنش و شـرایط مطلوب‌تر است. شکل ۷ نشان می‌دهـد کـه وجـود دال دسترسی با هر ضخامتی باعث کاهش تغییـرمکـان قـائم ریل و بهبود رفتار خط ریلـی در نـواحی انتقـال پـل‌هـا می‌شود. این در صورتی است که شرایط تـراورس‌هـای آویـزان (معلـق) در محـدوده‌ی نـواحی انتقـال وجـود نداشته باشد. با توجه به شـکل ۹، دال دسترسـی باعـث افزایش مقادیر تنش و همچنـین توزیـع نامناسـب‌تـر آن نسبت به حالتی است که هیچگونه دال دسترسی وجـود نـدارد. یکـی از دلایـل آن، وجـود شـرایط تکیـه‌گـاهی صلب‌تر از جانب دال دسترسی بتنی برای لایـه بالاسـت است نسبت به حالتی که بالاست روی لایه خـاکی نـرم بستر وجود دارد. باید اشاره نمود که مقـادیر تـنش بـه-دست آمده برای تمامی ضـخامت‌هـا بـا اینکـه افـزایش یافته‌اند ولی در حد مجاز برای لایه بالاست هسـتند. در جـدول ۵، ارزیـابی تـأثیر وجـود دال دسترسـی بـا ضخامت‌های مختلف بر اسـاس معیـارهـای مـورد نظـر نسبت به حالتی که دال دسترسی وجود ندارد، ارائه شده است..

جدول ۵. ارزیابی تأثیر وجود دال دسترسی بتنی با ضخامت‌های مختلف

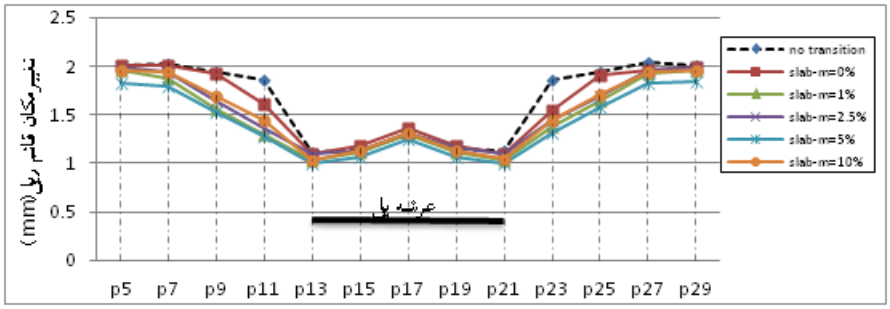
ضخامت دال	ارزیابی تأثیر وجود دال دسترسی بتنی بر اساس معیار (٪)		
دسترسی بتنی (cm)	کاهش تغییرمکان قائم ریل	کاهش تغییرمکان قائم لایه بالاست	توزیع یکنواخت تنش در لایه بالاست
H= ۲۰	+۱۱/۱۵	+۳/۱۸	−۵۸/۳
H= ۳۰	+۱۲/۵	+۱٤/۱۱	−۲۲/۲
H= ٤۰	+۱۷/۵	+۱۰/۵۲	−۹۲/۹
H= ۵۰	+۲۵/۵۵	+۱۵/٤۸	−٤۸/٦
H= ٦۰	+۱۸/۸۷	+۱۲/۳٤	−۹۱/٦
H= ۷۰	+۲۲/۰۳	+۱۵/٦۵	−۹٦/٦

مقادیر جدول ۵ نشان می‌دهد که دال دسترسی با ضخامت ۵۰ cm نسبت به سایر ضخامت‌ها از عملکرد مناسب‌تری برخودار است و تغییرمکان قائم ریل و تغییرمکان لایه بالاست را نسبت به حالتی که هیچگونه دالی وجود ندارد به ترتیب ۲۵/۵۵ درصد و ۱۵/٤۸ درصد کاهش داده است. با افزایش ضخامت دال دسترسی از ۲۰ تا ۵۰ سانتی‌متر، میزان تغییرمکان قائم ریل و لایه بالاست تقریباً کاهش می‌یابد که از دلایل اصلی آن افزایش صلبیت خط ریلی به خاطر افزایش ضخامت دال بتنی در ناحیه انتقال است. ولی همیشه صلبیت بیش از حد و سخت‌تر شدن مناسب نیست و معمولاً از حدی تفاوت زیادی حاصل نمی‌شود. دقت در نتایج جدول ۵ نشان می‌دهد که برای ضخامت‌های بیشتر از ۵۰ cm تغییرمکان‌های ریل کاهش قابل توجهی نداشته یا رفتاری شبیه به دال ۵۰ cm دارند. کاهش تغییرمکان قائم لایه بالاست با وجود دال دسترسی بتنی با ضخامت‌های ۵۰ تا ۷۰ سانتی‌متر تقریباً یکسان می-باشد که نشان می‌دهد افزایش ضخامت دال و یا صلبیت

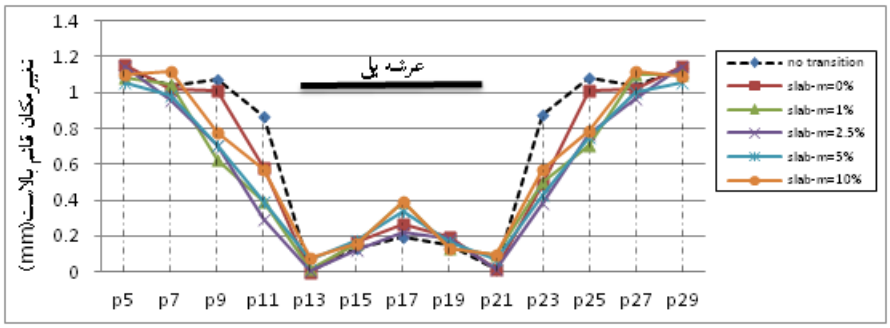
خط از ۵۰ cm به بعد تأثیری قابل توجهی روی کاهش تغییرمکان لایه بالاست ندارد لذا با توجه به ضخامت کمتر و معیار اقتصادی، ضخامت دال ۵۰cm مناسب‌تر است. نکته دیگر اثر نامطلوب وجود دال دسترسی روی توزیع و مقادیر تنش در وسط لایه بالاست است ولی باید توجه نمود که مقادیر تنش‌ها در ناحیه انتقال در مجاورت ورودی پل‌ها دارای توزیع مناسبی است و از طرفی مقادیر تنش‌های نرمال در حد مجاز لایه بالاست و لایه بستر هستند. در نهایت با توجه به اهمیت معیار تغییرمکان و همچنین مقادیر مجاز برای تنش‌های به‌دست آمده، نتیجه می‌شود که دال دسترسی با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر نسبت به سایر ضخامت‌ها عملکرد مناسب‌تری دارد. همچنین، در مطالعات دیوید و لی (۲۰۰۶) و TRB (۲۰۰۰) دال دسترسی بتنی با ضخامت ۴۵ cm برای ناحیه انتقال بین خط بالاستی و پل بتنی برای شرایط مختلف خاک بستر پیشنهاد شده است.

٤-۲. تأثیر شیب دال دسترسی بتنی

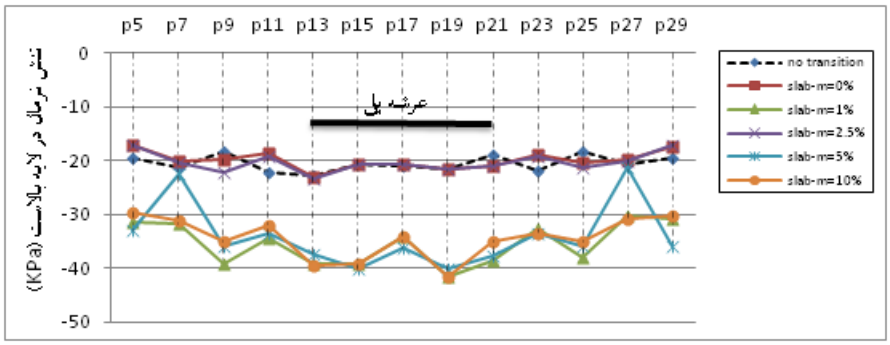
برای انتقال ملایم و تدریجی سختی خط معمولاً دال دسترسی یا با ضخامت متغیر و یا با ضخامت ثابت و به صورت شیب‌دار به سمت پایین اجرا می‌شود. در این قسمت، دال دسترسی با طول ٤ متر و ضخامت ۳۰ سانتی‌متر در شیب‌های صفر، ۱، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد با همدیگر مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا اثر شیب دال دسترسی بر رفتار خط ریلی مشخص شده و در نهایت مطلوب‌ترین شیب تعیین شود. شیب صفر درصد (m=0 %) بیانگر حالتی است که دال دسترسی بتنی بدون شیب بوده و مقادیر دیگر بیانگر شیب بر حسب درصد و به سمت پایین است. شکل‌های ۱۰ تا ۱۲ به ترتیب تغییرمکان قائم ریل، تغییرمکان قائم وسط لایه بالاست و توزیع تنش نرمال در وسط لایه بالاست را نشان می‌دهند.



شکل ۱۰. تغییرمکان قائم ریل برای دال دسترسی بتنی با شیب‌های مختلف



شکل ۱۱. تغییرمکان قائم لایه بالاست برای دال دسترسی بتنی با شیب‌های مختلف



شکل ۱۲. تنش نرمال در وسط لایه بالاست برای دال دسترسی بتنی با شیب‌های مختلف

دقت در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که رفتار سایر دال‌ها با شیب‌های مختلف بهتر از شیب صفر بوده و بهتر است که دال‌ها را با شیب اجرا نمود. دال دسترسی با شیب ۵٪ بر اساس معیار تغییرمکان قائم ریل نسبت به سایر شیب‌ها مناسب‌تر است. همچنین، دال دسترسی با شیب ۲/۵ درصد و حالت بدون شیب نسبت به سایر شیب‌ها رفتار مناسب‌تری روی توزیع تنش در لایه بالاست دارند. در جدول ٦، ارزیابی دال دسترسی با شیب‌های مختلف بر اساس معیارهای مورد نظر ارائه شده است.

جدول ٦. ارزیابی تأثیر وجود دال دسترسی بتنی با شیب‌های مختلف

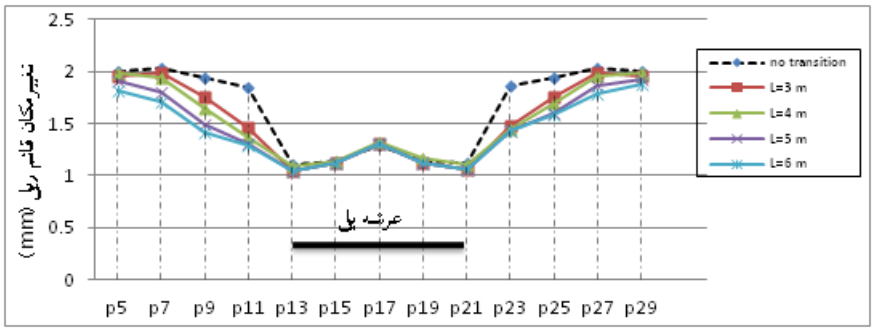
شیب دال دسترسی بتنی (٪)	ارزیابی تأثیر وجود دال دسترسی بتنی بر اساس معیار (٪)		
	کاهش تغییرمکان قائم ریل	کاهش تغییرمکان قائم لایه بالاست	توزیع یکنواخت تنش در لایه بالاست
m =۰	+۷/٤۷	+۸/۷۳	-۲۷/٦
m= ۱	+۱۷/۲۷	+۱۰/۷۹	-۵۲/٤
m= ۲/۵	+۱۲/۵	+۱٤/۱۱	-۲۲/٤
m= ۵	+۲٤/۱۱	+۱۱/۸۲	-۳۵/٦
m= ۱۰	+۱۳/٦۳	+۵/۵۷	-۵۱/۱

دال دسترسی بتنی با شیب ۵٪ نسبت به سایر شیب‌ها از عملکرد مناسب‌تری برخودار است و تغییرمکان قائم ریل و تغییرمکان لایه بالاست را نسبت به حالتی که هیچگونه دالی وجود ندارد به ترتیب ۲۵/۵۵ درصد و ۱۵/٤۸ درصد کاهش داده است. همچنین، دال با شیب ۲/۵ درصد نسبتاً تأثیر مناسبی روی خط ریلی داشته و دال دسترسی بدون شیب (صفر) بدترین عملکرد را داراست. پس لزوماً اجرای دال دسترسی شیب‌دار به سمت پایین نسبت به حالت بدون شیب مناسب‌تر است، که یکی از دلایل اصلی آن وجود انتقال تدریجی‌تر سختی در ناحیه انتقال می‌باشد. البته رابطه خاصی بین مقدار شیب دال و درصد کاهش تغییرمکان و تنش در ناحیه انتقال خط ریلی وجود ندارد. ولی مشخص می‌شود که در حالت اجرای دال بدون شیب و همچنین در شیب‌های در محدوده ۱۰٪ نتایج مناسبی بدست نخواهد آمد. ولیکن می‌توان محدوده مناسبی بین ۲/۵ تا ۵ درصد برای آن تعیین نمود. پس با توجه به اهمیت معیارهای کاهش تغییرمکان قائم ریل و بالاست در مقابل معیار توزیع تنش در لایه بالاست و جلوگیری از نشست نسبی ناگهانی بین خط ریلی و پل، شیب بهینه و مطلوب برای دال بتنی در نواحی انتقال پل‌ها با دهانه کوتاه ۵٪ در

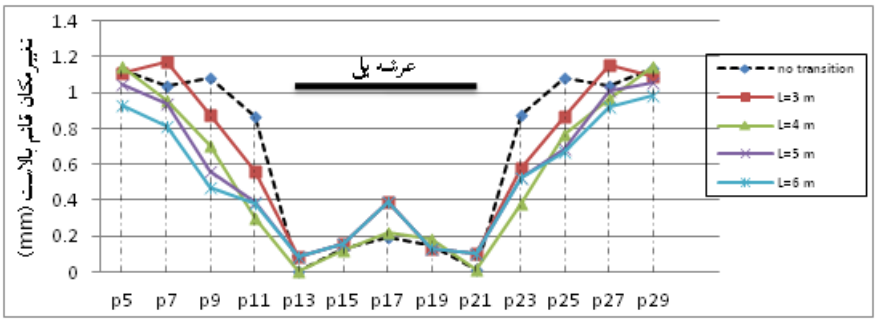
نظر گرفته می‌شود. البته دال دسترسی با شیب ۲/۵ درصد نیز دارای عملکرد نسبتاً مناسبی است.

٤-۳. تأثیر طول دال دسترسی بتنی

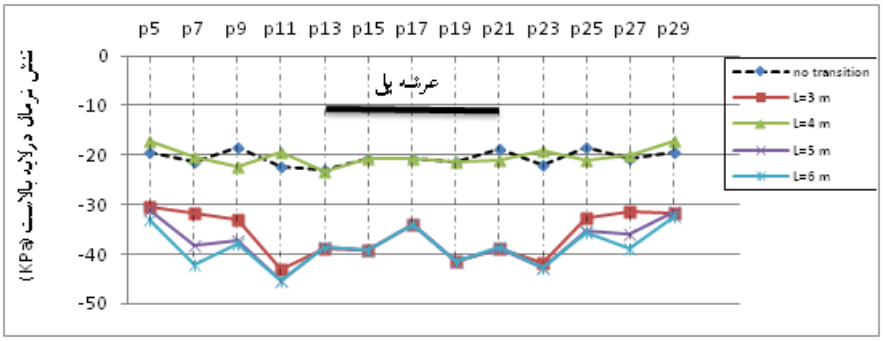
معمولاً طول دال دسترسی بتنی متفاوت و در محدوده ی ۳ تا ٦ متر اجرا می‌شود. در این تحقیق، طول دال دسترسی ۳، ٤، ٥ و ٦ متری با ضخامت cm ۳۰ و شیب ۲/۵ درصد بررسی شده است. شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ به ترتیب میزان تغییرمکان قائم ریل، تغییرمکان قائم وسط لایه بالاست و توزیع تنش در وسط لایه بالاست را برای طول‌های مختلف دال دسترسی نشان می‌دهند.



شکل ۱۳. تغییرمکان قائم ریل برای دال دسترسی بتنی با طول‌های مختلف



شکل ١٤. تغییرمکان قائم لایه بالاست برای دال دسترسی بتنی با طول‌های مختلف



شکل ۱۵. تنش نرمال در وسط لایه بالاست برای دال دسترسی بتنی با طول‌های مختلف

در جدول ۷، ارزیابی دال دسترسی با طول‌های مختلف بر اساس معیارهای مورد نظر نشان داده شده است. با افزایش طول دال دسترسی و در نتیجه افزایش بیستر صلبیت خط ریلی در ناحیه انتقال، میزان کاهش تغییرمکان ریل و تغییرمکان لایه بالاست افزایش می‌یابد. لذا، دال دسترسی با طول ٦ متر نسبت به سایر طول‌ها مناسب‌تر است. بر اساس توزیع تنش در لایه بالاست، بهترین عملکرد مربوط به دال‌های ٤ و ٦ متر است. در

نتیجه، با توجه به اهمیت ایجاد تغییرمکان قائم تدریجی در ناحیه انتقال و با توجه به طول دهانه پل، دال دسترسی با طول ٦ متر مناسب‌ترین عملکرد را دارا می‌باشد. در مطالعات TRB (۲۰۰۰) نیز طول ٦/١ متر توصیه شده است.

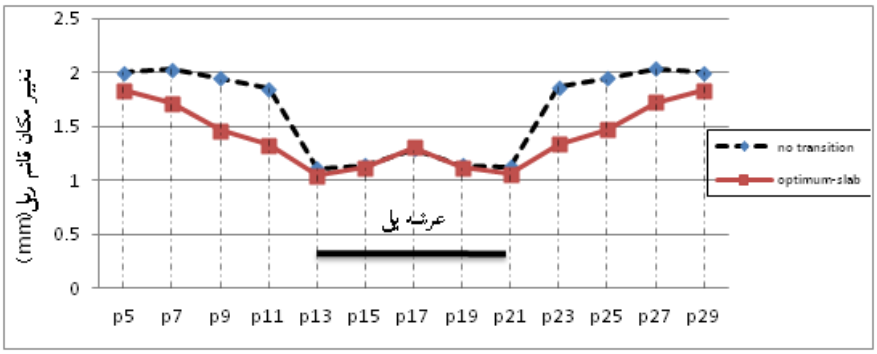
جدول ۷. ارزیابی تأثیر وجود دال دسترسی بتنی با طول‌های مختلف

طول دال دسترسی بتنی	ارزیابی تأثیر وجود دال دسترسی بتنی بر اساس معیار (٪)		
	کاهش تغییرمکان قائم ریل	کاهش تغییرمکان قائم لایه بالاست	توزیع یکنواخت تنش در لایه بالاست
L= ۳ m	+۱۱/٤٤	+۳/۷	-۷۵/۱٦
L= ٤ m	+۱۲/۵	+۱٤/۱۱	-۲۲/٤
L= ۵ m	+۱۹/۲۲	+۱۲/۸۳	-۵۱/٦
L= ٦ m	+۲۲/٤۸	+۱٦/۷	-۳۹/۵

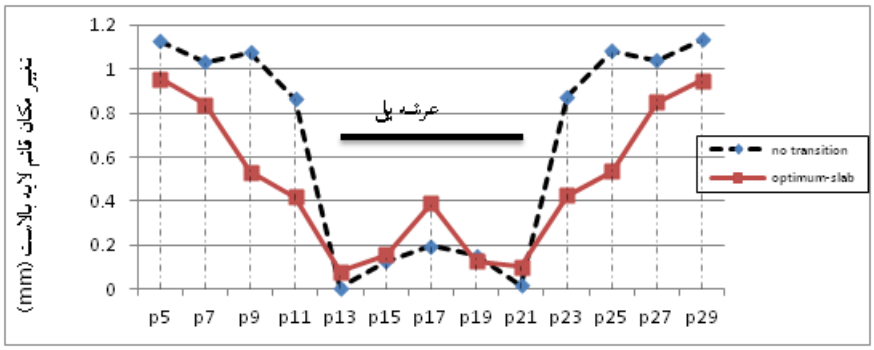
٤-٤. تأثیر دال دسترسی با ابعاد هندسی بهینه شده

شکل‌های ١٦ تا ١٨ به ترتیب تغییرمکان قائم ریل، تغییرمکان لایه بالاست و تنش نرمال در لایه بالاست را برای خط ریلی در دو حالت وجود دال دسترسی و عدم وجود آن نشان می‌دهد. حالتی که دال دسترسی وجود ندارد با نمودار no transition و حالت وجود دال دسترسی با ابعاد بهینه (ضخامت ۵۰ cm، طول ٦ m و شیب ۵٪) (معینی کربکندی، ١٣٩٤) با نمودار slab-optimum نشان داده شده است.

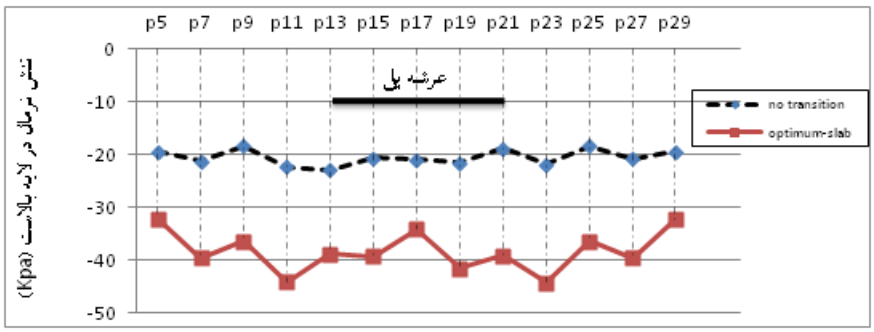
در جدول ۸، ارزیابی تأثیر وجود دال دسترسی بتنی با ابعاد هندسی بهینه بر اساس معیارهای مورد نظر نسبت به حالتی که دال دسترسی وجود ندارد، ارائه شده است. مشخص می‌شود که تغییرمکان قائم ریل و تغییرمکان قائم وسط لایه بالاست خط ریلی با وجود دال دسترسی با ابعاد مناسب نسبت به حالتی که دال دسترسی وجود ندارد به ترتیب به میزان ٢٤/٢٢ و ١٨/٢٣ درصد کاهش می‌یابد. توزیع تنش نرمال در وسط لایه بالاست به میزان ٣٩/۵٨- درصد غیر یکنواخت‌تر شده است. ولی مقادیر تنش به‌دست آمده، با اینکه افزایش یافته، ولی در حد مجاز برای لایه بالاست و بستر هستند. از آنجایی که اهمیت کاهش تغییرمکان قائم در ناحیه انتقال ضروری و مهم‌تر از توزیع تنش است، لذا وجود دال دسترسی با ابعاد بهینه دارای تأثیر مثبت روی رفتار خط ریلی در ناحیه انتقال پل‌ها است.



شکل ١٦. تغییرمکان قائم ریل برای خط ریلی با وجود دال دسترسی بتنی بهینه در مجاورت پل‌ها



شکل ۱۷. تغییرمکان قائم بالاست برای خط ریلی با وجود دال دسترسی بتنی بهینه در مجاورت پل‌ها



شکل ۱۸. تنش نرمال در وسط لایه بالاست برای خط ریلی با وجود دال دسترسی بتنی بهینه در مجاورت پل‌ها

جدول ۸. ارزیابی تأثیر وجود دال دسترسی بتنی با ابعاد هندسی بهینه در مجاورت پل‌ها

دال دسترسی بتنی	ارزیابی تأثیر وجود دال دسترسی بتنی بر اساس معیار (٪)		
بهینه	کاهش تغییرمکان قائم ریل	کاهش تغییرمکان قائم لایه بالاست	توزیع یکنواخت تنش در لایه بالاست
Slab-optimum	+۲٤/۲۲	+۱۸/۲۳	−۳۹/۵۸

۵. نتیجه‌گیری

مطالعات انجام شده مرتبط با ناحیه انتقال نشان می‌دهد که به طور خاص ابعاد هندسی بهینه و مناسب برای دال دسترسی به عنوان ناحیه انتقال در محل پل-های دهانه کوتاه بررسی نشده است. نتایج مدل-سازی‌های عددی نشان می‌دهد که ابعاد بهینه و مناسب دال دسترسی بتنی در ناحیه انتقال برای پل‌ها با دهانه کوتاه از نظر ضخامت، طول و شیب به ترتیب ۵۰cm، ٦ m و ۵٪ هستند. همچنین، تغییرمکان قائم ریل و تغییرمکان قائم وسط لایه بالاست خط ریلی با وجود دال دسترسی با ابعاد هندسی بهینه شده در اطراف سازه پل‌های دهانه کوتاه و با فرض عدم وجود حالت تراورس‌های آویزان نسبت به حالتی که دال دسترسی وجود ندارد به ترتیب +۲٤/۲۲ و +۱۸/۲۳ درصد کاهش یافته و توزیع تنش نرمال در وسط لایه بالاست به میزان −۳۹/۵۸ درصد غیریکنواخت‌تر و نامطلوب‌تر شده است. ولی مقادیر تنش به‌دست آمده با اینکه در لایه بالاست افزایش یافته، ولی در حد مجاز برای لایه بالاست و بستر هستند.

٦. مراجع

معینی کربکندی، ع. ١٣٩٤. بهینه‌سازی روش‌های رایج اصلاح انتقال سختی خط‌آهن در ناحیه انتقال بین خط سریع‌السیر و پل. پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی راه‌آهن ، دانشگاه اصفهان.

Bronsert, J., Baeßler, M., Cuellar, P. and Rucker, W. 2013. "Numerical Modeling of Train-Track-Interaction at Bridge Transition Zones Considering the Long-Term Behaviour". Proceedings of the 11th International Conference on Vibration Problems, Lisbon, Portugal.

Bronsert, J., Baeßler, M., Cuellar, P. and Rucker, W. 2014. "Assessment and Optimization of Bridge Transition Zones on the Basis of a Numerical Model for Train-Rack-Bridge Interaction". Proceedings of the 9th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2014, Porto, Portugal.

Chen, C. and McDowell, G. R. 2014. "An Investigation of the Dynamic Behavior of Track Transition Zones Using Discrete Element Modeling". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F, Journal of Rail and Rapid Transit, published online.

Coelho, B. E. Z. 2010. "Dynamics of Railway Transition Zones in Soft Soils". MSc. in Structures of Civil Engineering, University of Porto, Portugal.

David, R. and Li, D. 2006. "Design of Track Transitions". Research Results Digest 79, Transportation Technology Center, Inc., Colorado, pp. 4-15.

Cristina, A. R., André, P., Eduardo, F. and Calçada, R. 2014. Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance.

Gallage, C., Dareeju, B. and Dhanasekar, M. 2013. "State-of-the-art: Track Degradation at Bridge Transitions". PP. 40-52. *In:* Pathirana, K. P. P. (Ed.), Proceedings of the 4th International Conference on Structural Engineering and Construction Management, Kandy, Sri Lanka.

Holscher, P. and Meijers, P. 2007. "Literature Study of Knowledge and Experience of Transition Zones". Technical Report, Geo Delft.

Hsi, J. 2008. "Bridge Approach Embankments Supported on Concrete Injected Columns". Geo Congress 2008, pp. 612-619.

Huan, F. 2011. "3D-Models of Railway Track for Dynamic Analysis". Master Degree Project, School of Architecture and the Built Environment, Royal Institute of Technology, Stockholm.

Hyslip, J. P., Li, D. and McDaniel, C. R. 2009. "Railway Bridge Transition Case Study". PP. 1341-1348. *In:* Tutumluer, E. and Al-Qadi, L. (Eds.), Proceedings of the 8th International Conference on Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields.

Kylen, J. 2010. "2D-Model of a Portal Frame Railway Bridge for Dynamic Analysis". Master Thesis, Royal Institute of Technology (KTH), Department of Civil and Architectural Engineering, Division of Structural Design and Bridges, Stockholm, Sweden.

Real,T., Zamorano, C., Hernández, C., García, J. A. and Real, J. I. 2015. "Static and dynamic behavior of transitions between different railway track typologies". KSCE J. Civil Eng., 20(4): 1356-1364.

Roda, A., 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, pp. 18-22.

Sadeghi, J. and Kohoutek, R. 1995. "Analytical modeling of railway track system". Rail Track J., 10: 67-81.

Sasaoka, C. D. and Davis, D. 2005. "Implementing Track Transition Solutions for Heavy Axle Load Service". Proceedings of the AREMA 2005 Annual Conference, Chicago, IL.

Shahbaz, R. 2011. "Parametric Study of Bridge Response to High Speed Trains". MSc. Thesis, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden.

Shahraki, M., Warnakulasooriya, C. and Witt, K. J. 2015. "Numerical study of transition zone between ballasted and ballastless railway track". Transport. Geotech., 3: 58-67.

Transportation Research Board, and Parsons, Brinckerhoff, Quade and Douglas, Inc. 2000. "Track Design Handbook for Light Rail Transit". Transit Cooperative Research Program (TCRP) Report 57, published by Transportation Research Board, Washington, DC.

Varandas, J. N. 2013. "Long-term behaviour of railway transitions under dynamic loading to soft soil sites". MSc. Thesis, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.