تعیین سختی مناسب دال خط‌ها با توجه به تغییرات خیز قائم ریل

جبارعلی ذاکری*، دانشیار، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
جاوید بهلول زاده، کارشناس ارشد راه و ترابری، دستیار پژوهشی

E-mail: zakeri@iust.ac.ir

دریافت: ۹۲/۰٦/۰٤ – پذیرش: ۹۲/۰۹/۱۷

چکیده

مزایای فراوان خطوط ریلی بدون بالاست (دال خط‌ها)، علی‌الخصوص در خطوط پرسرعت، باعث افزایش چشمگیر استفاده از این نوع خطوط شده است. با توجه به اهمیت مدول خط و به تبع آن خیز قائم خط در تحلیل رفتار خطوط و ارتباط خیز قائم خط با سختی قائم خط آهن، بررسی تأثیر سختی قائم خط بر تحلیل رفتار دال خط‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد. لذا در این مقاله سعی شده است از طریق مدل‌سازی و تحلیل عددی سازه دال خط ریلی به کمک روش المان‌های محدود، حساسیت خیز قائم خط آهن نسبت به سختی قائم اجزای خط ارائه گردد. با در دست بودن محدوده‌های مجاز خیز قائم خط و نتایج تحلیل حساسیت‌های به‌دست آمده، روشی برای تعیین محدوده مناسب سختی قائم اجزای خط ارائه شده است. در این روش ابتکاری، با استفاده از نتایج تحلیل‌ها، مقادیر بیشینه و کمینه سختی اجزای خط محاسبه شده و به‌صورت نموداری و جدولی ارائه گردیده است. با توجه به این نتایج و محدوده‌های مجاز تعریف شده در UIC، نمودارهایی به عنوان نمودارهای سختی مناسب قائم اجزای خط، ترسیم و مقادیر عددی آنها جهت استفاده در طراحی دال خط‌ها پیشنهاد گردیده است.

واژه‌های کلیدی: خطوط بدون بالاست (دال خط‌ها)، سختی قائم خط آهن، مدول خط آهن.

۱. مقدمه

میل به افزایش سرعت قطارها و همچنین استفاده از سیستم‌های حمل و نقل ریلی در محیط‌های شهری دلیل خوبی برای تغییر رویکرد استفاده از خطوط بالاستی به خطوط بدون بالاست می‌باشد. خطوط بدون بالاست خطوطی هستند که در آنها دال بتنی، دال آسفالتی و یا بستر فولادی جایگزین تراورس‌ها شده‌اند.

مدول بستر ریل از اهمیت زیادی برخوردار است و رابطه‌ای مستقیم با سطح عملکرد، میزان ایمنی خط آهن و حجم عملیات تعمیر و نگهداری مورد نیاز دارد. در صورتی که مقدار مدول بستر ریل کم و یا تغییرات آن در طول محدود و مشخصی از خط آهن بیش از اندازه زیاد باشد، تأثیرات نامطلوبی به همراه خواهد داشت. ابرسون و همکاران (۱۹۹۳) در سال ۱۹۹۳ به این نتیجه رسیدند که اگر مقدار مدول بستر ریل کم باشد، نشست‌های تفاضلی در خط به وجود می‌آید و در نتیجه نیاز به انجام عملیات تعمیر و نگهداری افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، زارمبسکی و پالس (۲۰۰۳) بیان نمودند که اگر تغییرات مدول بستر ریل بسیار زیاد باشد، مانند آنچه که معمولاً در نزدیکی پل‌ها و دستگاه خطوط بروز می‌کند، نیروهای

دینامیک وارد بر خط افزایش می‌یابد. با تشدید نیروهای دینامیک، عمر اجزای خط و در نتیجه طول دوره‌های تعمیر و نگهداری کاهش می‌یابد. این امر به اثبات رسیده که کاهش میزان تغییرات مدول بستر ریل در محل تقاطع خط آهن و راه آسفالته موجب بهبود سطح عملکرد خط آهن و کاهش نیاز به انجام عملیات تعمیر و نگهداری می‌گردد. سطح کیفی راحتی و آسایش سرنشینان، که از روی مقدار شتاب قائم مشخص می‌شود، یکی دیگر از مواردی است که به شدت به مقدار مدول بستر ریل بستگی دارد (خرده‌بینان، ۲۰۰۹).

مهندسین خط به منظور توزیع بار روی بستر، کاهش بار دینامیک روی اجزای زیرسازه، کاهش انتقال ارتعاشات به محیط اطراف و عایق سازی محیط از ارتعاشات، به خاصیت ارتجاعی خط نیازمندند (اسماعیلی، ۱۳۹۰).

از سوی دیگر، خاصیت ارتجاعی خط به منظور محدود کردن تنش در اجزای مشخصی از خط (خصوصاً ریل‌ها و اتصالات)، اطمینان از پایداری خط (جابجایی قائم زیاد ممکن است منجر به تغییر شکل‌های برگشت‌ناپذیر شود)، کنترل پایداری حرکت قطار، ایجاد راحتی سفر و جلوگیری از انحراف ریل محدود می‌شود.

علاوه بر این، خاصیت ارتجاعی عموماً با خاصیت میرایی در ارتباط است. به عبارت دیگر، میرایی خط برای جذب انرژی نیروهای ضربه‌ای، پایداری خط در فرکانس‌های ویژه (جلوگیری از پدیده تشدید (رزونانس)) و کنترل عملکرد عایق صدا در خط (نرخ زوال خط) مورد نیاز است (ذاکری، ۱۳۹۱).

از طرف دیگر، میرایی بیش از حد ممکن است باعث بروز مسائلی از قبیل افزایش بارهای اعمالی بر اجزای خط (میرایی فوق بحرانی)، کاهش خصوصیت جذب ارتعاش در فرکانس‌های بالاتر از فرکانس ویژه ، افزایش دما در اجزا یا سایش آنها، که نتیجه‌ی آن تخریب اجزای الاستیک خواهد بود، گردد (بهلول زاده، ۱۳۹۱).

یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار در تحلیل رفتار دال خط‌ها، خیز قائم خط می‌باشد. با توجه به این نکته که خیز قائم خط با سختی قائم خط ارتباط مستقیم دارد، برای دستیابی به اهدافی از قبیل تعیین محدوده‌های مناسب سختی قائم اجزای خط و همچنین تعیین محدوده مناسب سختی قائم خط، بررسی تأثیر سختی قائم خط در رفتار دال خط‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد (محمدزاده، ۱۳۸۶). لذا سعی شده است با مدل‌سازی انواع دال خطوط که در حال حاضر بیشتر از آنان استفاده می‌شود (بیلو و راندیچ، ۲۰۰۰) محدوده‌های مناسب سختی قائم اجزای خط برای این نوع خطوط بررسی گردد. بدین منظور، روش تحقیق مورد استفاده انجام محاسبات عددی برای تحلیل حساسیت خطوط با استفاده از روش المان‌های محدود می‌باشد.

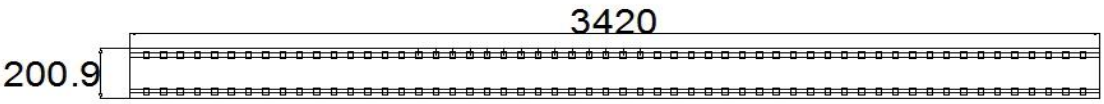
۲. مدل‌سازی سازه خط

۲-۱. مدل پیشنهادی

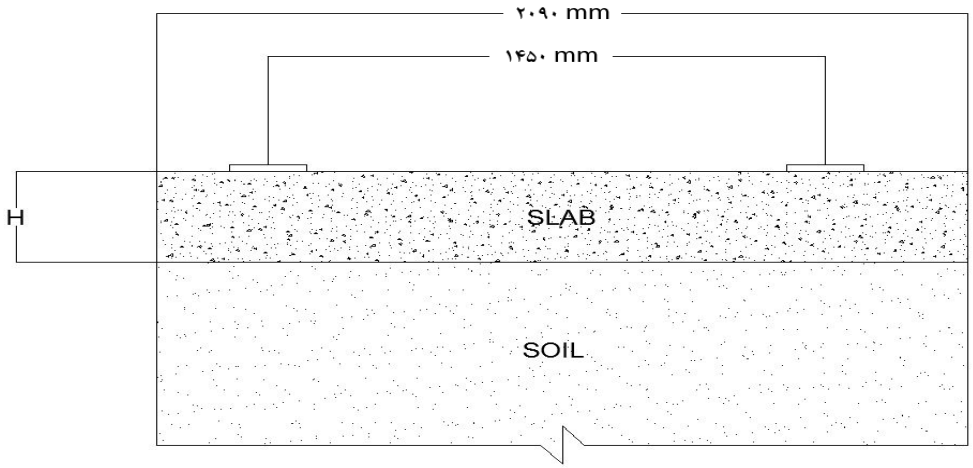
دال خط‌های مورد استفاده در متروها و راه‌آهن به دو صورت پیش‌ساخته یا درجا انتخاب می‌شوند. در این تحقیق، ضمن انتخاب دال درجا، ضخامت آن نیز بر اساس ضخامت متعارف در نظر گرفته شده است. طول مدل انتخابی با در نظر گرفتن طول وسیله نقلیه ریلی و کاهش آثار شرایط مرزی در حدود ۳۴/۲ متر فرض شده است (ذاکری و عباسی، ۱۳۹۱). در این مدل، خط آهن در چهار لایه‌ی ریل، ریل پد، دال بتنی و بستر خط به روش المان‌های محدود مدل‌سازی می‌شود. برای انواع ریل پد و بستر و سه نوع دال با ضخامت‌های ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر بررسی شده و تحلیل می‌گردد. هدف اصلی تحقیق، تعیین مقادیر مجاز سختی استاتیک است. به همین دلیل، پس از تحلیل استاتیک مدل، فقط بیشینه خیز خط جهت کنترل سختی استفاده شده است. آئین‌نامه‌های معتبر، خیز مجاز خط را در محدوده $1mm < Z < 2mm$ تعیین نموده‌اند. بنابراین، با کنترل بیشینه خیز قائم خط در محدوده مذکور می‌توان مقادیر مناسب سختی اجزای خط را به‌دست آورد (AREMA, 1999).

۲-۲. هندسه مدل

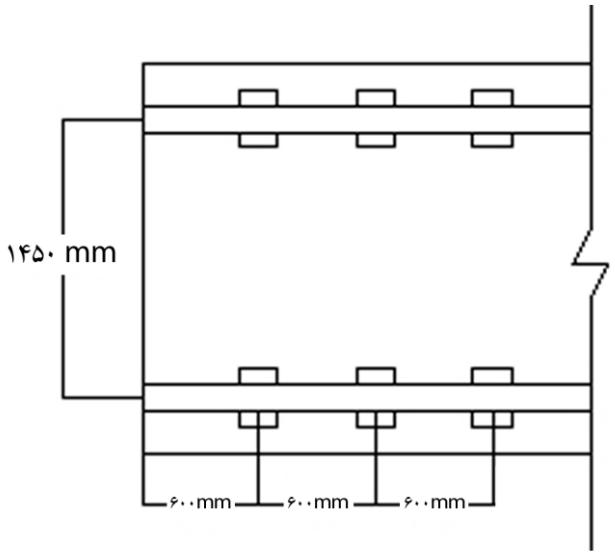
همانگونه که قبلاً ذکر شد، با انتخاب دال خط درجا، طول مدل برابر با ۳۴/۲ m فرض شده که پابندهای ارتجاعی با فواصل ۶۰ cm هر دو رشته ریل UIC60 را به دال خط متصل می‌نماید. عرض خط ریلی مطابق عرض خط استاندارد ۱۴۳۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شکل-های ۱ و ۲ مشخصات کلی مدل و شکل ۳ پلان دال خط مدل‌سازی شده را نشان می‌دهند (بهلول زاده، ۱۳۹۱).



شکل ۱. هندسه دال خط مدل‌سازی شده به طول ۳٤/۲ متر



شکل ۲. مقطع دال خط مدل‌سازی شده (محور تا محور ریل ۱۴۵۰ میلی‌متر)



شکل ۳. پلان دال خط مدل‌سازی شده

۲-۳. خواص و مشخصات مصالح

خواص و مشخصات ریل و بتن مورد استفاده در ساخت دال خط‌ها در نتایج حاصل از تحلیل‌ها اثرگذار خواهد بود. لذا در این تحقیق، ریل دال خط، ریل استاندارد UIC60 انتخاب گردید که مشخصات آن در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین، بتن مورد استفاده در دال بتنی خط (متعارف ایستگاه‌های راه‌آهن) نیز با مشخصات جدول ۲ مدل شده و در تحلیل سازه‌ای دال خط منظور گردید.

جدول ۱. مشخصات مصالح ریل

مدول ارتجاعی (Mpa)	وزن مخصوص (KN/m^3)	تنش تسلیم (Mpa)	تنش کششی نهایی (Mpa)
۲۱۰۰۰۰	۷۸.۵	۵۸۰	۱۰۰۰

جدول ۲. مشخصات بتن مصرفی در دال‌خط

مدول ارتجاعی (Mpa)	وزن مخصوص (KN/m^3)	مقاومت فشاری مشخصه (N/cm^2)
۲۵۰۰۰۰	۲۵	۲۸۰۰

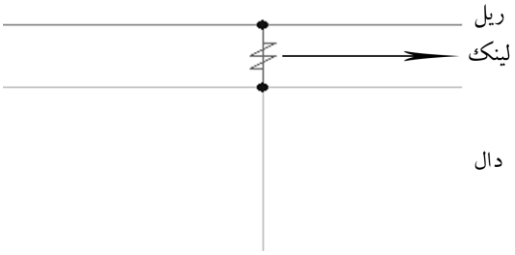
۲-٤. المان‌های اجزای روسازی

۲-٤-۱. ریل

همانگونه که قبلاً بیان گردید، ریل دال خط از نوع ریل استاندارد UIC60 انتخاب گردید. اجزای ریل به‌صورت المان‌های تیر مدل‌سازی شده است. با توجه به بررسی استاتیک سختی خط و ثابت بودن فواصل پابندها، در المان‌بندی تیر فقط نقاط تکیه‌گاهی و وسط دهانه‌ها به عنوان گره منظور شده‌اند. مهمترین مشخصه‌ی تأثیرگذار ریل، سختی خمشی ریل (EI) می‌باشد که با توجه به بزرگ بودن آن عموماً تغییر شکل‌های ریل محدود بوده و در محدوده‌های پایین می‌باشد.

۲-٤-۲. سیستم اتصال

بالشتک لاستیکی زیر ریل که به‌صورت لایه ارتجاعی عمل می‌کند به صورت یک فنر رابط (لینک متصل کننده ریل به دال بتنی) مدل شده است. این فنر در جهت‌های طولی و عرضی ریل و در سه جهت دورانی گیردار گردید تا فقط در جهت قائم با اعمال سختی‌های متفاوت امکان شبیه سازی نشست را داشته باشد. شکل ٤ نحوه اتصال ریل به دال توسط لینک در نرم‌افزار را به نمایش می‌گذارد.



شکل ۴. نحوه اتصال ریل به دال توسط لینک در نرم‌افزار

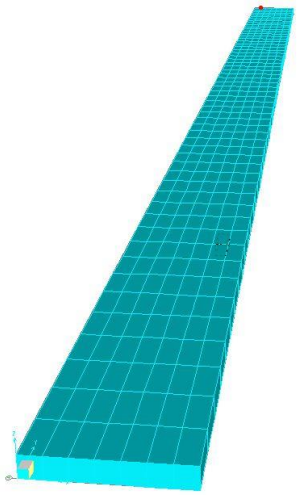
۲-٤-۳. مدل‌سازی دال بتنی

تحلیل تیر یا دال روی بستر ارتجاعی به دو صورت تیر با تکیه‌گاه‌های ارتجاعی پیوسته یا ناپیوسته صورت می‌گیرد. بررسی‌های صورت گرفته در خصوص راه‌آهن نشان می‌دهد که به دلیل نزدیک بودن تکیه‌گاه‌ها (محل اتصال پابندها) تفاوت بین دو روش فوق‌الذکر بین ۳ تا ۵ درصد می‌باشد. لذا در این تحقیق، دال خط به حالتی که در شکل ۵ نمایش داده شده به صورت شبکه ۷×۵۸ المان-

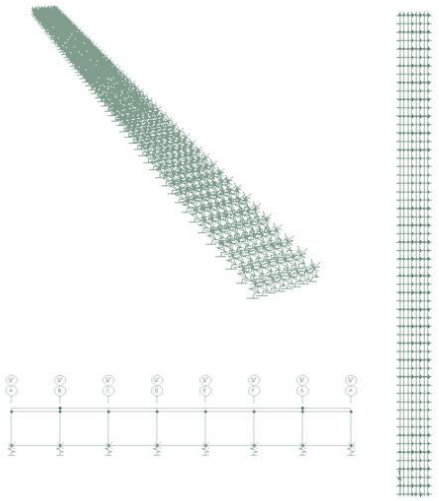
بندی شده است (کر، ۲۰۰۰). همچنین، دال بتنی با ۳ ضخامت متفاوت ۲۰، ۲۵ و ۳۰ سانتی‌متر مدل گردید. اندازه هر شبکه ۲۸/۷×۶۰ سانتی‌متر می‌باشد.

۲-٤-٤. مدل‌سازی بستر

المان‌های بستر با ٤۰٦ تکیه‌گاه که هر کدام در عرض ۲۸/۷ سانتی‌متر و در طول ۶۰ سانتی‌متر از همدیگر فاصله دارند، مدل گردید. شکل ۶ نمای کلی تکیه‌گاه‌ها را به نمایش می‌گذارد. در هر یک از تکیه‌گاه‌های فوق، حرکت در دو جهت طولی و عرضی دال و همچنین در تمام جهت‌های دورانی بسته شده و المانی فنری جهت مدل‌سازی سختی قائم خط زیر هر یک از تکیه‌گاه‌ها مدل شده است. شکل ۵ نحوه اعمال سختی قائم در هریک از تکیه‌گاه‌ها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در نقاط کناری سختی قائم فنر تکیه‌گاه‌ها نصف نقاط داخلی و در گوشه‌های مدل یک چهارم مقدار فوق اعمال شده است.



شکل ۵. شبکه‌بندی دال بتنی

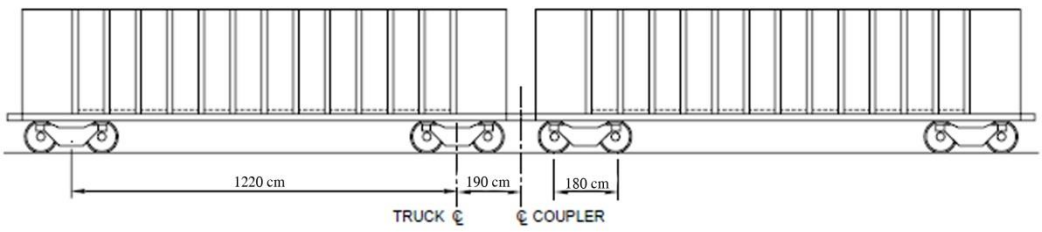


شکل ۶. نمای کلی المان‌های بستر

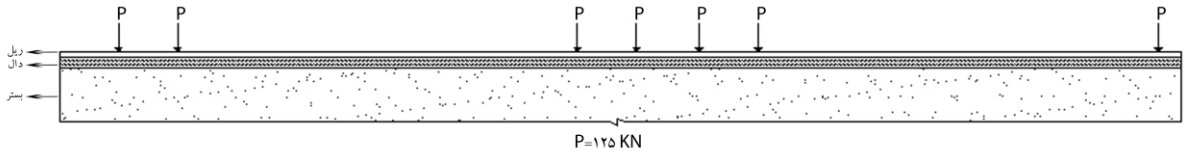
همچنین به علت تحلیل استاتیک مدل و عدم منظور کردن ارتعاشات حاصل از حرکت قطار، از خاصیت میرایی بستر در مدل‌سازی صرف‌نظر شده است.

۲-۵. بارگذاری مدل

دال خط انتخابی با واگن‌هایی مشابه شکل ۷ بارگذاری گردید. بار محوری این واگن‌ها مطابق بارگذاری کوپر و UIC برابر ۲۵۰ kN و بار هریک از چرخ‌ها ۱۲۵ kN به صورت نقطه‌ای انتخاب و در مدل‌سازی روی ریل‌ها اعمال شد. به‌دلیل عدم تأثیر بارهای جانبی بر سختی قائم خط، هیچگونه بار عرضی یا طولی در نقاط تماس چرخ با ریل وارد مدل نشده است و فقط تأثیر سختی قائم خط برای بارهای استاتیک قائم مدل‌سازی شده است. سازه دال خط و موقعیت بارهای چرخ در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۷. واگن مدل‌سازی شده



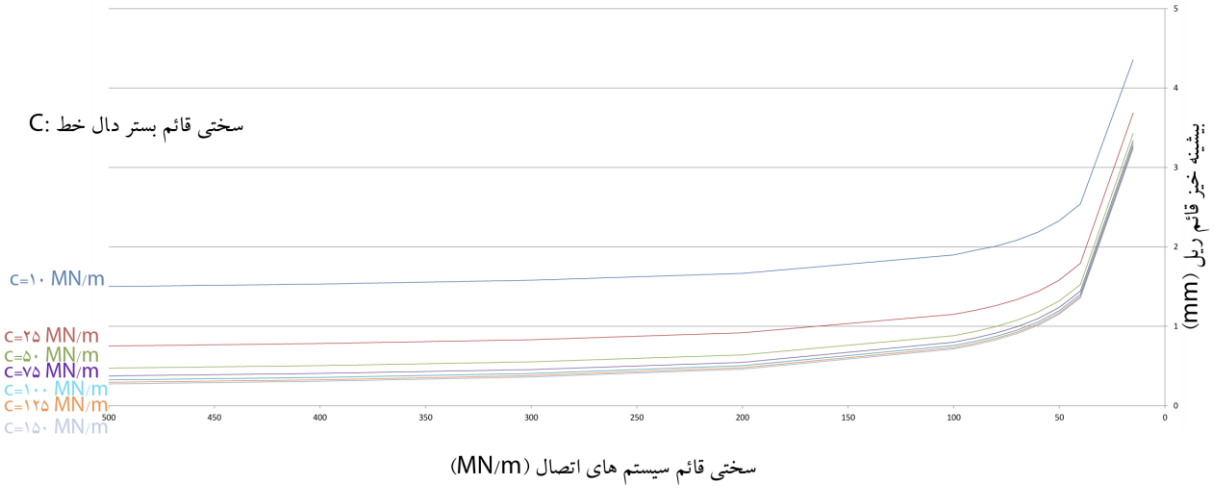
شکل ۸. بارگذاری مدل انتخابی

۳. تحلیل حساسیت پارامترهای تأثیرگذار و تفسیر نتایج

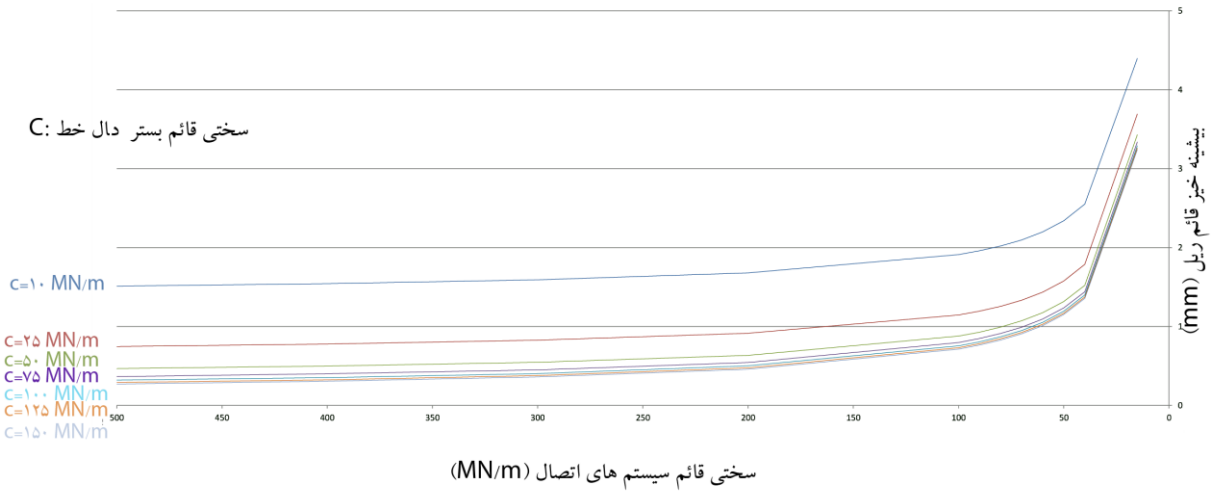
با توجه به مدل‌سازی صورت گرفته، با تغییر یکی از پارامترهای تأثیرگذار، خیز قائم ریل محاسبه و کنترل گردید. در این تحلیل‌ها، با تغییر ضخامت دال و استفاده از بالشتک‌های لاستیکی با ۷ سختی متفاوت و بستر خط آهن با ۱۲ سختی مطابق جدول ۳ محاسبات لازم صورت گرفت. مقادیر این سختی‌ها از مروری بر ادبیات فنی موضوع و گزارش‌های فنی موجود به‌دست آمده است (قربانی، ۱۳۸۸). در شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نمودارهای تغییرات خیز قائم ریل نسبت به تغییرات سختی قائم سیستم‌های اتصال با دال‌های به ضخامت ۳۰، ۲۵ و ۲۰ سانتی‌متر نشان داده شده‌اند.

جدول ۳. کمیت‌های انتخابی برای تحلیل حساسیت

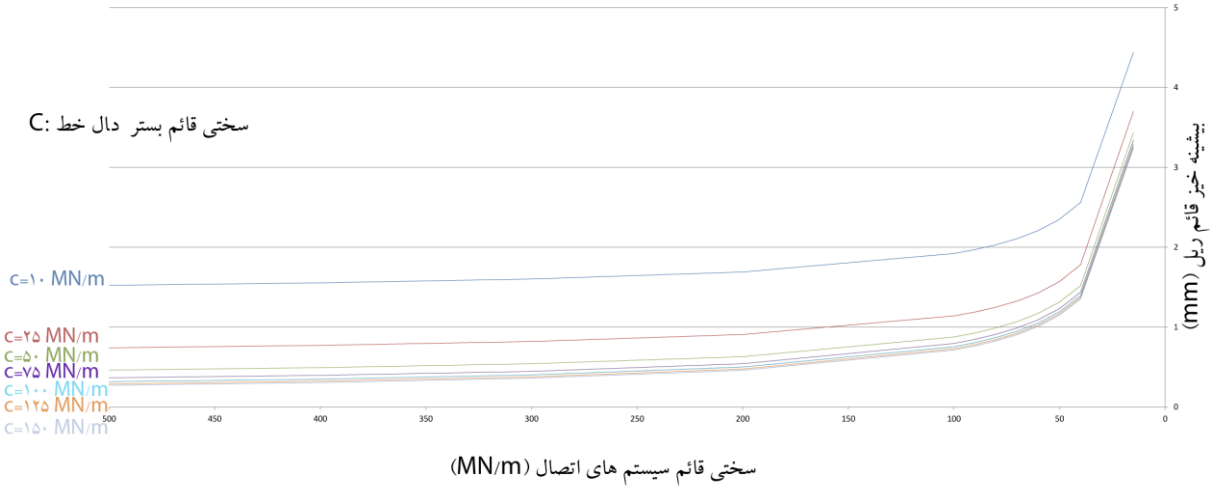
پارامتر سازه‌ای	کمیت‌های انتخابی	واحد
ضخامت دال	۲۰، ۲۵ و ۳۰	سانتی‌متر
سختی قائم بالشتک لاستیکی	۱۵–۵۰–۱۰۰–۲۰۰–۳۰۰–۴۰۰–۵۰۰	MN/m
سختی قائم بستر دال خط	۱۰–۲۵–۴۰–۵۰–۶۰–۷۰–۷۵–۸۰–۹۰–۱۰۰–۱۲۵–۱۵۰	MN/m



شکل ۹. نمودار تغییرات خیز قائم ریل نسبت به تغییرات سختی قائم سیستم‌های اتصال با دال ۳۰ cm



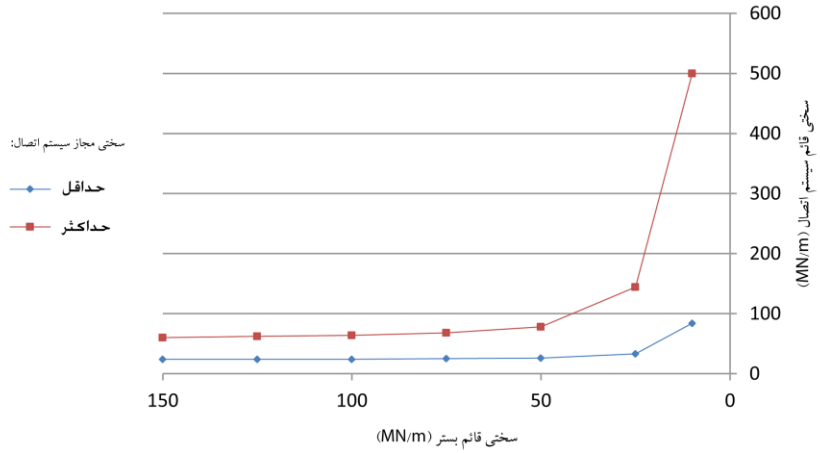
شکل ۱۰. نمودار تغییرات خیز قائم ریل نسبت به سختی قائم سیستم‌های اتصال با دال ۲۵ cm



شکل ۱۱. نمودار تغییرات خیز قائم ریل نسبت به سختی قائم سیستم‌های اتصال با دال ۲۰ cm

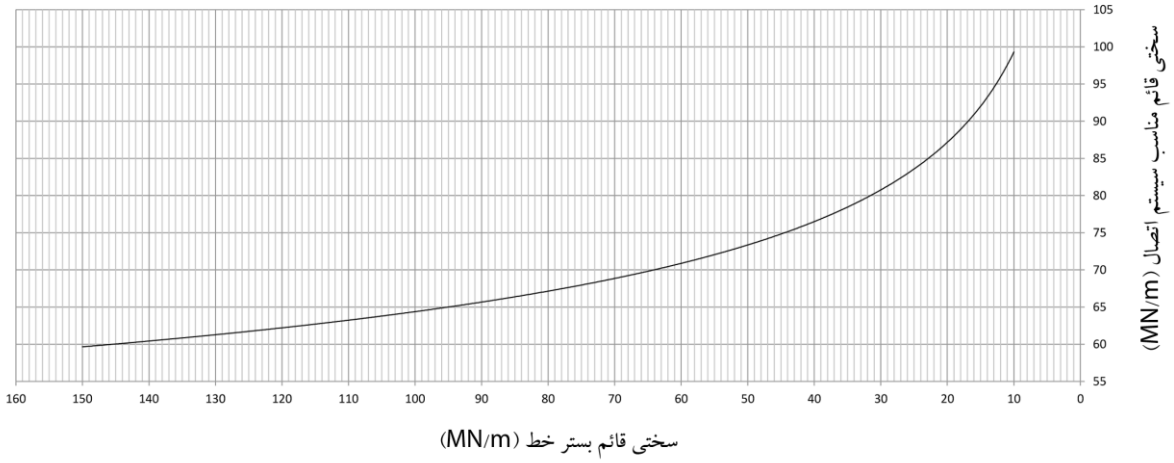
با تطبیق شکل‌های ۹ تا ۱۱ و مقایسه خیز قائم دال خط مشاهده می‌شود که تغییرات ضخامت دال در محدوده مورد بررسی تأثیر چندانی بر خیز قائم خط ندارد. لذا دال ۳۰ سانتی‌متری (ضخامت متعارف) برای انجام تحلیل و نتیجه‌گیری در ادامه مقاله انتخاب گردیده است.

با انقطاع خطوط خیز مجاز ریل در شکل‌های ۹ تا ۱۱ در محدوده ۱ تا ۲ میلی‌متر، محدوده مناسب سختی قائم حداکثر و حداقل سیستم اتصال برای هر بستر به‌دست می‌آید که در نمودار شکل ۱۲ به نمایش درآمده است.



شکل ۱۲. محدوده مناسب سختی قائم سیستم اتصال برای هر بستر

با توجه به محدوده مناسب سختی قائم سیستم اتصال در شکل ۱۲، برای هر بستر سختی قائم مناسب سیستم اتصال پیشنهاد شده است. شکل ۱۳ نمودار سختی قائم مناسب سیستم اتصال را با توجه به تغییرات سختی قائم بستر خط برای دال به ضخامت ۳۰ سانتی‌متر نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. نمودار تعیین سختی قائم مناسب سیستم اتصال با توجه به تغییرات سختی قائم بستر خط

نوآوری این مقاله ارائه روشی ابتکاری برای تعیین سختی مناسب سیستم اتصال ریل به دال با در نظر گرفتن سختی بستر می‌باشد. لازم به ذکر است که اصلی‌ترین مورد استفاده از نمودار شکل ۱۳ برای تعیین سیستم اتصال مناسب برای بسترهای مطالعه شده در مسیر خط آهن می‌باشد. همچنین، با توجه به کاهش شیب نمودار با افزایش مقادیر سختی بستر، مشخص می‌شود که ساخت خطوط بدون بالاست روی بسترهای با سختی قائم کم (کمتر از ۵۰ MN/m) مناسب نمی‌باشد. به همین دلیل است که در طراحی خطوط بدون بالاست، اغلب از لایه محافظ با EV_2 بیش از ۱۳۰ MN/m استفاده می‌شود (ذاکری و عباسی، ۲۰۱۲).

٤. نتیجه‌گیری

مدول خط و سختی استاتیک خط تأثیر زیادی بر نیروی تماسی چرخ و ریل داشته و در طراحی اجزای روسازی ریلی مد نظر قرار می‌گیرد. لذا، با توجه به اهمیت موضوع

و ارتباط مستقیم آن با خیز قائم خط، در این مقاله سعی گردید سازه دال خط با اجزای تأثیرگذار بر سختی قائم مدل‌سازی شده و پس از اعمال بارهای استاتیک نتایج محاسبات ارائه شود. سپس، با ارائه روشی ابتکاری، با انجام تحلیل حساسیت خیز قائم دال خط نسبت به تغییرات سختی قائم اجزای تأثیرگذار خط، با معیار قرار دادن خیز مجاز آیین‌نامه‌ای، سختی مناسب پابندها برای بسترهای متفاوت تعیین و پیشنهاد شود. با توجه به تحلیل فوق، نمودار شکل ۱۳ به عنوان نمودار تعیین سختی اجزای خط پیشنهاد گردید. همچنین، مشخص گردید که با توجه به تغییرات شدید شیب نمودار خیز قائم نسبت به تغییرات سختی قائم بستر، از ساخت خطوط بدون بالاست روی بسترهای با سختی قائم کمتر از ۵۰ MN/m خودداری شود.

۵. مراجع

اسماعیلی، م. ۱۳۹۰. "خطوط ریلی بدون بالاست: کاربردها و الزامات". انتشارات مرکز تحقیقات راه‌آهن، تهران.

بهلول زاده، ج. ۱۳۹۱. "تعیین سختی مناسب دال خط‌ها با توجه به تغییرات خیز قائم ریل". پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان.

ذاکری، ج.ع. ۱۳۹۱. "جزوه درسی اندرکنش دینامیکی خط و قطار". انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

قربانی، و. ۱۳۸۸. "ارزیابی مشخصات دینامیکی اجزای خط آهن در مدل‌های موجود". سمینار کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران.

محمدزاده، س. و یلداشخان، م. ۱۳۸٦. "اصول مهندسی خط راه‌آهن". انتشارات مرکز آموزش عالی علمی کاربردی راه‌آهن.

Bilow, D. N. and Randich, G. M. 2000. "Slab Track for the Next 100 Years". AREMA Rail Transit Conference.

Ebersohn, W., Trevizo, M. C. and Selig, E. T. 1993. "Effect of Low Track Modulus on Track Performance". International Heavy Haul Association, Proc. of Fifth International Heavy Haul Conference, pp. 379-388.

Kerr, A. D. 2000. "On the determination of the rail support modulus k". Intl. J. Solids Struct. 37: 4335-4351.

Khordehbinan, M. W. 2009. "Investigation on the effect of railway track support system characteristics on the values of track modulus". Master of Science Thesis, University of Tehran.

Manual for Railway Engineering. 1999. "American Railway Engineering and Maintenance of Way Association". Landover, Maryland, USA, Volume 1.

Zakeri, J. A. and Abbasi, R. 2012. "Field investigation of variation of rail support modulus in ballasted railway track". Latin Amer. J. Solids Struct. 9: 643-656.

Zarembski, A. M. and Palese, J. 2003. "Transitions eliminate impact at crossings". Railway Track and Struct., August issue.