

تأثیر اجزای روسازی راه آهن در کمانش خطوط جوشکاری پیوسته

فریدون مقدس نژاد*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
وحید نژادسیفی، دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران
مسعود فتحعلی، دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

E-mail: moghadas@aut.ac.ir

دریافت: ۱۳۸۹/۰۴/۰۱ - پذیرش: ۱۳۹۰/۰۲/۱۳

چکیده

توسعه کاربرد ریل جوشکاری پیوسته (CWR) در ساختار خط ریلی، حوادث خروج از خط زیادی را که ناشی از کمانش خط در اثر تنش‌های حرارتی فشاری بالا بوده‌اند، به‌ویژه در محل قوس در پی داشته است. رفتار واقعی پدیده کمانش خط ریلی، اندرکنش پیچیده در مدهای قائم، جانبی و پیچشی را شامل می‌شود که در وقوع آن، عوامل مختلف محیطی، هندسی، بهره‌برداری و سازه‌ای دخیل‌اند. در تحقیق پیش‌رو، تأثیرات اجزای مختلف روسازی شامل ریل، تراورس، ادوات اتصال و مصالح بالاست بر روی پایداری جانبی خطوط جوشکاری پیوسته ارایه شده است. برای این منظور، مطالعات پارامتریک برای خطوط واقع در مسیر مستقیم و قوسی با بهره‌گیری از مدل سه بعدی توسعه یافته با استفاده از زبان برنامه‌نویسی APDL نرم‌افزار ANSYS صورت گرفته است. صحت مدل توسعه یافته با مقایسه نتایج یک مسئله معین با نتایج موجود تئوریک (نتایج مذکور با تعدادی آزمون‌های انجام شده در مقیاس واقعی مقایسه و صحت‌سنجی شده‌اند) کنترل شده است. نتایج تحقیق نشان دادند که مصالح بالاست و ریل‌ها بیشترین تأثیر را بر پایداری جانبی خط از دیدگاه روسازی داشته‌اند.

واژه‌های کلیدی: کمانش، پایداری، جوشکاری پیوسته، روسازی، بالاست

۱- مقدمه

مستقیم و قوسی [Samavedam, G., 1995]، روش انرژی Esveld,] CWERRI [Miyay, T., 1985] و برنامه نرم‌افزاری [C., 1997] انجام گرفته است. همچنین مطالعات پراکنده‌ای توسط دانشمندان مختلف در ایران [ج. ذاکری و س. محمدزاده ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸] و در خارج از کشور ارایه شده است [Tew, G., Markine, V. L. and Esveld, Kerr, A. D., 1980, 1989]. این مطالعات اگرچه نتایج ارزشمندی را به دنبال داشته‌اند، دربرگیرنده تمام شرایط موجود خط، مانند هندسه واقعی، خصوصیات بارگذاری و خواص مصالح به‌صورت یکپارچه نبوده و در برخی مواقع از فرضیات غیرواقعی برای تسهیل شرایط مدل‌سازی نظیر مدل‌سازی یک بعدی یا دو بعدی

از مسایل عمده موجود در خطوط با ریل‌های جوشکاری پیوسته، تأثیر افزایش درجه حرارت و به تبع آن ایجاد نیروهای محوری بالا در ریل است که می‌تواند منجر به کمانش جانبی خط شود. با توجه به آن که جابه‌جایی جانبی بیش از حد خط باعث خروج از خط قطار و خسارات زیادی می‌شود، شناخت عوامل مؤثر در پایداری جانبی خط به‌خصوص از دیدگاه اجزای روسازی ضروری است تا طراح بر مبنای تأثیر پارامترهای مختلف، بتواند روش‌های مناسبی را برای طراحی خطوط جدید و یا اصلاح خطوط موجود اتخاذ کند. در مورد کمانش جانبی ریل‌های پیوسته جوش شده تحقیقات مختلفی شامل روش‌های کلاسیک اولیه و تکمیلی برای خط

اعوجاج اولیه‌ای به طول XM و به شکل یک نیم موج سینوسی با دامنه XI دارد و دقیقاً در وسط مسیر قرار گرفته است. همچنین برای مسیر مستقیم، تمامی پارامترها به غیر از شعاع قوس به صورت مشابه هستند. در عین حال با توجه به خرابی عرضی متداول در خطوط مستقیم [Van, 1997]، حالت پایه برای این خطوط به صورت دو یا سه نیم موج سینوسی مبنای قرار گرفته است. مقادیر مرجع مشخصات هندسی مربوط به هر یک از خطوط قوسی و مستقیم در جدول (۱) قابل ملاحظه است.

این برنامه قابلیت‌های منحصر به فردی دارد که تاکنون در مدل‌های عددی موجود، مورد استفاده قرار نگرفته است. در این مدل به منظور افزایش دقت و تعیین حساسیت پارامترهای مختلف، برخلاف مدل‌های موجود، کل خط مدل‌سازی شده است تا بتوان اثر عوامل مختلفی همچون جابه‌جایی نقاط روی ریل داخلی و خارجی، اثر تسلیم شدن سطح مقطع ریل و تنش‌های موجود در قسمت‌های مختلف را به سادگی محاسبه کرد و پایداری خط را در صورت لزوم کنترل کرد.

همچنین برای مدل‌سازی قسمت مستقیم خط در ابتدا و انتهای مسیر به جای استفاده از فنر معادل از خود المان ریل استفاده می‌شود، به این ترتیب که به اندازه فاصله دو تراورس متوالی از یکدیگر، ابتدا و انتهای خط بزرگ‌تر ساخته می‌شود تا المان ریل ابتدایی و انتهایی رفتار قسمت مستقیم خط را مدل نماید. در انتهای این المان‌ها تمام درجات آزادی به عنوان شرایط مرزی بسته می‌شوند.

از آنجا که ریل المانی با مصالح غیرخطی است، مانند یک فنر غیرخطی معادل، مورد استفاده در مرجع [Esveld, 1997] عمل می‌کند و از لحاظ منطقی بسیار واقع‌بینانه‌تر از فنر معادل است. برای اعمال سایر شرایط مرزی، از جزء المان ریل بهره گرفته شده است، به طوری که گره کناری ریل برای مدل‌سازی رفتار طولی بالاست و قرار دادن فنر طولی معادل، گره برای مدل‌سازی رفتار قائم بالاست و قرار دادن المان معادل، گره بیرونی ریل خارجی برای مدل‌سازی رفتار جانبی بالاست و قرار دادن فنر طولی معادل و گره بالای ریل برای مدل‌سازی مقاومت پیچشی پاندها و قرار دادن المان معادل استفاده شده است. در ادامه به تشریح مشخصات مکانیکی مدل پرداخته می‌شود.

بهره جسته‌اند. ارایه تأثیر اجزای روسازی نیز کمتر در این مطالعات مورد اشاره و ارزیابی واقع شده است.

در این مقاله با بهره‌گیری از مدل سه بعدی توسعه یافته کماتش که صحت آن مورد کنترل و تأیید واقع شده است و با در نظر گرفتن شرایط معین هندسی (مسیر مستقیم و قوسی) و بهره‌برداری، تأثیر اجزای مختلف روسازی شامل ریل، تراورس، اتصالات و مصالح بالاست در کماتش خط ریلی بررسی و ارزیابی شده است. به این منظور و طی مطالعه پارامتریک اجزای روسازی، بیشینه درجه حرارت کماتش و نیز بیشینه تغییر مکان جانبی خط تعیین و مهم‌ترین عوامل مؤثر در پدیده کماتش تشریح شده است.

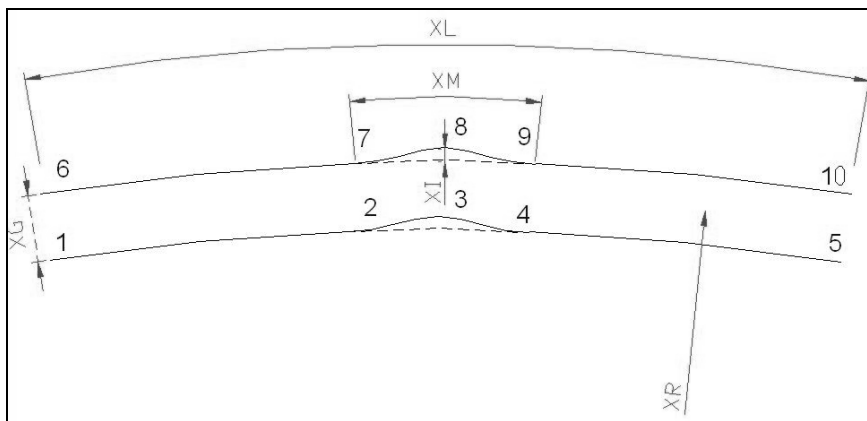
۲- فرآیند توسعه مدل کماتش

مدل توسعه یافته شامل یک برنامه‌نویسی با استفاده از زبان APDL در نرم‌افزار Ansys است که به صورت سه بعدی به تحلیل کماتش خط ریلی پرداخته است و مشخصات هندسی مسیر، خواص مکانیکی مصالح و شرایط بارگذاری را در بر می‌گیرد. از این رو می‌توان به راحتی انواع هندسه خط را با شرایط بارگذاری مختلف مدل‌سازی کرد و خواص مصالح هر قسمت را در محاسبات در نظر گرفت [مقدس نژاد و نژادسیفی، ۱۳۸۶]. اساس کماتش خط با استفاده از منحنی رابطه بین افزایش دما از درجه حرارت تنش خنثی و جابه‌جایی جانبی خط نمایش داده می‌شود.

این منحنی، شرایط گذار را از حالت پایدار به حالت ناپایدار کماتشی ارایه می‌کند. به طوری که در آن دمایی تحت عنوان دمای بیشینه یا بحرانی کماتش تعریف می‌شود که در این درجه حرارت گذار از حالت پایدار به حالت ناپایدار اتفاق می‌افتد. بنابراین دمای کمتر از این مقدار باعث جلوگیری از کماتش جانبی ریل می‌شود.

۲-۱- هندسه مدل و شرایط مرزی

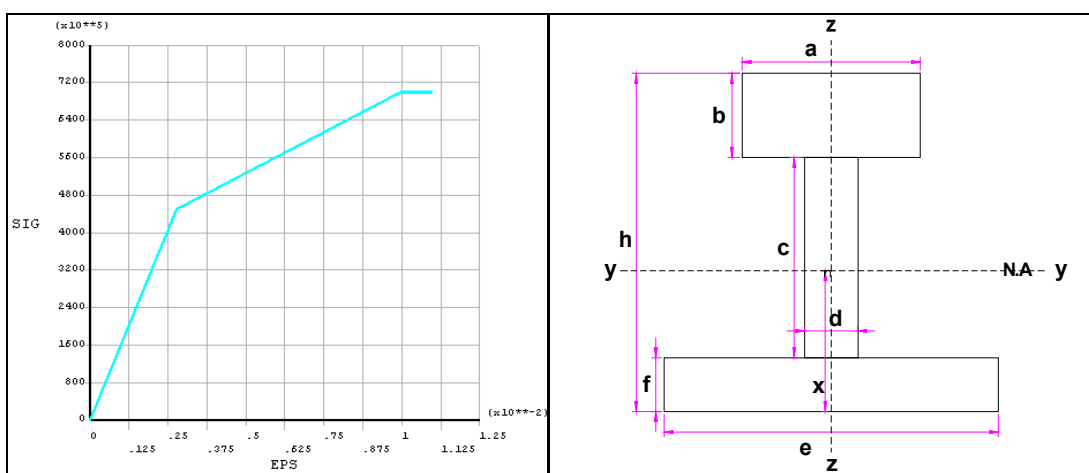
به منظور انجام تحلیل پارامتری، هر دو مسیر قوسی و مستقیم به صورت پارامتریک در نظر گرفته شده است (شکل ۱). مسیر قوسی به شعاع XR، طول XL و عرض خط XG است که



شکل ۱. مشخصات پارامتریک هندسه مسیر

جدول ۱. مشخصات هندسی مدل توسعه یافته

واحد	مقدار مرجع			دامنه	شرح	نماد	ردیف
	مسیر مستقیم ۱	مسیر مستقیم ۲	مسیر قوسی				
-	۱	۱	۰	۱-۰	نوع مسیر	XATYPE	۱
-	۱	۱	۱	۱-۰	وجود خرابی عرضی	XAIIE	۲
[m]	۰	۰	۴۰۰	۱۰۰۰۰-۰	شعاع قوس	XR	۳
[m]	۵۰	۵۰	۵۰	۱۱۰-۲۰	طول خط	XL	۴
[m]	۹	۹	۹	۱۷-۱	طول خرابی عرضی	XM	۵
[m]	۰/۰۳۵	۰/۰۱۸	۰/۰۱۸	۰/۰۵-۰/۰۰۵	دامنه خرابی عرضی	XI	۶
[m]	۰/۶	۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۶۵-۰/۵	فاصله تراورس	XH	۷
[m]	۱/۴۳۵	۱/۴۳۵	۱/۴۳۵	۱/۶۷۲، ۱/۴۳۵، ۱	عرض خط	XG	۸
[m]	۰/۱۰	۰	۰	۰/۱۶-۰	دور	Xh _C	۹
-	۱	۲	۳	۳-۱	تعداد خرابی های عرضی	XNHWS	۱۰



شکل ۲. مدل ریل الف) منحنی تنش - کرنش ب) مقطع عرضی تعریف شده

۲-۲- مشخصات مکانیکی مدل

برای مدل‌سازی اجزای خط از المانهای مختلفی بهره گرفته شده است. مدل‌سازی جزء ریل با استفاده از المان تیر (BEAM189) انجام شده که با بهره‌گیری از آن می‌توان خواص منحنی تنش- کرنش (شکل ۲-الف) را به راحتی مدل کرد. همچنین مقطع I شکل تقریبی این المان در شکل (۲-ب) ارائه شده است. نوع ریل در حالت مبنا UIC60 فرض شده که متداول‌ترین ریل مورد استفاده در شبکه راه آهن ایران است و در سایر حالات UIC54 و UIC50 به عنوان ریل‌های معمول در خطوط اصلی ریلی مورد ارزیابی واقع شده‌اند. در عین حال، ارزیابی سایر ریل‌ها از جمله ریل U33 در خطوط فرعی نیز امکان‌پذیر و عملکرد آن با توجه به نتایج حاصل از سایر ریل‌ها قابل تخمین زدن است.

اگرچه در خطوط فرعی از ریل‌های جوشکاری پیوسته بهره گرفته نمی‌شود، اما برای ارزیابی مقایسه این ریل نیز در تحلیل‌ها مد نظر قرار گرفته شده است. مقادیر مدول الاستیک و مدول برشی، ضریب انبساط حرارتی و نیز ضریب پواسون به ترتیب $2/1 \times 10^7 N/cm^2$ ، $8/1 \times 10^6 N/cm^2$ ، $11/5 \times 10^{-6} / ^\circ C$ و $0/3$ اختیار گردید [نشریه ۳۰۱ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۸۴].

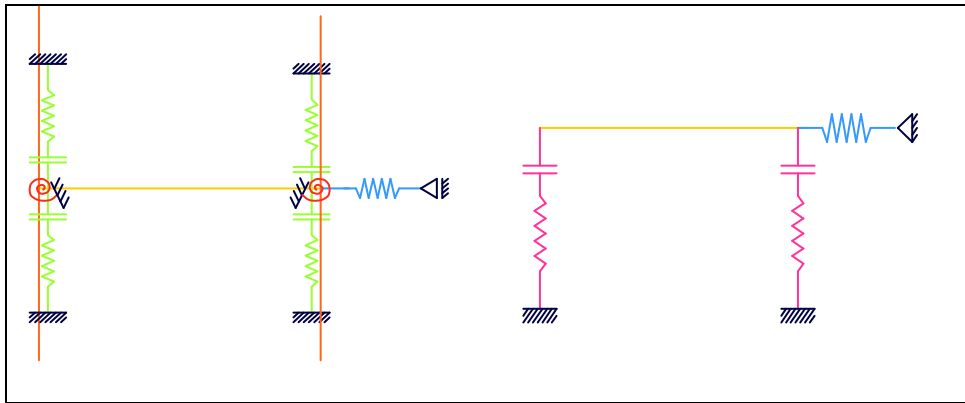
از المان خرپا (LINK8) نیز برای مدل‌سازی تراورس استفاده شده است که یک المان سه‌بعدی است و می‌تواند نیروی فشاری یا کششی را تحمل کند (شکل ۳). لازم به ذکر است که گرچه تراورس به عنوان یک المان خمشی- برشی در ساختار خط ریلی عمل می‌کند، اما عملکرد آن در بررسی کمانش جانبی خط ریلی به صورت کششی یا فشاری می‌باشد و از این رو از المان خرپایی در اینجا استفاده شده است. هر دو نوع تراورس معمول بتنی و چوبی با به ترتیب وزن ۲۹۰ و ۹۰ کیلوگرم، سطح مقطع $389/5$ و $246/5$ سانتیمتر مربع و ضریب اصطکاک با مصالح بالاست چوبی $0/86$ و $1/2$ در مدل‌سازی در نظر گرفته شده است. مدل‌سازی رفتاری سیستم اتصالات نیز با بهره‌گیری از یک المان دو نقطه‌ای با طول صفر و با در نظر گرفتن درجات آزادی انتقالی و چرخشی مشابه شکل (۳-الف) صورت گرفته است.

مدل‌سازی رفتار بالاست در جهات قائم، جانبی و طولی مد نظر است. معمولاً رفتار قائم بالاست و مصالح بستر، توسط یک المان با رفتار خطی مدل‌سازی می‌شود. از این رو المان Contact52

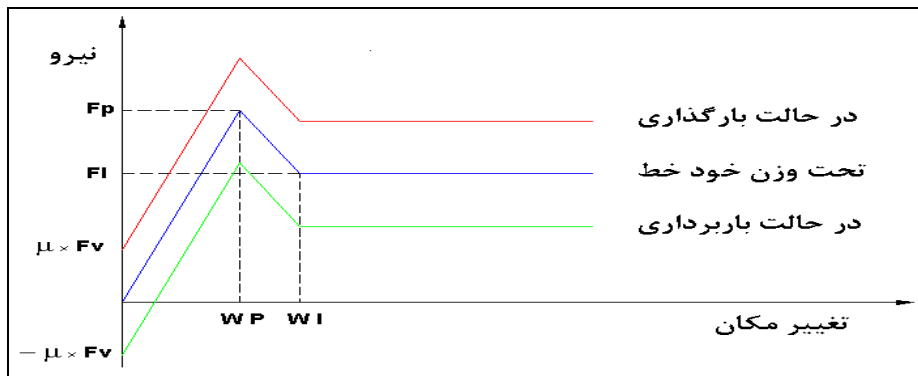
برای شبیه‌سازی رفتار قائم بالاست و مصالح بستر به کار می‌رود. در عین حال نمودار بار- تغییر مکان جانبی بالاست مطابق شکل (۴) و به صورت الاستو- پلاستیک (غیرخطی) با رفتار نرم‌شوندگی قابل‌ارایه است [Esveld, C., 2007]. در این نمودار F_p مقاومت پلاستیک بالاست بدون وزن خود ریل و بارگذاری اضافی متناظر با تغییر مکان W_p و F_L مقاومت نهایی بدون وزن خود ریل و بارگذاری اضافی متناظر با تغییر مکان W_L است. نکته قابل توجه آن است که تعریف منحنی بار- تغییر مکان بالاست تحت حالت باربرداری در نرم‌افزار محاسبه می‌شود (برای این کار کافی است که در منحنی تحت وزن خود خط از مقادیر F_p و F_L مقداری به اندازه ضریب اصطکاک ضرب در وزن خود خط کم کرد) و سپس به صورت موازی، اثر نیروی ثقل و بار وارده توسط دستوره‌های مربوطه در نظر گرفته می‌شود تا رفتار جانبی پیشنهادی بر مبنای شرایط واقعی مدل شود.

بر مبنای الگوی مقاومت جانبی بالاست، از ترکیب المان فنر غیرخطی Combin39 و نیروی اصطکاک المان Contact52 استفاده می‌شود. در مدل‌سازی، المان فنری Combin3 برای مدل‌سازی رفتار جانبی بالاست ناشی از وجود بالاست انتهایی تراورس‌ها و اصطکاک دیواره تراورس و بالاست به کار می‌رود و المان Contact52 علاوه بر خاصیت ارتجاعی بستر اصطکاک بین کف تراورس و بالاست را به صورت تابعی از بار قائم مدل‌سازی می‌کند. بنابراین، منحنی بار- تغییر مکان شکل (۴) را به راحتی می‌توان توسط این دو المان تعریف کرد.

برای مدل‌سازی رفتار طولی بالاست نیز از المان Combin39 استفاده می‌شود. بالاست در جهت طولی خود رفتار غیرخطی دارد. مقاومت تسلیم طولی بالاست زیاد و در حدود ۱۰ کیلو نیوتن به ازای هر تراورس است. به دلیل مقاومت تسلیم زیاد بالاست در بسیاری از مدل‌ها، به جای استفاده از المان غیرخطی از المان فنر خطی استفاده می‌شود. علاوه بر این نیروها، نیروی اصطکاک بین کف تراورس و بالاست که توسط المان Contact52 تعریف می‌شود در مقاومت طولی بالاست مؤثر است. به طور کلی مقادیر مربوط به مشخصات مکانیکی مدل توسعه یافته براساس داده‌های تجربی [Van, M. A., 1997 and Tew, G., 1989] در جدول (۲) ارائه شده است.



شکل ۳. مدل تراورس - سیستم اتصالات الف) نمای از بالا ب) مقطع عرضی



شکل ۴. مدل مورد استفاده برای رفتار جانبی بالاست

جدول ۲. پارامترهای مربوط به خواص مصالح

ردیف	نماد	شرح	دامنه	مقدار مرجع	واحد
۱	XFP	مقاومت پلاستیک بالاست	۱۰۰۰۰ ~ ۲۶۲۶۲	۱۷۶۰۰	[N] در متر خط
۲	XWP	جابه‌جایی پلاستیک بالاست	۰/۰۰۵ ~ ۰/۰۳۵	۰/۰۰۶۵	[m]
۳	XFL	مقاومت نهایی بالاست	۵۵۰۰ ~ ۱۴۴۴۵	۹۵۰۰	[N] در متر خط
۴	XWL	جابه‌جایی نهایی بالاست	۰/۰۱۵ ~ ۰/۰۵	۰/۰۳۶	[m]
۵	XKL	سختی طولی بالاست	۱۰۰۰۰۰ ~ ۱۰۰۰۰۰	۳۱۰۰۰۰۰	[N/m] در متر خط
۶	XKT	سختی پیچشی پابند	۰ ~ ۳۰۰۰۰۰	۱۱۲۰۰۰	[N/rad] در متر خط
۷	XKN	سختی قائم بالاست	۲۶۰۰۰۰۰ ~ ۱۱۱۰۰۰۰۰۰	۶۸۷۰۰۰۰۰	[N/m] در متر خط
۸	XNUI	اصطکاک تراورس و بالاست	۰/۸۶ - ۱/۲	۰/۸۶	-
۹	XURPT	نوع ریل	۰ - ۱ - ۲ - ۳	۳	-
۱۰	XWS	وزن هر تراورس	۲۹۰ - ۹۰	۲۹۰	[kg]
۱۱	XAS	سطح مقطع هر تراورس	۰/۰۳۸۹۵ - ۰/۰۲۶۴۵	۰/۰۳۸۹۵	[m ²]

۲-۳- الگوی بارگذاری

در انجام تحلیل‌ها، از یک وسیله نقلیه استاندارد UIC با فاصله محورهای چرخ یک بوژی به اندازه ۲/۵۶ متر و فاصله مرکز به مرکز دو بوژی به اندازه ۱۵/۶۶ متر و به وزن محور استاندارد ۲۰۰ کیلونیوتن مطابق شکل (۵) استفاده شده که در وسط مسیر مورد تحلیل قرار گرفته است [فتحعلی، ذاکری و اسماعیلی، ۱۳۸۷].

سرعت وسیله نقلیه ۶۰ کیلومتر بر ساعت و مقدار بر بلندی متناظر با آن برای مسیر قوسی (۰/۱۰۱۵۸ متر) در نظر گرفته شده است. برای در نظر گرفتن شرایط خط به منظور محاسبه ضریب دینامیکی، ضریب وضعیت خط ۰/۱ مورد استفاده قرار گرفته که این مقدار یک مقدار متوسط برای خط نسبتاً خوب است [فتحعلی، ذاکری و اسماعیلی، ۱۳۸۷]. همچنین در این تحلیل از اثر نیروهای طولی ایجاد شده در اثر ترمز قطار و نیروی جانبی ناشی از وزش باد چشم‌پوشی شده است.

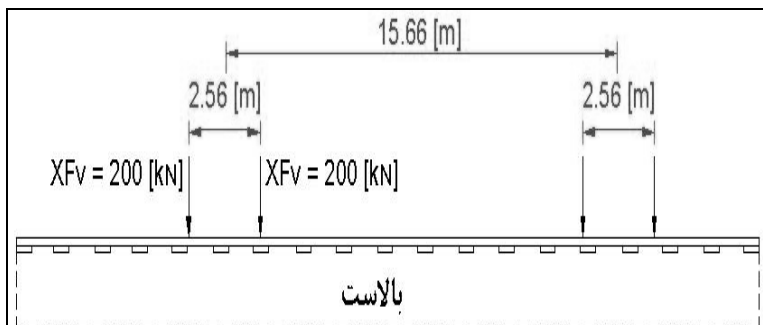
لازم به ذکر است که جهت انجام تحلیل‌های کمانش، تغییرات درجه حرارت برابر ۱۰۰ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است و بر مبنای دامنه تغییرات درجه حرارت مذکور، نرم‌افزار پیشینه درجه حرارت کمانش خط را در شرایط معرفی شده به عنوان معیار کنترل کمانش محاسبه می‌کند. به عبارتی، درجه حرارت ریل از مقدار صفر که بیانگر درجه حرارت تنش خستگی است به صورت تدریجی افزایش داده می‌شود. آخرین درجه حرارتی که مدل در آن همگرا می‌شود یا درجه حرارتی که در آن با افزایش بسیار جزئی دما تغییر مکان به صورت ناگهانی افزایش پیدا کند، پیشینه درجه حرارت کمانش خط خواهد بود.

۳- اعتبارسنجی مدل توسعه یافته

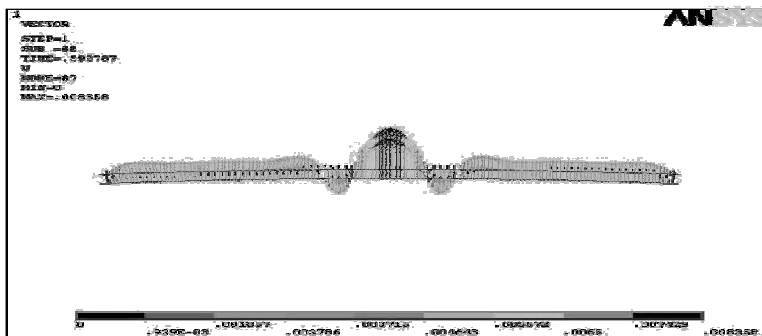
بر مبنای فرآیند تشریح شده توسعه مدل کمانش خط، انجام تحلیل‌های کمانش برای خطوط مستقیم و قوسی انجام گرفت. شکل (۶) نحوه کمانش خط قوسی و شکل (۷) نحوه کمانش خطوط مستقیم را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در مسیر قوسی کل خط به سمت خارج قوس حرکت کرده است. همچنین موج کمانش شامل یک نیم موج بزرگ در وسط و دو نیم موج کوچک در ابتدا و انتهای آن است. بررسی این خط نشان می‌دهد که نیم موج وسطی تقریباً به اندازه طول اعوجاج

اولیه است. به عبارت دیگر این موج ناشی از گسترش خرابی اولیه می‌باشد. محل‌های تقاطع نیم موج بزرگ و نیم موج‌های کوچک در محل شروع و پایان اعوجاج اولیه قرار دارند، بنابراین طول ناحیه کمانش بیشتر از طول خرابی اولیه است. بررسی‌ها نشان می‌دهند که نیم موج کوچک، طولی معادل ۲/۵ متر دارد و حداکثر تغییر مکان در نیم موج کوچک ۲/۳۲ میلی‌متر و در نیم موج بزرگ ۸/۳۶ میلی‌متر است.

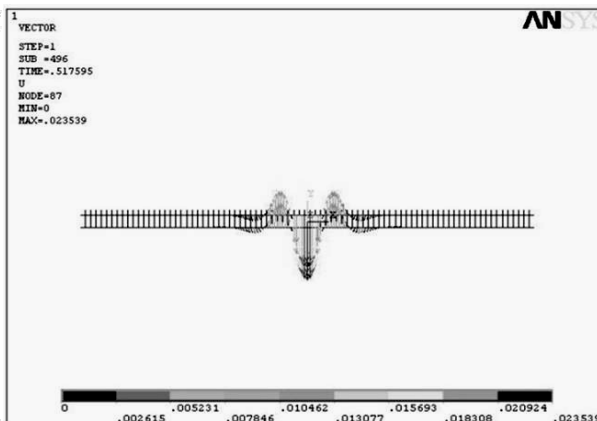
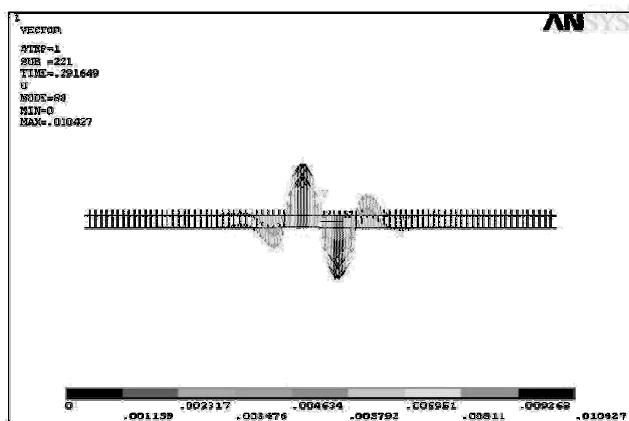
شکل موج کمانش در مسیر مستقیم نیز به تعداد خرابی‌های عرضی در نظر گرفته شده بستگی دارد. با در نظر گرفتن دو خرابی عرضی مشابه شکل (۷-الف)، دو نیم موج سینوسی بزرگ در مرکز و دو نیم موج سینوسی کوچک در کناره‌ها نتیجه شده که بیشترین تغییر مکان آنها به ترتیب ۹/۹۷ و ۲/۵۳ میلی‌متر است. برای حالت سه خرابی عرضی (شکل ۷-ب) مشابه حالت قوسی، یک نیم موج بزرگ در وسط و دو نیم موج کوچک در ابتدا و انتهای آن مشاهده می‌شود. همچنین پیشینه تغییر مکان خط در ناحیه موج بزرگ برابر ۲۳/۵۴ میلی‌متر و در ناحیه موج کوچک ۸/۴۳ میلی‌متر است. ملاحظه می‌شود که برخلاف خط قوسی در نواحی ابتدایی و انتهایی مسیر، هیچ‌گونه تغییر مکانی در جهت عرضی رخ نمی‌دهد و کمانش خط باعث ایجاد تغییر مکان عرضی در محدوده‌ای از وسط خط می‌شود. در اینجا هر سه نیم موج کمانش ناشی از گسترش موج‌های اعوجاج اولیه خط می‌باشد و بنابراین طول ناحیه کمانش تقریباً برابر طول خرابی اولیه است. برای کنترل صحت مدل توسعه یافته، از یک مسئله خاص که جواب آن از محاسبات تئوری (مدل مؤسسه ERRI تحت عنوان CWERRI [۳]) و نتایج مدل تفاضل محدود [Tew, 1989] مشخص بود، استفاده و نتایج مدل با آنها مقایسه شده است. لازم به ذکر است که هر یک از مدل‌های نام‌برده، با تعدادی از آزمایش‌های انجام شده در مقیاس واقعی که در آمریکا انجام شده بودند، مقایسه گردیده است و از این رو با نتایج میدانی نیز منطبق هستند. شکل ۸ مقایسه بین مدل‌های مذکور را که برای یک مسیر قوسی در نظر گرفته شده است، نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، شیب منحنی‌ها تقریباً با یکدیگر برابر است و پیشینه درجه حرارت کمانش خط محاسبه شده توسط برنامه اندکی بیشتر از پیشینه درجه حرارت کمانش مدل‌های موجود و پیشینه جابه‌جایی جانبی متناظر، کمتر از پیشینه جابه‌جایی جانبی در مدل‌های موجود است.



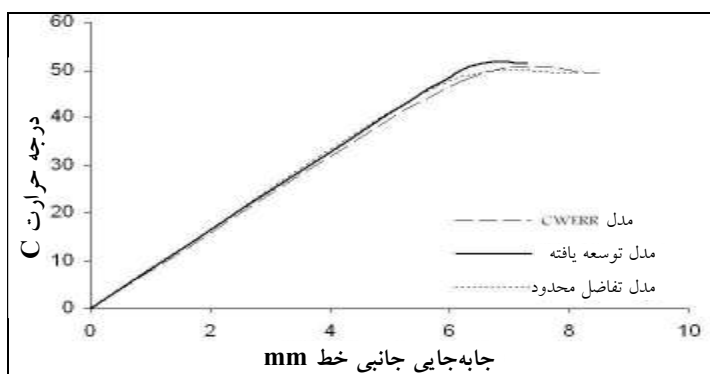
شکل ۵. مشخصات وسیله نقلیه استاندارد



شکل ۶. نحوه کمانش مسیر قوسی



شکل ۷. کمانش مسیر مستقیم (الف) دو نیم موج سینوسی (ب) سه نیم موج سینوسی



شکل ۸. مقایسه نتایج مدل‌های مختلف کنترل صحت مدل

افزایش ممان اینرسی ریل (یعنی از UIC50 به UIC60)، درجه حرارت کمانش برای مسیرهای قوسی و مستقیم در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد کاهش یافته و در عین حال بیشینه تغییر مکان جانبی با ۸ تا ۱۱ درصد افزایش همراه می‌شود.

۴-۲- نوع تراورس

نیروهای تولید شده در طول ریل با جوشکاری پیوسته در اثر افزایش درجه حرارت توسط تراورس به بالاست منتقل می‌شوند و از این رو تراورس‌ها به عنوان عامل انتقال نیرو عمل می‌کنند. تغییرات بیشینه درجه حرارت کمانش خط و بیشینه جابه‌جایی جانبی خط به صورت تابعی از نوع تراورس در محل قوس در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

ملاحظه می‌شود که نوع تراورس تأثیر زیادی در بیشینه جابه‌جایی جانبی خط ندارد. این مطلب نشان می‌دهد که هر چند اصطکاک بین تراورس چوبی و بالاست بیشتر از ضریب اصطکاک بین تراورس بتنی و بالاست است، ولی عملاً این ضریب و وزن متفاوت دو تراورس تأثیر زیادی در بیشینه درجه حرارت کمانش خط ندارد؛ زیرا اولاً بارهای اعمالی توسط وسیله نقلیه در ناحیه‌ای دورتر از ناحیه بحرانی برای کمانش قرار دارند و بنابراین تأثیر ضریب اصطکاک خیلی کم است. از طرف دیگر با وجود بزرگ‌تر بودن ضریب اصطکاک بین بالاست و تراورس چوبی نسبت به تراورس بتنی، وزن تراورس چوبی کمتر از تراورس بتنی است و این امر در ناحیه بحرانی برای کمانش که بار قائمی به آن وارد نمی‌شود، باعث می‌شود که حاصل ضرب مقدار ضریب اصطکاک در وزن تراورس برای هر دو نوع تراورس تقریباً مساوی باشند.

۴-۳- سختی پیچشی پابند

شکل (۱۱-الف) تغییرات بیشینه درجه حرارت کمانش خط را به ازای سختی پیچشی مختلف پابندها نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش سختی پیچشی پابند، بیشینه درجه حرارت کمانش خط را اندکی افزایش می‌دهد. در خط قوسی با افزایش سختی پیچشی پابند از ۱۱۲ به ۳۰۰ کیلو نیوتن بر رادیان در متر طول خط بیشینه درجه حرارت کمانش خط از ۵۹/۲۷ به ۶۰/۴۱ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. این افزایش ۱/۹ درصدی در بیشینه درجه حرارت کمانش خط ناشی از افزایش مقاومت خط در اثر اعمال مقاومت پیچشی از سوی پابندها است.

مهم‌ترین عامل این اختلاف تفاوت رفتار جانبی بالاست است. در مدل CWERRI همان‌طور که در مرجع [Esveld, 2007] به آن اشاره شده است، اعمال بار قائم توسط چرخ قطار باعث ایجاد یک موج دینامیکی می‌شود. این موج دینامیکی، تراورس وسط مسیر را به اندازه ۱ میلی‌متر از سطح بالاست بالاتر می‌برد و با توجه به رفتار جانبی در نظر گرفته شده برای بالاست، مقدار مقاومت جانبی در حالت باربرداری کمتر از مقاومت جانبی تحت وزن خود خط است. اما در مدل رفتار جانبی ارایه شده برای بالاست در اینجا، ریل تا بیشینه درجه حرارت کمانش تحت وزن خود خط است. بنابراین مقاومت جانبی بالاست در وسط خط بیشتر از حالت باربرداری است.

در نتیجه بیشینه جابه‌جایی جانبی محاسبه شده کمتر از دو مدل دیگر و بیشینه درجه حرارت کمانش بیشتر از مدل‌های دیگر می‌شود. دلیل دیگر این اختلاف، مدل‌سازی کامل خط در برنامه جاری است، چرا که کل خط به همراه اجزای مختلف تشکیل‌دهنده آن مدل شده است. در حالی که در سایر مدل‌ها، کل خط توسط یک تیر با فنرهای معادل برای رفتار جانبی بالاست مدل شده است.

۴-۴- بررسی پارامتری تأثیر اجزای روسازی بر کمانش خط

۴-۱- نوع ریل

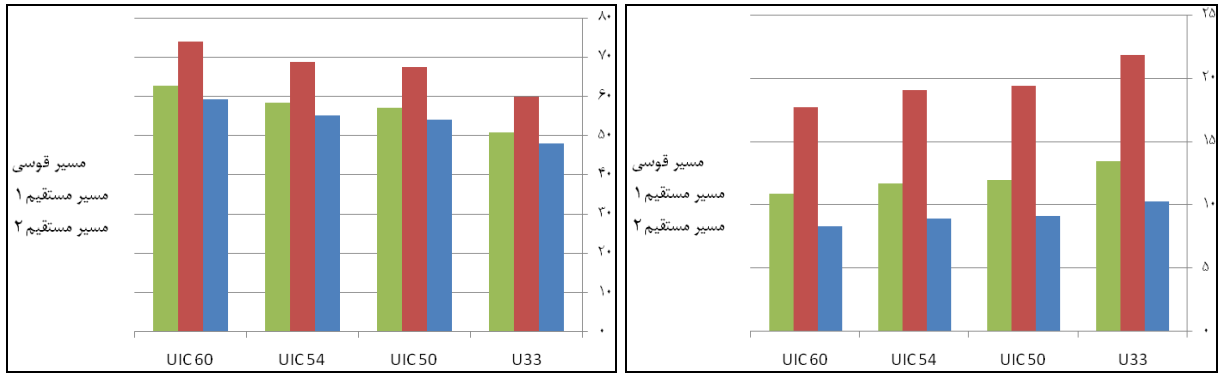
منشأ اصلی نیروهای طولی وارده در خطوط پیوسته جوشکاری شده، انبساط حرارتی فلز ریل است. از این رو پیش‌بینی می‌شود که این جزء روسازی نقش مهمی را در پایداری جانبی خط ایفا کند. شکل (۹-الف) تغییرات بیشینه درجه حرارت کمانش خط را به ازای انواع ریل برای مسیرهای قوسی و مستقیم نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که هرچه ریل قوی‌تر می‌شود، بیشینه درجه حرارت کمانش خط کاهش می‌یابد، زیرا اگرچه افزایش ممان اینرسی خط، بر بار کمانشی یک پروفیل اثر مستقیم دارد و آن را افزایش می‌دهد، لیکن مقدار نیروی کمانش نیز افزایش یافته و تأثیر آن بیشتر از افزایش ممان اینرسی خط است. از طرف دیگر تغییرات بیشینه جابه‌جایی جانبی خط بر حسب نوع ریل در شکل (۹-ب) ارایه شده است. مطابق این شکل بیشینه جابه‌جایی جانبی خط با افزایش سختی ریل افزایش می‌یابد. همان‌طور که از این شکل مشاهده می‌شود، با ۵۷ درصد

بالاست بین ۱۴ تا ۱۷/۶ قرار گیرد، نیروی جانبی اعمالی توسط تراورس‌های بحرانی واقع در ناحیه بحرانی کمناش در قسمت نرم‌شوندگی نمودار بار- تغییر مکان بالاست قرار می‌گیرد و بنابراین با افزایش مقاومت جانبی پلاستیک بالاست، بیشینه تغییر مکان جانبی خط به‌طور جزئی کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان به افزایش سختی جانبی بالاست در مقایسه با حالت قبل نسبت داد. ناحیه افت ناگهانی در وسط منحنی بین مقاومت جانبی پلاستیک ۱۷/۶ و ۲۰ کیلونیوتن بر متر طول ریل نشانگر این نکته است که در این محدوده از مقاومت جانبی، مقدار نیروی وارده به بالاست از طرف تراورس‌های واقع در ناحیه بحرانی برای کمناش خط باعث می‌شود که رفتار بالاست در نمودار بار - تغییر مکان به‌طور ناگهانی از ناحیه نرم‌شوندگی وارد ناحیه ارتجاعی شود. بنابراین تغییر مکان به‌طور ناگهانی کاهش یافته است. پس از مقاومت جانبی پلاستیک ۲۰ کیلونیوتن در متر طول خط، بالاست در ناحیه ارتجاعی قرار می‌گیرد و با افزایش مقاومت جانبی خط مقدار تغییر مکان به‌طور جزئی کاهش می‌یابد. تغییرات بیشینه درجه حرارت کمناش خط به‌صورت تابعی از سختی قائم و طولی بالاست نیز قابل ارایه است. همان‌طور که در شکل (۱۳-الف) مشاهده می‌شود، افزایش سختی قائم بالاست تأثیر چندانی در بیشینه درجه حرارت کمناش خط ندارد که دلیل آن بالا بودن سختی قائم بالاست و همچنین تمایل ریل برای کمناش در جهت جانبی به علت دارا بودن ممان اینرسی کمتر است. باید توجه داشت که افزایش سختی قائم بالاست باعث تحمل بیشتر نیروی قائم وارده از طرف وسیله نقلیه و خط به بالاست می‌شود و به مقدار خیلی جزئی بیشینه درجه حرارت کمناش ریل را بالا می‌برد. در شکل (۱۳-ب) نیز تغییرات بیشینه درجه حرارت کمناش خط به‌صورت تابعی از سختی طولی بالاست نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که افزایش سختی طولی بالاست نیز تأثیر چندانی در بیشینه درجه حرارت کمناش خط ندارد و با افزایش سختی طولی بالاست از صفر به ۱۰۰۰۰ کیلو نیوتن در متر طول خط مقدار بیشینه درجه حرارت کمناش خط از ۵۹/۲۰ به ۵۹/۳۸ درجه سلسیوس افزایش پیدا می‌کند. این افزایش جزئی در بیشینه درجه حرارت کمناش خط را می‌توان ناشی از مقاومت بالاست در مقابل حرکت طولی خط دانست که باعث می‌شود خط در جهت طولی مقاومت کند و مقداری از نیروی محوری ایجاد شده در ریل را خنثی نماید.

در خط مستقیم ۱ نیز افزایش سختی پیچشی پابندها به ۳۰۰ کیلونیوتن بر رادیان در واحد طول خط باعث افزایش بیشینه درجه حرارت کمناش خط، به ۷۶/۲۳ درجه سلسیوس (افزایش ۲/۹ درصدی) می‌شود. شکل (۱۱-ب) نیز نشان می‌دهد که افزایش سختی پابند، تأثیری در بیشینه جابه‌جایی جانبی خط ندارد. البته افزایش سختی پیچشی پابند سختی کل خط را افزایش می‌دهد، ولی افزایش این سختی چندان زیاد نیست که تأثیری روی بیشینه جابه‌جایی جانبی خط داشته باشد.

۴-۴- مصالح بالاست

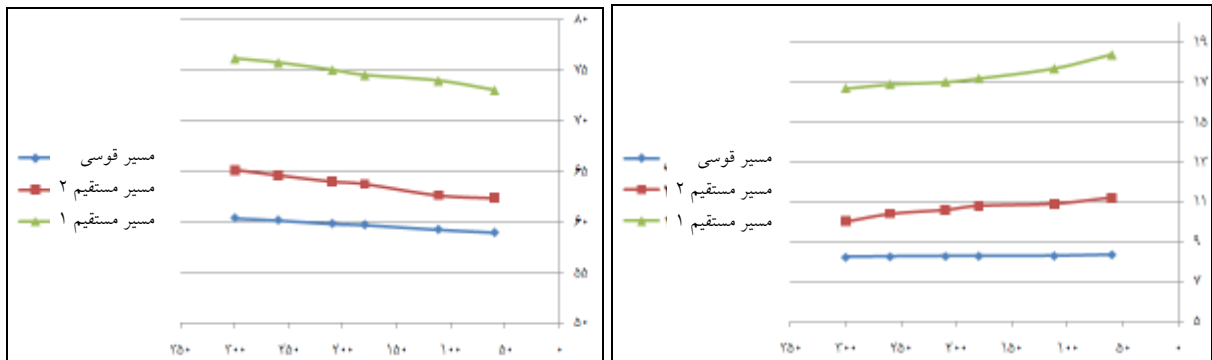
شکل (۱۲-الف) تغییرات بیشینه درجه حرارت کمناش خط را به‌صورت تابعی از مقاومت جانبی بالاست نشان می‌دهد. تغییرات این نمودار نسبتاً خطی است و امتداد آن تقریباً از مرکز مختصات می‌گذرد. این نمودار نشان می‌دهد که هر چه مقاومت جانبی بالاست افزایش یابد، بیشینه درجه حرارت کمناش خط نیز افزایش پیدا می‌کند. به عنوان مثال در خط قوسی با افزایش ۴۹ درصدی مقاومت جانبی بالاست از ۱۷/۶ به ۲۶/۲ کیلو نیوتن در متر طول خط، شاهد افزایش ۲۸ درصدی درجه حرارت کمناش خواهیم بود. این نرخ برای مسیر مستقیم حدود ۱۶ درصد است که همچنان افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. شکل (۱۲-ب) نیز تغییرات بیشینه جابه‌جایی جانبی خط را به‌صورت تابعی از مقاومت جانبی بالاست نشان می‌دهد. بر مبنای این نمودار، افزایش مقاومت جانبی بالاست به کاهش قابل توجه جابه‌جایی جانبی خط می‌انجامد. برای درک بهتر این مورد بهتر است تغییرات نمودار بار- تغییر مکان جانبی بالاست در ذهن مجسم شود. مطابق شکل با افزایش مقاومت جانبی بالاست، بیشینه جابه‌جایی جانبی خط کاهش می‌یابد و در اوایل منحنی نرخ این کاهش بیشتر است و با افزایش مقاومت جانبی پلاستیک بالاست تقریباً ثابت می‌ماند؛ زیرا وقتی که مقاومت جانبی پلاستیک بالاست از ۱۴ کیلونیوتن در متر طول ریل کمتر می‌شود، نیروی اعمالی توسط تراورس‌های بحرانی در قسمت مستقیم (پلاستیک) منحنی بار- تغییر مکان قرار می‌گیرد و در نتیجه با کاهش مقاومت جانبی پلاستیک بالاست بیشینه جابه‌جایی جانبی خط افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که در شکل با کاهش مقاومت جانبی پلاستیک بالاست منحنی به سمت یک مجانب به موازات محور Y میل می‌کند؛ در صورتی هم که مقدار مقاومت جانبی پلاستیک



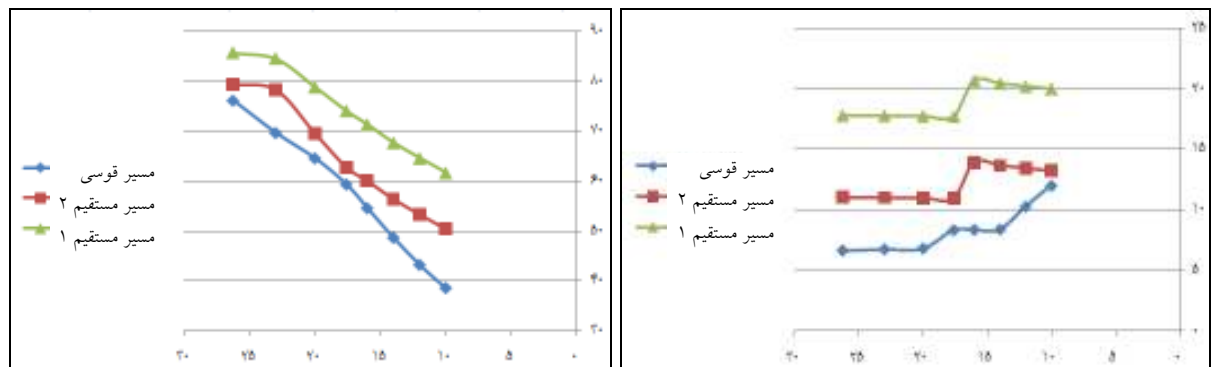
شکل ۹. رفتار کمانش بر حسب نوع ریل (الف) درجه حرارت کمانش (°C) (ب) بیشینه تغییر مکان جانبی (mm)



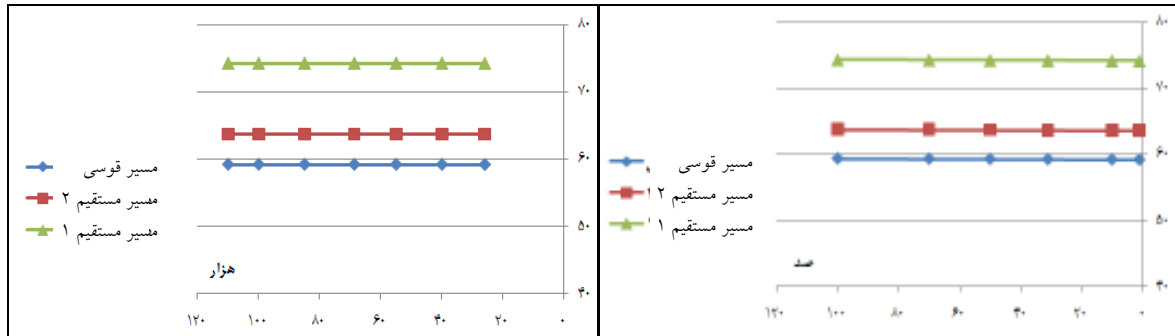
شکل ۱۰. رفتار کمانش بر حسب نوع تراورس (الف) درجه حرارت کمانش (°C) (ب) بیشینه تغییر مکان جانبی (mm)



شکل ۱۱. رفتار کمانش بر حسب سختی پیچشی پابند (الف) درجه حرارت کمانش (°C) (ب) بیشینه تغییر مکان جانبی (mm)



شکل ۱۲. رفتار کمانش بر حسب مقاومت جانبی بالاست (الف) درجه حرارت کمانش (°C) (ب) بیشینه تغییر مکان جانبی (mm)



شکل ۱۳. درجه حرارت کماتش (°C) بر حسب الف) سختی قائم بالاست ب) سختی طولی بالاست

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از برنامه نوشته شده در نرم افزار Ansys برای تعیین بیشینه درجه حرارت کماتش خط، یک سلسله مطالعات پارامتری روی اجزای مختلف روسازی خط ریلی و نیروهای وارده به آن انجام شد و تأثیر تک تک عوامل به طور مفصل مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. تحقیقات نشان دادند که عواملی از قبیل سختی قائم و طولی بالاست، سختی پیچشی پایند و نوع تراورس تأثیر چندانی در بیشینه درجه حرارت کماتش خط ندارند.

این در حالی است که افزایش پارامترهایی از قبیل مقاومت جانبی بالاست و سختی ریل، بیشینه درجه حرارت کماتش خط را تحت تأثیر زیاد قرار می دهند و تأثیرات عمده ای در پایداری خط دارند؛ در نتیجه باید بیشتر مورد توجه قرار گیرند.

۶- مراجع

- فتحعلی، م.، ذاکری، ج. و اسماعیلی، م.، (۱۳۸۷) "طراحی سازه ای دال خط کوهاندار جهت رفع معضل راه آهن مناطق کویری"، دهمین کنفرانس بین المللی حمل و نقل ریلی، تهران، ایران.
- مقدس نژاد، ف. و نژادسیفی، و. (۱۳۸۶) "بررسی پایداری جانبی ریل های پیوسته جوش شده"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
- Esveld, C. (1997) "Improved Knowledge of CWR Track", ERRI D202, Delft University of Technology.
- Kerr, A. D. (1980) "An improved analysis for thermal track buckling", Int. J. Non-linear Mech. 15, pp. 99-114.
- Markine, V. L. and Esveld, C. (2007) "Analysis of lateral behavior of a railway track structure using an optimization technique", Report 124-1, Laboratory for Rail and Railway Engineering, Delft University of Technology.
- Miyay, T. (1985) "Numerical analysis of track buckling by energy method", Quarterly Report, Vol. 26, No. 3.
- Samavedam, G. (1995), "Theory of CWR track stability", Foster-Miller, Inc. Waltham.
- Tew, G. (1989) "A theoretical analysis of track buckling", The Fourth International Heavy Haul Railway Conference, Brisbane, pp. 11-15.
- Van, M. A. (1997) "Stability of continuous welded rail track", Ph. D. Thesis, Delf University Press, ISBN 90-407-1485-1.
- Van, M. A. (1997) "Lateral buckling of continuous welded rail track due to thermal and vertical loading", 6th International Heavy Haul Conference, pp. 333-343.

- ذاکری، ج. و کریمی، س (۱۳۸۸) "مدل سازی بررسی نیروهای طولی CWR به روش المان های محدود"، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
- ذاکری، ج.، محمدزاده، س و داودی، ف. (۱۳۸۷) "مدل سازی و تحلیل پدیده کماتش در خطوط CWR"، دانشکده مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.
- سازمان مدیریت و برنامه ریزی (۱۳۸۴) "مشخصات فنی عمومی روسازی راه آهن"، نشریه شماره ۳۰۱، سازمان مدیریت و برنامه ریزی، ایران.