بررسی و توسعه مدل شاخص کیفیت جهت خطوط بتنی در راه‌آهن

ابوالفضل حسنی، دانشیار راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس
پویا رخشانی، کارشناس‌ارشد راه و ترابری، دانشگاه تربیت مدرس
Email: hassani@modares.ac.ir

چکیده

یکی از بخشهای اساسی در سامانه مدیریت نگهداری خط که جهت برنامه‌ریزی و سازماندهی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری خطوط ریلی به آن نیاز است، ارزیابی شرایط روسازی می‌باشد. شرایط روسازی خطوط بتنی راه‌آهن از نظر پارامترهای نگهداری، امری کیفی است که برای تصمیم‌گیری در مورد عملیات‌های نگهداری و تعمیر و پیش‌بینی شرایط آیندهٔ خط در یک سامانه مدیریتی، باید به صورت یک پارامتر کمّی درآید. بدین منظور در این تحقیق از توسعه مدلهای شاخص کیفیت سازه‌ای خط و شاخص کیفیت هندسی خط استفاده می‌شود. در این خصوص علیرغم توسعه قابل‌توجه خطوط بتنی راه‌آهن در ایران و جهان، هنوز روش مدون و مشخصی جهت ارزیابی کیفی روسازیهای بتنی ارایه نگردیده است. برای کالیبره‌کردن مدل شاخص کیفیت اجزای خط در یک مسیر نمونه، مطالعات میدانی در قسمتهایی از خطوط بتنی متروی تهران صورت گرفته است. در مسیر مورد مطالعه، شاخصهای کیفیت اجزاء خط برای گروه‌های پابند، دال بتنی و ریل که به ترتیب ۹۵، ۸۹ و ۸۸ بودند، نشان داد که کمی کردن وضعیت کیفی اجزاء خطوط بتنی با استفاده از متدولوژی مورد استفاده و آنچه که انتظار می‌رفت، دارای نتایج مناسبی بوده است. شاخصهای هندسی مورد استفاده در این تحقیق علاوه بر انحراف معیار، پارامتر میانگین را نیز در نظر می‌گیرند. در مسیر مورد مطالعه، نتیجه شاخص هندسی برای خط مورد مطالعه با توجه به مقدار مجاز بین ۳/۰۲ و صفر می‌باشد، که ملزومات کافی برای عبور قطار را دارا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: خط بتنی راه‌آهن، نگهداری و تعمیر، شاخص کیفیت سازه‌ای خط، شاخص کیفیت هندسی خط

۱. مقدمه

بهترین خطوط راه‌آهن به لحاظ مصالح روسازی و اجرا در صورتی که پس از بهره‌برداری، مورد نگهداری قرار نگیرند، دچار کاهش کیفیت می‌گردند. با درک نیاز به عملیات نگهداری و تعمیر، سازماندهی و برنامه‌ریزی عملیات نگهداری و تعمیر بیشتر ضرورت پیدا می‌کند. در سالهای اخیر سامانه‌های مدیریت مهندسی[1] توسعه قابل توجهی داشته‌اند که از مهمترین آنها می‌توان به سامانه مدیریت روسازی معابر[2] اشاره نمود. در راه‌آهن نیز سامانه‌های مدیریت نگهداری ایجاد شده و به بهره‌برداری رسیده‌اند. یکی از مراحل مهم سیستم مدیریت خط، مرحلهٔ سنجش شرایط خط (ارزیابی) است. اساس یک سیستم مدیریت خط، شیوهٔ ساخت شاخص کیفیت خط است. به‌طوری که بتوان کیفیت خط را به صورت کمی بیان کرد[۱]. در این راستا، مطالعاتی در خصوص ارایه شاخص کیفیت از دو منظر کیفیت ادوات خط و کیفیت هندسه خط بطور جداگانه انجام پذیرفته است. برای این منظور، نوع خرابیهای موجود در خط و نقش آنها در سیستم‌های شاخص‌دهی بررسی گردید، تا شیوه تعریف شاخص وضعیت خطوط حاصل شود. از طرف دیگر، شاخص وضعیت کیفی اجزاء و شاخص هندسی خط به ترتیب با استفاده از اطلاعات بازرسیهای چشمی و مکانیزه تعیین‌می‌شوند. در این خصوص توسعه مدلهای ارزیابی بر اساس بازرسیهای چشمی و مکانیزه برای خطوط بتنی (اسلب ترک) مهم است. چرا که در این صورت استراتژی تعمیر و

نگهداری خطوط بتنی نیز همانند خطوط بالاستی رتبه‌بندی و تعیین می‌گردد.

هندسه خط از عوامل مؤثر بر میزان راحتی و سطح ایمنی خط می‌باشد. برای کنترل شتابهای وارده و نیروی‌های تماسی، میزان نامنظمی‌های هندسی باید کنترل شوند. کنترل و ارزیابی مشخصات هندسی خط نیازمند شناخت صحیح پارامترهای هندسی است[۲].

۲. متدولوژی تحقیق

در این تحقیق مدل ارزیابی کیفیت سازه‌ای، روسازی بتنی راه‌آهن بر اساس بازرسیهای چشمی توسعه یافته است. بدین منظور ابتدا خرابیهای متداول در دال تعریف و بر اساس سطوح شدت طبقه‌بندی می‌شوند. سپس در جهت تبدیل وضعیت کیفی خط به کمیتهای دارای مفهوم، میزان تأثیر هر کدام از گروههای شدت خرابی با مقادیر مختلف چگالی بر روی کیفیت خط، مورد بررسی آماری قرار گرفته است. با استفاده از این میزان تأثیر که کاهش کیفیت خط[۳] را نشان می‌دهد، منحنی‌های کاهش و تصحیح تدوین می‌شوند. در نهایت مدل نهایی شاخص کیفیت اجزای خط بر پایه مدل چگالی کاهشی توسعه می‌یابد.

همچنین در این مقاله مدل ارزیابی کیفیت هندسی، روسازی بتنی راه‌آهن بر اساس بازرسیهای مکانیزه و متناسب با شرایط خطوط ریلی توسعه یافته است. در این راستا، با توجه روشهای متفاوت تحلیل اطلاعات ماشین اندازه‌گیر خط EM۸۰ مورد استفاده در متروی تهران برای توسعه شاخص کیفیت هندسی، علاوه بر استفاده از پارامتر انحراف معیار از پارامتر مقدار میانگین نیز استفاده شده است. سپس برای ترکیب پارامترهای هندسی و رسیدن به یک معادله واحد جهت شاخص هندسی کل، از مقایسه رواداریهای مختلف خطوط بتنی راه‌آهن در چند شهر دنیا و وزن‌دهی پارامترها استفاده شده است.

۳. مروری بر شاخص‌های کیفیت خطوط

۳-۱ شاخص کیفیت سازه‌ای و اجزای خط

شاخص وضعیت اجزاء خط که بر اساس بازرسیهای چشمی به دست می‌آید و نشان‌دهنده وضعیت کیفی اجزاء خط می‌باشد، اولین بار توسط Uzarski در سال ۱۹۹۳ در مرکز تحقیقات ارتش آمریکا توسعه داده شده است. برای تدوین الگوریتم این شاخص در این مقاله، ابتدا تقسیم‌بندی خرابی‌ها بر اساس نوع خرابی و درجه شدت آنها صورت گرفته و سپس با استفاده از یک تیم افراد متخصص و انجام یک سلسله تحلیل آماری، میزان تأثیر هر نوع خرابی در کاهش شاخص کیفیت خط مورد مطالعه قرار گرفت. فرایند محاسبه مقادیر کاهشی تصحیح شده از ASTM D5340-93 تبعیت می‌کند. در این روش ابتدا اجزای خط معرفی و گروه‌بندی سه‌گانه پیشنهادی ارایه می‌گردد. سپس خرابی‌های هر گروه فهرست شده و درجه‌بندی شدت‌های مختلف بیان می‌شود. در نهایت نتیجه به صورت منحنی‌های کاهش بیان شده است[۳].

۳-۲ شاخص کیفیت هندسی خط

هندسه خط به پارامترهای مختلفی اطلاق می‌شود که مسیر و آرایش خط را توصیف می‌کنند. با تصویر هندسه خط در صفحات گوناگون، می‌توان پارامترهای هندسی خط را مشخص و اندازه‌گیری نموده و برای توصیف هندسه خط به‌کار برد[۱و۲]. محققین و انجمنهای تحقیقاتی پیشنهادات مختلفی در مورد شاخص کیفیت هندسی خط ارایه کرده‌اند.

در راه‌آهن هندوستان برای بررسی کیفیت هندسی خط، از شاخص TGI استفاده می‌شود. در این روش که مبتنی بر تحلیل آماری و انحراف معیار است، برای ترکیب پارامترهای مختلف از روش میانگین وزنی استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن اثر هر پارامتر (اعوجاج، راستا، عرض‌خط، پروفیل) روی شاخص حرکتی، ضرایب وزنی متفاوتی برای پارامترهای مختلف به‌دست می‌آید. بر این اساس شاخص هندسی خط (TGI) از رابطه زیر محاسبه می‌شود [٤]:

$$TGI = \frac{2UI + TI + 6AI + GI}{10} \qquad (۱)$$

در این رابطه:

TGI: شاخص هندسی خط،

UI: شاخص افتادگی قائم (پروفیل)،

TI: شاخص اعوجاج،

AI: شاخص راستا و

GI: شاخص عرض خط می‌باشد.

یکی از شاخص‌هایی که بر پایه تحلیلهای آماری برای ارزیابی وضعیت خط در راه‌آهن ملی سوئد مورد استفاده قرار می‌گیرد،

شاخص Q می‌باشد. معیار اصلی محاسبه این شاخص، وزن‌دهی پارامتر آماری انحراف معیار و پارامترهای مختلف هندسی خط می‌باشد. در این شاخص برای تعیین وضعیت خط، نسبت مقدار انحراف به مقدار مجاز نیز منظور شده است. شاخص Q از رابطه زیر محاسبه می‌شود[۵]:

$$Q = 150 - 100 \times \frac{\left[\frac{\sigma_H}{\sigma_{H_{Lim}}} + 2 \times \frac{\sigma_S}{\sigma_{S_{Lim}}}\right]}{3} \qquad (۲)$$

که در این رابطه:

σ_H: میانگین انحراف‌معیار افتادگی ریل چپ و راست،

σ_S: میانگین انحراف‌معیار شیب عرضی، عرض‌خط و انحراف افقی،

$\sigma_{H_{Lim}}$ و $\sigma_{S_{Lim}}$: به ترتیب مقادیر مجاز σ_H و σ_S بر اساس طبقه‌بندی خط می‌باشد.

شاخص متناظر مورد استفاده در راه‌آهن لهستان، شاخص J است که بر اساس تحلیل آماری و با وزن‌دهی به انحراف معیار پارامترهای مختلف تعیین می‌شود و ارزیابی کمی از وضعیت خط در اختیار قرار می‌دهد. این شاخص از رابطه زیر تعیین می‌شود[۶]:

$$J = \frac{S_Z + S_Y + S_W + 0.5S_e}{3.5} \qquad (۳)$$

در این رابطه:

J: شاخص پارامترهای هندسی،

S_Z: انحراف معیار افتادگی ریل چپ و راست،

S_Y: انحراف معیار راستا،

S_W: انحراف معیار اعوجاج و

S_e: انحراف معیار عرض خط می‌باشند.

در ایران در سال ۱۳۸٤، شاخص ITGI مطابق رابطه ٤، به عنوان شاخص کیفیت هندسی خط برای خطوط بالاستی راه‌آهن پیشنهاد گردید[۱]. این شاخص مبتنی بر استفاده از پارامتر میانگین و انحراف معیار و با در نظر گرفتن خصوصیات توزیع نرمال و وزن‌دهی به پارامترهای مختلف هندسی با استفاده از رواداریهای مجاز برای خطوط بالاستی ایران برای طبقه‌های مختلف خطوط می‌باشد[۱]:

$$ITGI = 100 - K \times \frac{\frac{a}{2} \times GI^{+} + \frac{a'}{2} \times GI^{-} + b \times AI + c \times PI + d \times CI}{\frac{a+a'}{2} + b + c + d} \qquad (٤)$$

که در این رابطه:

$$GI^{+} = \left|\bar{x} + 3SD_G\right| \qquad (۵)$$

$$GI^{-} = \left|\bar{x} - 3SD_G\right| \qquad (٦)$$

$$AI = \left|\bar{x}\right| + 3SD_A \qquad (۷)$$

$$PI = \left|\bar{x}\right| + 3SD_P \qquad (۸)$$

$$CI = \left|\bar{x}\right| + 3SD_C \qquad (۹)$$

در روابط فوق:

GI^{+}: شاخص عرض خط مثبت،

GI^{-}: شاخص عرض خط منفی،

AI: شاخص امتداد،

PI: شاخص پروفیل،

CI: شاخص تراز عرضی،

ضریب K برای خطوط طبقه A برابر ٤٫۵۰-، برای خطوط طبقه B برابر ٤٫۱۸- و برای خطوط طبقه C برابر ۳٫۷۹-

a, a', b, c, d: ضرایب وزنی پارامترهای هندسی می‌باشند.

٤. توسعه مدل شاخص کیفیت سازه‌ای خط

به منظور توسعه مدل ارزیابی روسازیهای بتنی راه‌آهن در این تحقیق از مدل چگالی کاهشی[٤] استفاده شده است. در این مدل، میزان خرابی به وجود آمده در اجزاء، به سه پارامتر نوع خرابی، شدت خرابی و میزان خرابی که به‌صورت درصد و به عنوان چگالی خرابی بیان می‌شود وابسته است. هر کدام از موارد ذکر شده در تشخیص و کمّی کردن وضعیت گروه اجزاء خط مؤثر است و هر یک باید در مدل ریاضی شاخص وضعیت وارد شوند. در این مدل فرض می‌شود که شاخص وضعیت با جمع زدن انواع خرابی به همراه درجات شدت و چگالی آنها با استفاده از فاکتورهای وزنی تخمین زده شود [۷]:

$$QI = 100 - F(t,N)\sum_{i=1}^{p} DV \qquad (۱۰)$$

در این رابطه،

QI: شاخص کیفیت،

DV: میزان کاهش کیفیت،

P: تعداد کل خرابی- سطح شدت موجود،

F: ضریب یا فاکتور اصلاح برای وجود چند خرابی مختلف که خود تابعی است از میزان جمع مقادیر کاهش (t) و تعداد موارد کاهش (N) است.

میزان کاهش کیفیت خود تابعی از نوع خرابی، شدت خرابی و میزان خرابی است. به عبارت دیگر[۷]:

$$DV = f(T, S, D) \qquad (۱۱)$$

که در آن T نوع خرابی، S شدت خرابی و D میزان یا چگالی خرابی می‌باشد. این مدل هر نوع خرابی، شدت خرابی و مقدار آن را به صورت جداگانه و یا به صورت ترکیبی در نظر می‌گیرد و وضعیت کیفی خط را به صورت کمی بیان می‌کند. برای توسعه یک مدل با ساختار پیشنهادی یاد شده، به منظور ارزیابی کیفیت خطوط بتنی راه‌آهن موارد زیر لازم است:

- تعریف دقیق و جامع خرابیهای متداول در اجزاء اصلی خطوط بتنی راه‌آهن؛
- بررسی و تعیین میزان تأثیر هر یک از خرابیهای تعریف شده با شدت و میزان مشخص بر کیفیت و سرویس‌دهی هر جزء خطوط بتنی راه‌آهن؛
- توسعه نمودارهایی که میزان کاهش کیفیت اجزاء خط بتنی را برای انواع، شدت و مقادیر مختلف خرابی نشان می‌دهد.

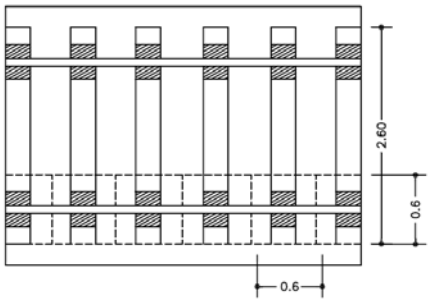
٤-١ تعریف و طبقه‌بندی خرابیهای متداول

خطوط بتنی راه‌آهن به طور معمول از اجزائی شامل ریل، پابندها، صفحات زیر ریل و دال بتنی تشکیل می‌شود. بعضی از این اجزا از نظر جنس، نحوه زوال و کاربرد دارای تفاوتهای عمده‌ای می‌باشند. در نتیجه کلیه اجزای خط را نمی‌توان با یک شاخص مشخص ارزیابی کرد. در این تحقیق اجزاء اصلی خطوط بتنی راه‌آهن به سه دسته کلی ریل (شامل ریل، صفحات اتصالی (در صورت وجود)، صفحات زیر ریل و درزها)، پابندها و دال بتنی تقسیم‌بندی شده و میزان شاخص کیفیت برای گروههای مذکور به طور جداگانه ارزیابی می‌شود.

در این تحقیق انواع خرابی‌های دال بتنی بر اساس استانداردها و آیین‌نامه‌های سازه‌های بتنی مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت با توجه به نظرات گروه ٢٤ نفرهٔ متخصصان راه‌آهن کشور، انواع خرابیهای متداول در اجزاء مختلف خطوط راه‌آهن تعریف شده‌اند. در این مرحله لازم است تا با استفاده از تحلیلهای آماری تأثیر انواع مختلف این خرابیها بر روی کیفیت خط بتنی تخمین زده شود[۷]. با این حال با توجه به اینکه بسیاری از خرابیها دارای تأثیرات تقریباً یکسانی بر کیفیت خط هستند، با استفاده از نظریات افراد ارزیاب و بر اساس تجربیات گذشته در توسعه شاخص‌های چشمی و همچنین بررسی استانداردهای مختلف، کلیه خرابیها به سه گروه شدت تقسیم‌بندی شده و انواع مختلف خرابیها مطابق جدول ۱، در این سه گروه شدت قرار داده شدند[۱و۳]. این سه گروه عبارتند از:

- شدت‌کم (L): خرابی‌هایی که روی فعالیت قطار تاثیر نمی‌گذارند،
- متوسط (M): خرابی‌هایی که می‌توانند در فعالیت قطارها محدودیت ایجاد کنند،
- زیاد (H): خرابی‌هایی که ممکن است موجب محدودیت سرعت در قطارها یا مسدود شدن خط شوند.

در این تحقیق جهت انجام بررسی خرابی‌های مربوط به گروه دال بتنی، با در نظر گرفتن تأثیر این خرابی‌ها بر پارامترهای هندسی، کیفیت خط مورد ارزیابی قرار گرفته است. بنابراین خرابی‌های این گروه با توجه به جدول بالا بررسی و طبقه‌بندی شده است. بدین منظور با زون‌بندی سطح دال بتنی در خطوط بتنی راه‌آهن مطابق شکل ۱ و در نظر گرفتن فضای ٦٠cm در ٦٠cm اطراف پابند، خرابی‌های تأثیر گذار سطح بتن در این زون‌ها بررسی شده است.



شکل ۱. زون‌بندی سطح دال بتنی در اطراف پابند (m)

٤-٢ تأثیر خرابیها و رسم منحنی‌های مربوطه

پس از تعریف انواع مختلف خرابی در شدتهای مختلف، میزان تأثیر هر کدام از گروههای شدت خرابی با مقادیر مختلف را بر روی کیفیت خط، مورد بررسی قرار می‌دهیم. اولین مرحله در این خصوص، مشخص‌کردن روش کمی کردن خرابیهای سازه‌ای می‌باشد تا در مرحله بعد میزان حساسیت کیفیت خط را برای مقادیر مختلف خرابی و با شدتهای مشخص تعیین کرد. برای این منظور، یک طول مشخص از خط به واحدهایی

تقسیم‌بندی می‌شود. میزان خرابی یا چگالی خرابی هر کدام از اجزاء خط به صورت تقسیم تعداد واحدهای دارای خرابی بر کل واحدها به دست می‌آید. در این تحقیق طولهای ۳۰ متری برای خط در نظر گرفته شدند و چگالی خرابی برای این طول (سگمنت) محاسبه می‌شود. در هر سگمنت، هر واحد به عنوان فاصله بین دو پابند متوالی در نظر گرفته می‌شود. با فرض فاصله ٦٠ سانتی‌متری بین پابندها، هر سگمنت ۳۰ متری دارای ۵۰ واحد می‌باشد. به عنوان مثال اگر در یک سگمنت ۵۰ واحدی، پس از بازرسی دال بتنی، ۵ واحد دارای یکی از انواع خرابی با شدت متوسط باشد، چگالی خرابی دال بتنی با شدت متوسط در این سگمنت برابر با ۰/۱=۵/۵۰ است. به همین شکل میزان چگالی خرابی برای ریل و پابندها نیز محاسبه می‌شود.

مهمترین مرحله توسعه شاخص کیفیت خطوط بتنی، بررسی میزان تأثیر شدتهای مختلف خرابی در اجزاء مختلف بر کیفیت اجزاء خط است. برای این منظور نیاز به تحلیل آماری و جمع‌آوری اطلاعات از گروه ارزیاب نیاز است. در این تحقیق از یک گروه افراد ٢٤ نفره از متخصصان راه‌آهن برای تخمین کمی میزان تأثیر خراییهای مختلف بر روی کیفیت اجزاء خط استفاده شده است (حروف A تا X نماینده هر یک از افراد می‌باشد). برای این منظور شیتهایی طراحی و در هر شیت یک نوع خرابی با شدت و چگالی مشخص نشان داده شد. این شیتها بین افراد گروه ارزیاب توزیع و از آنها خواسته شد تا به هر کدام از شیتها نمره دهند. این نمره نشان‌دهنده میزان کاهش کیفیت خط (DV) بر اثر آن خرابی با شدت و چگالی مشخص می‌باشد. بر این اساس نمره‌ای که ارزیاب به هر شیت می‌دهد، بیان می‌کند که بر اساس نظر ارزیاب، خرابی مشخص با شدت و چگالی مورد نظر (که در شیت مشخص شده) میزان کیفیت آن جزء خط بتنی را از ۱۰۰ به عدد (۱۰۰ منهای DV) تغییر می‌دهد. نمونه‌ای از نمره‌هایی که توسط افراد ارزیاب برای خراییهای ریل با شدت کم داده شده است، در جدول ۲ نشان داده شده است[۷].

جدول۱. طبقه‌بندی انواع خرابیها بر اساس شدتهای مختلف [۳،۸،۹و۱۰]

اجزاء خط	سطح شدت	خرابیهای سازه‌ای متداول
گروه ریل	کم (L)	***خرابی ریل:*** ورقه شدگی ورآمدگی، ترکهای سطحی، جاری شدن سطحی (Overflow)، پوسته‌شدگی، خمیدگی جانبی، لب‌پریدگی وکنگره‌شدگی تاج، ریل سوختگی. ***خرابی در محل درز:*** اندازه یا نوع نامناسب بولتهای اتصالی، صفحه اتصالی با اندازه یا نوع نامناسب، بولت اتصالی شل شده، صفحه اتصالی شل شده، یک بولت مفقود/خمیده/ترک‌خورده/شکسته شده.
	متوسط (M)	***خرابی ریل:*** لهیدگی تاج، خوردگی پایه، سایش جانبی ریل، سایش عمودی ریل، زدگی انتها (عیب v شکل)، شکاف افقی تاج، شکاف قائم تاج، شکاف جان، خرابی جوش، ترک اطراف سوراخ بولتها، موجدارشدگی (Corrugation)، شکاف مرکب. ***خرابی در محل درز:*** صفحه اتصالی ترک خورده، ۲ cm < درز ریل <٤ cm، ***خرابی صفحه زیر ریل:*** هرگاه در محل نامناسب، ترک خورده و یا شکسته باشد.
	زیاد (H)	***خرابی ریل:*** شکستگی در قسمتی از ریل، شکاف افقی تاج > ٤ cm، شکاف عمودی تاج > ٤ cm، ترکهای اطراف سوراخ بولتها > ۱/۵ cm، شکاف مرکب > ۲۰ cm درصد سطح، شکاف جان > ۱/۵ cm. **خرابی در محل درز:** تمامی بولتها در محل درز خراب است، صفحه اتصالی شکسته یا مفقود شده، درز ریل>٤ cm.
دال بتنی	کم (L)	***خرابی در دال:*** پوسته‌پوسته شدن سطح بتن تا عمق ٦ mm ، ترک خوردگی در بتن تا عرض حدود ۰/۸ mm، پکیدگی بتن تا عمق کمتر از ۱۲ mm، بیرون پریدگی و ایجاد چاله هایی در بتن تا قطر حدود ۱۰ mm، شوره‌زدگی در سطح بتن، لکه‌دار شدن سطح بتن، آسیب‌دیدگی درز با وضعیت خوب، نواحی توخالی.
	متوسط (M)	***خرابی در دال:*** پوسته‌پوسته شدن سطح بتن از عمق ٦ mm تا ۲۵ mm، ترک‌خوردگی در بتن از عرض حدود ۰/۸ mm تا ۳/۲ mm، پکیدگی بتن از عمق حدود ۱۲ mm تا ۲۵ mm، بیرون پریدگی و ایجاد چاله‌هایی در بتن از قطر حدود ۱۰ mm تا ۵۰ mm، آسیب‌دیدگی درز با وضعیت متوسط.
	زیاد (H)	***خرابی در دال:*** پوسته‌پوسته شدن سطح بتن به عمق بیش از ۲۵ mm، ترک‌خوردگی در بتن به عرض بیش از ۳/۲ mm، پکیدگی بتن به عمق بیش از ۲۵ mm، آسیب‌دیدگی درز با وضعیت بد، بیرون پریدگی و ایجاد چاله‌هایی در بتن از قطر حدود ۵۰ mm تا ۷۵ mm (ایجاد چاله‌هایی با قطر بزرگتر از ۷۵ mm پکیدگی محسوب می شود).
پابند	کم (L)	***خرابی پابند:*** نصب یا قرار گرفتن در محل نامناسب.
	متوسط (M)	***خرابی پابند:*** شل‌شدگی یا ایجادخمیدگی در پابند.
	زیاد (H)	***خرابی پابند:*** شکسته‌شدن یا مفقود شدن.

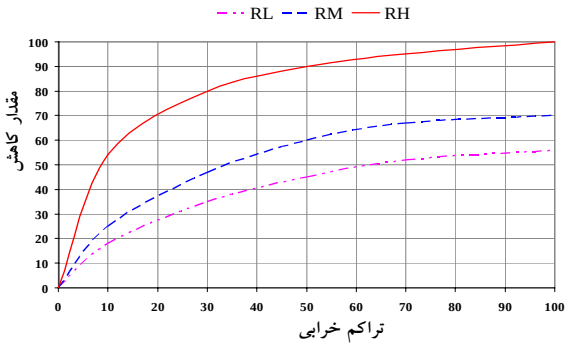
جدول۲. نمونه‌ای از اطلاعات ارائه شده توسط ارزیابها

ارزیابی ریل برای خرابیهای با شدت کم												
چگالی خرابی	میزان مقادیر کاهش ارائه شده توسط ارزیابها											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
۱۰	۱٤	۹	۱٥	۲۳	۱۸	۲۱	۱٦	۱۷	۲٦	۲۰	۱٤	۱۸
۳۰	۲۸	۲٦	۳۰	٤۰	۳۲	٤۰	۳۸	۳٥	٤۳	۳۷	۳۳	٤۲
٥۰	٤٥	٤۸	٤٤	٥۷	٤٥	٥٦	٥۲	٥۳	٥۱	٤۹	٤٤	٥۰
۷۰	٤٥	٤۷	٤٥	٦۰	٤۸	٥٦	٥٦	٥۱	٥۸	٥۲	٥۰	٥٦
۱۰۰	٤۷	٤۹	٥۰	٦۲	٥٥	٦۳	٥۹	٥۸	٦۲	٥۸	٦۰	٦٥
چگالی خرابی	میزان مقادیر کاهش ارائه شده توسط ارزیابها											
	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
۱۰	۱٤	۱٥	۲۳	۱۷	۱٥	۲٤	۱۹	۱٦	۱۸	۲۰	۲۱	۱۷
۳۰	۳۲	۳۱	۳۰	۳۷	۳٥	٤۳	۳۷	۳٤	۳۳	۳۳	۳۹	۳٦
٥۰	٤۲	٤۷	٤۲	٤۸	٤۹	٤٦	٤۰	۳۷	۳٦	۳٦	٤۲	۳۹
۷۰	٤۸	٤۹	٥۱	٥٤	٥۱	٥٦	٥٥	٤۹	٥٦	٥٦	٥۳	٥٤
۱۰۰	٤۷	٥۱	٥٤	٦۲	٥٦	٦٥	٥٥	٦٥	٦۳	٦۳	٥٦	٦۰

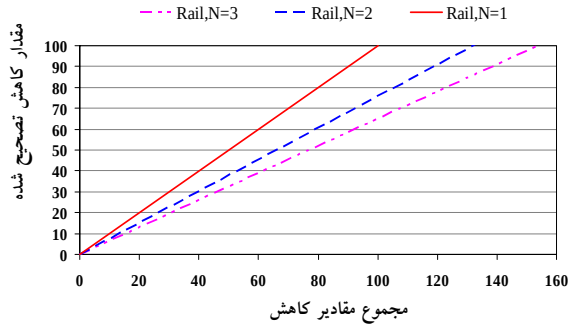
پس از جمع‌آوری شیتها، ارزیابی‌ها مورد بررسی دقیق قرار گرفت و نمره‌هایی که از مقدار میانگین به اندازه ۲ برابر انحراف معیار فاصله داشتند برای ارزیابی دوباره کنار گذاشته شدند. این مسئله برای این بود تا به ارزیابها فرصت دوباره‌ای داده شود تا اشتباهات احتمالی خود را در نحوه نمره‌دهی تصحیح کنند. در انتها دوباره اطلاعات جمع‌آوری شده و مورد بررسی نهایی قرار گرفت. در این مرحله با فرض توزیع نرمال برای اطلاعات آماری موجود، نمره‌هایی که از مقدار میانگین به علاوه ۳ برابر انحراف معیار بزرگتر و یا از مقدار میانگین منهای ۳ برابر انحراف معیار کوچکتر بودند، از جامعه آماری حذف شدند و بررسی‌ها بر روی بقیه اطلاعات انجام شد.

از طرفی در مواقعی که دو یا سه نوع خرابی از شدتهای مختلف در یک جزء از خط اتفاق می‌افتد، میزان تأثیر هر خرابی بر روی کیفیت خط کاهش می‌یابد. برای بررسی این مطلب و به دست آوردن مقدار کاهش، شیتهای دیگری تهیه شد و در اختیار ارزیابها قرار گرفت. در این شیتها دو یا سه نوع خرابی در یک جزء خط به طور همزمان نشان داده شد. به طور مثال در یک شیت که نماینده یک سگمنت از خط است یک نوع از خرابیهای ریل با شدت کم و همچنین یکی از انواع خرابی ریل با شدت متوسط به طور همزمان نشان داده شد. روند کلی جمع‌آوری اطلاعات از افراد ارزیاب همانند روند تشریح شده در بالا می‌باشد. از انواع مختلف ترکیب خرابیها شیتهایی تهیه و از افراد ارزیاب خواسته شد تا به هر شیت نمره‌ای بدهند. با مقایسه این نمره‌ها با نمره‌هایی که قبلاً ارزیابها به تک تک خرابیها داده بودند، یک سری ضرایب تصحیح[۵] به دست آمد. مقدار ضریب تصحیح همانطور که در معادله کلی مدل پیشنهادی نیز بیان شده است، تابعی از جمع مقادیر کاهش مربوط به هر خرابی و تعداد خرابیها است. در نهایت نتایج حاصل از تحلیل اطلاعات بدست آمده از افراد ارزیاب به صورت منحنی‌هایی توسعه یافت[۷].

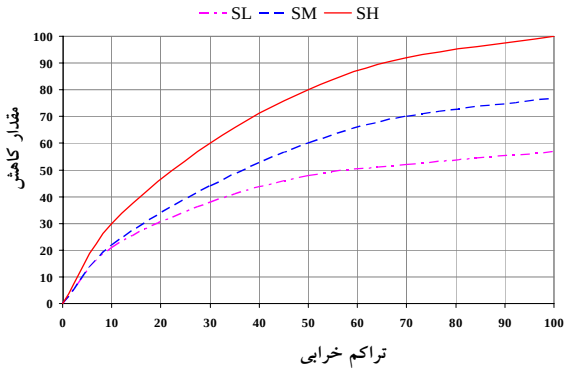
نتایج میزان کاهش کیفیت اجزاء خط نسبت به چگالی‌های مختلف، به صورت منحنی‌های کاهش برای هر جزء خط بتنی با استفاده از میانگین نمره‌های داده شده، در اشکال ۲، ٤ و ٦ رسم شده است. همچنین مقادیر ضرایب تصحیح در اشکال ۳، ٥ و ۷ رسم شده است. در این اشکال N تعداد خرابیها می‌باشد. به‌طور مثال در یک سگمنت اگر یک مقدار چگالی برای خرابیهای با شدت کم در ریل و یک مقدار چگالی برای خرابیهای با شدت متوسط در ریل به دست آید، ابتدا باید با استفاده از شکل ۲ مقدار کاهش در ازای چگالی موجود به دست آید، سپس این مقادیر کاهش باهم جمع‌شده و با استفاده از منحنی شکل ۳ مقدار کاهش تصحیح شده با ضرب این ضریب تصحیح در جمع مقادیر کاهش به دست می‌آید. در نهایت میزان شاخص کیفیت ریل در این سگمنت، ۱۰۰ منهای مقدار کاهش تصحیح شده می‌باشد.



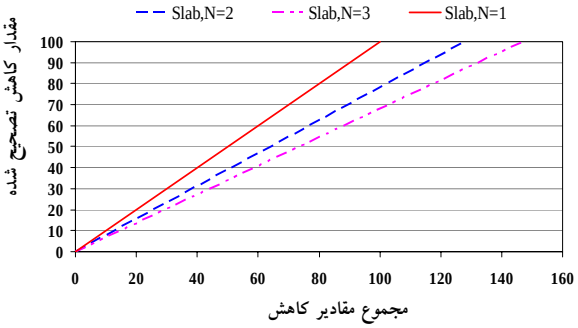
شکل۲. منحنی‌های کاهش برای خرابیهای ریل



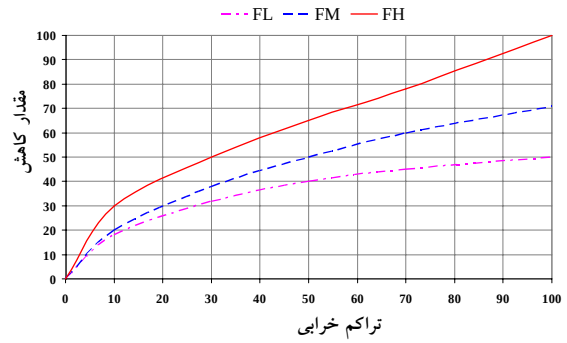
شکل۳. منحنی‌های تصحیح برای خرابیهای ریل



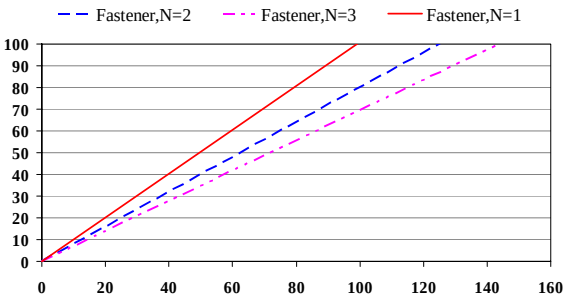
شکل٤. منحنی‌های کاهش برای خرابیهای دال بتنی



شکل۵. منحنی‌های تصحیح برای خرابیهای دال بتنی



شکل٦. منحنی‌های کاهش برای خرابیهای پابند



شکل۷. منحنی‌های تصحیح برای خرابیهای پابند

٤-۳ برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری

هدف نهایی سیستمهای تعمیر و نگهداری خطوط راه‌آهن، دستیابی به عملکرد ایمن خط و افزایش راحتی مسافر، همزمان با نگهداشتن هزینه‌های تعمیر و نگهداری در حد معقول می‌باشد. مدل پیشنهاد شده در این تحقیق برای ارزیابی کیفی خطوط بتنی راه‌آهن می‌تواند به عنوان ابزار مناسبی در این زمینه به‌کار رود. برای این منظور، برای خطوط باید طولهای مشخصی به عنوان "قطعات مدیریتی" تعریف شود که برنامه‌ریزی‌های تعمیر و نگهداری خطوط در این قطعات صورت گیرد. در این راستا هر یک از قطعات زیر بصورت یک قطعه مدیریتی به حساب می‌آید: خط بتنی مستقیم به طول حداکثر ۱۰۰۰ متر؛ خط بتنی در قوس؛ خط بتنی در تونل؛ خط بتنی در پل با دهانه بیش از ٤ متر؛ خط بتنی در ایستگاه؛ خط بتنی در سوزن.

در عمل در طول یک مسیر، بازرسی چشمی کلیه خط امکان پذیر نیست. در نتیجه پس از مشخص‌کردن قطعات مدیریتی در مسیر مورد نظر، هر قطعه به سگمنتهای ۳۰ متری تقسیم می‌شود. از میان این سگمنتها، تعدادی سگمنت با نظر کارشناسان تعمیر و نگهداری در محل مورد نظر انتخاب می‌شود. عملیات بازرسی چشمی در سگمنتهای منتخب انجام شده و میزان شاخصهای کیفی اجزاء خط در طول هر سگمنت بر اساس متدولوژی شرح داده شده در قسمتهای قبل محاسبه

می‌شود. با میانگین‌گیری از مقدار این شاخصها، شاخص کیفیت سازه‌ای خط در طول قطعه مدیریتی مورد نظر به دست می‌آید. شاخص‌های وضعیت باید بتوانند به طور کمی و کیفی، شرایط و وضعیت کلی اجزا خط را بیان کنند. میزان شاخص پیشنهادی در این تحقیق بر اساس مقیاس ۰ تا ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود. به منظور برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری می‌بایست میزان عددی شاخصها را با نیازهای تعمیر و نگهداری مرتبط کنیم. با توجه به نظر افراد گروه ارزیابی و همچنین با مطالعه استانداردهای موجود، وضعیت کیفی خط بتنی به پنج گروه خیلی خوب، خوب، متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف تقسیم‌بندی گردید. جدول ۳ رابطه تعریف شده بین اعداد شاخص وضعیت و عنوانهای کیفی هر یک را نشان می‌دهد.

۵. توسعه مدل شاخص کیفیت هندسی خط

در اکثر شاخصهای تعیین وضعیت خط بکار رفته در راه‌آهن دیگر کشورها، با بهره‌گیری از روابط انحراف معیار و میانگین، از روشهای آماری استفاده شده است. این مسأله در شاخصهای *TGI*، *Q* و *J* دیده می‌شود. انحراف معیار شاخص مناسبی برای سنجش پراکندگی نسبت به میانگین است. لیکن در ارزیابی پارامترهای هندسی، علاوه بر انحراف معیار، مقدار میانگین نیز باید مورد توجه قرار گیرد[۱و۲]. علت آن است که ممکن است مقدار میانگین داده‌های یک پارامتر هندسی بسیار بیشتر از مقدار بهینه مورد نظر باشد (یعنی اکثر داده‌ها مقادیری بیشتر از حد مجاز داشته باشند)، ولی پراکندگی حول مقدار میانگین کم باشد، بنابراین انحراف معیار بدست آمده عدد کوچکی می‌باشد که بیانگر وضعیت خوب پارامتر هندسی است، در صورتی‌که وضعیت واقعی پارامتر مورد نظر مطلوب نمی‌باشد.

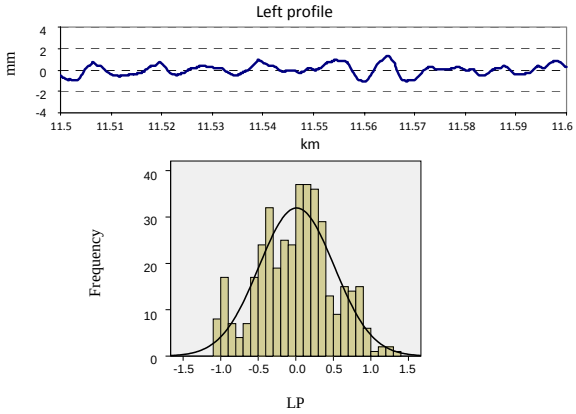
در این تحقیق پارامترهای هندسی خط شامل عرض‌خط، افتادگی (در ریلهای چپ و راست)، دیلم (در ریلهای چپ و راست) و اعوجاج، در واحدهای مختلف یک مسیر مورد مطالعه از خط بتنی راه‌آهن متروی تهران مورد تحلیل آماری قرار گرفت. برای این منظور، اطلاعات ثبت شده توسط ماشین اندازه‌گیر EM۸۰ برای واحدهای مختلف یک مسیر دسته‌بندی شده و منحنی‌های توزیع فراوانی برای هر کدام از پارامترهای هندسی رسم شدند. برای نمونه در شکلهای ۸ و ۹، مقادیر پارامترهای آماری و منحنی‌های فراوانی برای پارامتر افتادگی (در ریلهای چپ و راست) در یکی از واحدهای مسیر مورد آزمایش نشان داده شده است. بررسی این منحنی‌ها برای کلیه پارامترها در واحدهای مختلف مشخص کرد که تمامی منحنی‌های فراوانی، در خطوط بتنی راه‌آهن همانند خطوط بالاستی، بدون توجه به وضعیت کیفی و نوع واحدها با تقریب خوبی از الگوی توزیع نرمال یکسانی تبعیت می‌کنند[۷]. بطور کلی منحنی‌های توزیع نرمال، دارای شکل متقارنی بوده که اگر $\bar{x}$ مقدار میانگین و SD مقدار انحراف از معیار داده‌ها باشد، مقدار ماکزیمم داده‌ها در نقطه $x = \bar{X}$، حدود ٦٥٪ نمونه‌ها در فاصله $1SD$ از مقدار میانگین، ۹۵٪ نمونه‌ها در فاصله $2SD$ و حدود ۹۷٪ نمونه‌ها در فاصله $3SD$ از مقدار میانگین قرار می‌گیرند[۱].

بنابراین برای داده‌هایی با میانگین $\bar{X}$ و انحراف معیار SD حدود ۹۷٪ داده‌ها در محدوده ($\bar{x}+3SD$) و ($\bar{x}-3SD$) قرار می‌گیرند. در این صورت اگر بخواهیم داده‌ها را با مقادیر مجاز مقایسه نماییم، می‌توان با تقریب بسیار خوبی از رابطه زیر استفاده نمود [۱].

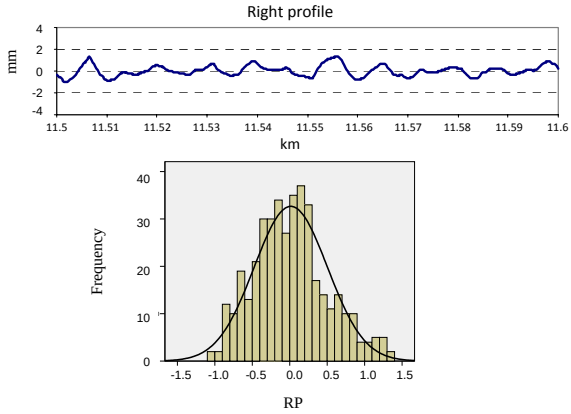
$$\bar{x} \pm 3SD \leq \text{مقدار مجاز} \qquad (۱۲)$$

جدول ۳. استراتژی تعمیر و نگهداری [۱و۳]

محدوده عددی	عنوان کیفی	توضیح
۱۰۰-۹۱	خیلی خوب	عیوب خیلی کم، عملکرد خط آسیب ندیده، عملیات فوری نیاز نیست، تعمیر و نگهداری روتین و پیشگیرانه باید انجام گردد.
۹۰-۷۱	خوب	خرابی متوسط، عملکرد خط گاها آسیب دیده، تعمیر و نگهداری روتین و تعمیرات جزئی نیاز است.
۷۰-۵۱	متوسط	خرابی مهم، عملکرد خط آسیب دیده اما نه جدی، تعمیر و نگهداری روتین و تعمیرات جزئی و گاهاً بهسازی خط نیاز است.
۵۰-۳۱	ضعیف	خرابی شدید روی درصد کمی از مسیر، عملکرد مسیر آسیب دیده و تعمیرات اساسی و گاهاً بازسازی خط نیاز است.
۳۰-۰	خیلی ضعیف	خرابی روی درصد زیادی از مسیر یا کل مسیر، عملکرد مسیر متوقف شده و تعمیرات اساسی و گاهاً نوسازی خط نیاز است.



شکل ۸. توزیع آماری اطلاعات افتادگی ریل چپ



شکل ۹. توزیع آماری اطلاعات افتادگی ریل راست

رابطه $\bar{x} \pm 3SD$ می‌تواند سنجش و شاخص مناسبی برای پارامترهای هندسی خط باشد و بعنوان شاخصی جداگانه برای هر یک از پارامترها استفاده شود، چون هم مقدار میانگین و هم مقدار انحراف معیار را در نظر گرفته است. همچنین هر یک دارای ضریب وزنی مشخصی می‌باشند. مقادیر عبارت $\bar{x} \pm 3SD$ برای هر کدام از پارامترهای هندسی با توجه به اطلاعات ثبت شده توسط ماشین اندازه‌گیر محاسبه می‌شوند[۱]. باید توجه داشت که مقادیر مذکور برای پارامترهای دیلم و افتادگی به صورت میانگین مقادیر برداشت شده در ریلهای چپ و راست به صورت زیر محاسبه می‌شوند[۷]:

$$PI = \frac{(|\bar{x}_L| + 3SD_{PL} + |\bar{x}_R| + 3SD_{PR})}{2} \qquad (۱۳)$$

$$GI = |\bar{x}_G| + 3SD_G \qquad (۱۴)$$

که در این روابط:

PI: شاخص افتادگی،

GI: شاخص عرض‌خط،

AI: شاخص دیلم و

TI: شاخص اعوجاج می‌باشند.

با توجه به مطالب عنوان شده در بخش قبل برای هر پارامتر هندسی شاخصی براساس رابطه $\bar{x} \pm 3SD$ تعریف شد. حال برای توسعه شاخص کلی کیفیت هندسی خط باید به طریقی شاخصهای پارامترهای هندسی را با هم ترکیب کرده و به یک معادله واحد برسیم. برای این منظور، ضرایب وزنی متفاوتی برای شاخص هر پارامتر در نظر می‌گیریم. ضرایب وزنی از میزان اهمیت هر یک از پارامترها تعیین می‌شوند. برای تعیین میزان اهمیت هر پارامتر هندسی از رواداری پارامترهای هندسی استفاده می‌شود. بدین منظور با استفاده از جدول حدود رواداریهای مجاز پارامترهای هندسی در خطوط بتنی راه‌آهن برخی از شهرهای مهم جهان (جدول ٤)و با در نظر گرفتن شرایط و سرعت پایین بهره‌برداری در خطوط بتنی راه‌آهن ایران از بیشترین بازه رواداری، استفاده گردید. بر این اساس شکل کلی شاخص وضعیت هندسی پیشنهادی برای خطوط بتنی ایران به‌صورت زیر پیشنهاد می‌شود:

$$OTGI = \frac{GI + 0.75AI + PI + TI}{3.75} \qquad (۱۷)$$

هر چه میزان رواداری پارامترها در خط کمتر باشد، اهمیت آن پارامتر بیشتر بوده و ضریب وزنی متعلق به آن افزایش می‌یابد. برای بدست آوردن این ضرایب،پارامتری را که کمترین رواداری را دارد بعنوان مرجع در نظر می‌گیریم و ضرایب هر پارامتر را با تقسیم رواداری پارامتر مرجع بر رواداری آن پارامتر بدست می‌آوریم. برای تعیین مقادیر حدی وضعیت خط بر اساس مقادیر حاصل از OTGI، باز هم از رواداریهای پارامترهای هندسی استفاده می‌کنیم. با قرار دادن رواداریهای پارامترهای هندسی در رابطه شاخص هر یک از پارامترها(GI, AI, PI, TI) مقادیر حدی شاخص OTGI بدست می‌آیند(۰<OTGI<۳،۰۲). از مزایای شاخص OTGI می‌توان به استفاده همزمان از انحراف معیار و مقدار میانگین و همچنین استفاده از ضرایب وزنی متفاوت برای پارامترهای هندسی مختلف اشاره کرد[۷].

٦. بکارگیری مدل‌های پیشنهادی

به منظور بررسی کاربردی و قابل اطمینان بودن مدلهای پیشنهادی در این تحقیق، برداشتهای میدانی و اطلاعات ماشین اندازه‌گیر خط به منظور بازرسی چشمی و مکانیزه، در قسمتهایی از خطوط مترو تهران صورت گرفت.این خطوط با حجم ترافیک

جدول ٤. رواداریهای مجاز برای پارامترهای هندسی در متروها [١١]

پارامتر هندسی (mm) / شهر	هنگ‌کنگ	بریتانیا	سانفرانسیسکو	استکهلم	پاریس	نیویورک	اوساکا	توکیو
تغییرات عرض خط	+١/٥ -١/٥	+٢ -٢	+٣ -٣	+١ -١	+٣ -١/٥	+٣ -٣	+٢ -٢	+١ -٢
افتادگی (پروفیل)	+٣ -٣	+٣ -٣	+٣ -٣	+٣ -٣	+١/٥ -١/٥	+٣ -٣	+٣ -٣	+٣ -٣
انحراف افقی (راستا)	٣ بر وتر ٣ m	٤ بر وتر ١٠ m	٤ بر وتر ١٠ m	٥ بر وتر ٩ m	١/٥بر وتر ٢٥ m	٣ بر وتر ٩ m	٣ بر وتر ١٠ m	٣ بر وتر ١٠ m
اعوجاج (پیچش)	١ بر وتر ٣ m	١ بر وتر ١٠ m	٣ بر وتر ١٠ m	٣ بر وتر ٩ m	١/٥ بر وتر ٢٥ m	٣ بر وتر ٩ m	١ بر وتر ١٠ m	٢ بر وتر ١٠ m

نسبتاً بالا روزانه مسافران زیادی را به نقاط مختلف تهران منتقل می‌کنند. در متروی تهران از سیستم مشابه با سیستم رهدا[٦] استفاده شده است، با این تفاوت که دال بتنی مسلح نیست و به علت ضخامت زیاد، نیازی به آرماتور در آن نبوده و به‌صورت وزنی اجرا شده است. در این خطوط از ریلهای نوع UIC٥٤ و پابندهای نوع وسلو استفاده شده است. نقشه شکل ١٠، محلهای مورد بررسی متروی تهران را نشان می‌دهد.

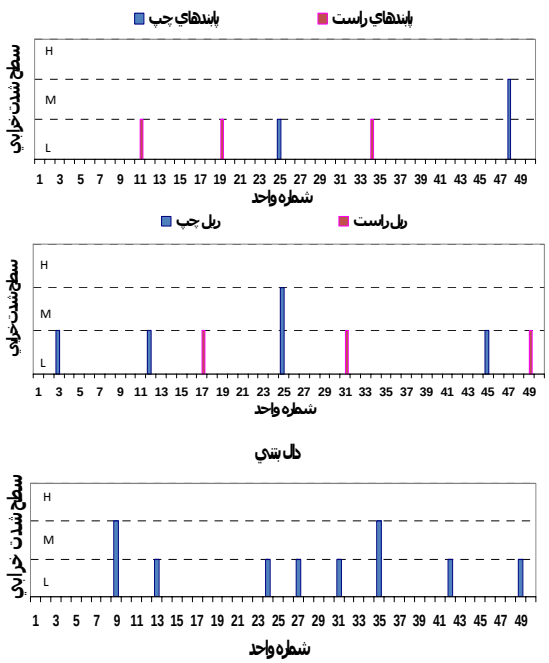
شکل ١٠. نقشه شماتیک محل‌های مورد بازرسی

٦-١ انجام بازرسی‌های چشمی و تحلیل اطلاعات

به منظور بازرسی چشمی مسیر، با توجه به در دسترس بودن و تنوع نسبی خرابی‌ها و کیفیت سازه‌ای ٧ سگمنت ٣٠ متری از نقاط مختلف مترو تهران انتخاب شد و بازرسیهای میدانی در آن مناطق صورت گرفت. به‌منظور بازرسی مسیرهای مورد نظر، فرم ارزیابی با در نظر گرفتن طول سگمنت ٣٠ متر طراحی شد.

در زیر به عنوان نمونه اطلاعات برداشت شده در یکی از سگمنتهای مورد بازرسی به صورت نمودارهای شکل ١١ نشان داده شده است.

در ادامه با استفاده از اطلاعات ثبت شده در فرمهای بازرسی، چگالی خرابی‌های اجزاء خط مورد محاسبه قرار گرفت. جدول ٥ مقدار شاخصهای محاسبه شده در ٧ سگمنت مورد بازرسی در این تحقیق را نشان می‌دهد. با استفاده از مقادیر چگالی خرابی بدست آمده برای اجزاء خط و با استفاده از نمودارهای توسعه یافته در این تحقیق، میزان شاخصهای کیفیت برای ریل، دال بتنی و پابندها بدست آمده است.

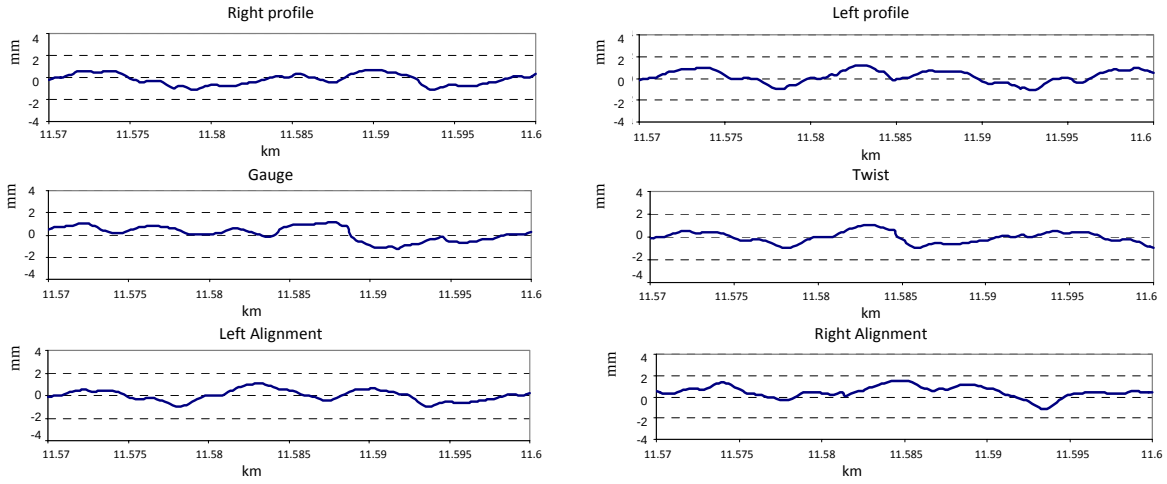


شکل ١١. اطلاعات برداشت شده در یکی از سگمنت‌ها

با مقایسه مقادیر شاخصهای کیفیت با جدول پیشنهادی تعمیر و نگهداری، می‌توان چگونگی عملیات تعمیر و نگهداری را

جدول ۵. شاخصهای محاسبه شده برای اجزاء خط

شماره سگمنت		۱	۲	۳	٤	٥	٦	۷
شاخصهای محاسبه شده	ریل	۸۱	۸۰	۹٦	۸۷	۹۱	۹۷	۸٤
	دال بتنی	۸۵	۸۹	۸۲	۹۲	۸۷	۹٦	۹۰
	پابند	۹٦	۹۵	۹٦	۹۸	۹۲	۹٤	۹۳



شکل ۱۲. نمونه اطلاعات برداشت شده در یک سگمنت ۳۰ متری

تعیین کرد. یکی از مزیتهای مهم روش ارزیابی چشمی پیشنهادی در این تحقیق امکان تشخیص دلایل اصلی کاهش کیفیت در قسمتهای مختلف خط است. با توجه به اینکه میزان شاخصهای ریل، دال بتنی و پابندها به طور جداگانه محاسبه می‌شود، با مقایسه این مقادیر می‌توان اجزاء با کیفیت پایین‌تر را شناسایی و برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری به منظور افزایش کیفیت خط را با دقت بیشتری انجام داد[۷].

٦-۲ بازرسی مکانیزه و تحلیل اطلاعات

جهت ثبت هندسه خط در خطوط متروی شهری تهران از ماشین اندازه‌گیر خط EM۸۰، استفاده می‌شود. پس از بازرسی چشمی محور مورد مطالعه،به منظور بررسی شرایط هندسی خط در این تحقیق، قسمتی از اطلاعات ثبت شده توسط این دستگاه، مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. پس از پردازش اطلاعات هندسی برداشت شده، میزان شاخصهای هندسی محاسبه‌شده‌است. با توجه به متدولوژی محاسبه شاخص کیفیت هندسی خطوط، پارامترهای عرض خط، تراز طولی (پروفایل)، دیلم و اعوجاج برای محاسبه شاخص مورد نیاز است. در شکل ۱۲،خروجی‌های ماشین اندازه‌گیر برای یک سگمنت ۳۰ متری به طور نمونه به صورت نمودار نشان داده شده است. مشخصات آماری این نمودارها در جدول ٦ نشان داده شده است. در ادامه با استفاده از اطلاعات ثبت شده توسط ماشین اندازه‌گیر و بر اساس متدولوژی ارایه شده در این تحقیق، شاخصهای کیفیت هندسی در مسیرهای مورد آزمایش محاسبه می‌گردد. جدول ۷ مقدار شاخصهای محاسبه شده در ٤ نمونه سگمنت،را نشان می‌دهد[۷]. با مقایسه مقادیر شاخصهای کلی کیفیت هندسی محاسبه شده با مقدارمجاز (۰<OTGI<۳٫۰۲) مشاهده می‌شود، که سگمنت‌های مورد مطالعه ملزومات کافی برای عبور قطار را دارا می‌باشند.

جدول ٦. مشخصات آماری اطلاعات

	TWS	ALR	ALL	GAU	RP	LP
تعداد	۱۲۱	۱۲۱	۱۲۱	۱۲۱	۱۲۱	۱۲۱
میانگین	-۰/۰٤	۰/٤٦	۰/۰۱	۰/۱٤	-۰/۱۹	۰/۱۷
انحراف معیار	۰/۵۰	۰/۵٦	۰/۵۰	۰/٦۵	۰/۵۱	۰/۵۸
واریانس	۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۲۵	۰/٤۲	۰/۲٦	۰/۳۳
دامنه	۲/۰۳	۲/٦۹	۲/۰۳	۲/٤۰	۱/۸٤	۲/۲۵
مینیمم	-۰/۹۷	-۱/۱۷	-۰/۹۷	-۱/۲۳	-۱/۱۲	-۱/۰٦
ماکزیمم	۱/۰٦	۱/۵۲	۱/۰۷	۱/۱۷	۰/۷۲	۱/۱۹

جدول ۷. مقادیر شاخصهای هندسی محاسبه شده

شماره سگمنت	شاخصهای محاسبه شده				
	OTGI	TI	AI	GI	PI
۱	۸۰/۱	٥٤/۱	۸۲/۱	۹/۲	۸۱/۱
۲	٥۹/۱	۳۱/۱	٦٦/۱	۸۷/۱	٥۳/۱
۳	۳٦/۱	۷۳/۱	۲۱/۱	٤۳/۱	۲/۱
٤	٦۲/۱	۷۹/۱	٤۹/۱	٥۷/۱	٦۱/۱

۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق توسعه شاخص کیفیت خط بتنی از دو منظر ارزیابی چشمی و ارزیابی مکانیزه مورد مطالعه قرار گرفت. بازرسی چشمی مسیر مورد مطالعه و سپس محاسبه شاخصهای کیفیت اجزاء خط، که برای گروه‌های پابند، دال بتنی و ریل که به ترتیب ۹۵، ۸۹ و ۸۸ به‌وسیله میانگین‌گیری این شاخصها در ۷ سگمنت بدست می‌آید، نشان داد که کمی‌کردن وضعیت کیفی اجزاء خطوط بتنی در ایران با استفاده از متدولوژی مورد استفاده و آنچه که انتظار می‌رفت، دارای نتایج مناسبی بوده و تقسیم‌بندی خرابیها و حدود شدت آنها برای تشخیص و پوشش دادن انواع خرابیها مناسب می‌باشد.

خطوط بتنی راه‌آهن به گروه‌های ریل (شامل ریل، صفحات اتصالی (در صورت وجود)، صفحات زیر ریل و درزها)، پابندها و دال بتنی تقسیم‌بندی می‌شوند، که اجزاء مربوطه از نظر جنس مواد، نحوه زوال و کاربرد متفاوت هستند. در این تحقیق میزان شاخص کیفیت برای گروههای مذکور به طور جداگانه ارزیابی شده است. در واقع با استفاده از شاخص کیفیت هر گروه بطور مجزا، میزان توانایی برای تحمل ترافیک عبوری و نیاز گروه‌ها به تعمیر و نگهداری را می‌توان نشان داد.

در ارزیابی مکانیزه صورت گرفته در این تحقیق بر اساس تحلیلهای آماری بر روی نتایج بدست آمده از ماشین اندازه‌گیر خط، مشخص شد که توزیع فراوانی پارامترهای هندسی، از خصوصیات توزیع نرمال تبعیت می‌کنند. با توجه به این مطلب در توسعه شاخصهای هندسی علاوه بر انحراف معیار، پارامتر میانگین نیز در نظر گرفته شده است. در مسیر مورد مطالعه، نتیجه شاخص هندسی برای خط موردنظر با توجه به مقدار مجاز بین ۳٫۰۲ و ۰ می‌باشد، که ملزومات کافی برای عبور قطار را نشان می‌دهد.

۸. پانویس‌ها

1- Engineering Management System (EMS)
2- Pavement Management System (PMS)
3- Deduct Value (DV)
4- Deduct Density Model
5- Correction Factor
6- Rheda

۹. منابع

۱- میرمحمدصادقی سیدجواد (۱۳۸٤)، "گزارش تحقیقاتی پروژه پیاده‌سازی سیستم مدیریت تعمیر و نگهداری خطوط ریلی ایران"، دانشکده مهندسی راه‌آهن.

۲- اکبری بهزاد (۱۳۸٤)، "الگوریتم ساخت وضعیت هندسی خط جهت سامانه مدیریت نگهداری خطوط ریلی ایران"، پایان‌نامه کارشناسی، دانشکده مهندسی راه‌آهن، دانشگاه علم و صنعت.

3-D. R. Uzarski (1993), “Development of Condition Indexes for Low Volume Railroad Track”, USACERL.

4-Mundrey J. S. (2003), “Railway Track Engineering”, Tata McGraw-Hill Publishing.

5- Anderson M. (2002), “Strategic Planning Of Track Mantenance”, Department of Infrastructure, Borlänge, Sweden, December 2002.

6- Madejski J., Grabczyk J. (2002), “Continuous Geometry Measurement for Diagnostics of Tracks and Switches”, Proceedings of the International Conference on Switches Delft University of Technology, March 2002, Delft, Netherlands.

۷- رخشانی پویا (۱۳۸۷)، "ارایه مدلی جهت تعیین شاخص کیفیت روسازی‌های بتنی راه‌آهن"، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تربیت‌مدرس تهران، پاییز ۱۳۸۷.

8- D. R. Uzarski (1993), “Condition Indexes for Low Volume Railroad Track: Condition Survey Inspection and Distress Manual”, USACERL.

9- Ponnuswamy S.(2005),“Highway and rail transit tunnel inspection manual”,Federal highway administration.

10- ACI 201.1R-92 (1992), “Guide for Make a Condition Survey of Concrete”, ACI Manual of Concrete Practice.

11- Ponnuswamy S. (2004), “Ballastless Track for Urban Transit Lines”, IE (I) Journal-CV, Volume 85, November.

پیشنهاد رابطه محاسبه مقاومت بتن محصور شده در ستونهای پل‌های بتن آرمه تقویت شده به کمک FRP

علی خیرالدین، دانشیار، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
حسین نادرپور، دانشجوی دکتری سازه، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
سید روح‌الله حسینی واعظ، دانشجوی دکتری سازه، دانشکده عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
Email: akheirodin@semnan.ac.ir

چکیده

پل‌ها به لحاظ رفتار و پاسخ سازه‌ای در مقایسه با سازه‌های معمولی در موقعیت ویژه‌ای قرار دارند. با توجه به آنکه درجه نامعینی پل‌ها به نسبت ساختمان‌ها بسیار کمتر می‌باشد، شکست یک ستون می‌تواند منجر به خرابی کل سیستم سازه گردد. با توجه به آنکه پل به عنوان یک شریان حیاتی در صنعت حمل‌ونقل مطرح می‌باشد، فراهم آوردن امنیت لرزه‌ای کافی برای آن از درجه اهمیت بالایی برخوردار است. ستون بتن آرمه پل در اثر بارهای لرزه‌ای سه مد اصلی شکست شامل: شکست برشی، شکست خمشی و شکست وصله اتصال را تجربه می‌نماید. استفاده از کامپوزیت‌های FRP[1] به صورت دورپیچ به عنوان یکی از تکنیک‌های مقاوم سازی ستون‌های بتن آرمه پل‌ها در سالیان اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. سختی و مقاومت مشخصه بالا، عمر مفید زیاد، مقاومت زیاد در برابر خوردگی و خصوصیات حرارتی قابل کنترل از امتیازات مهم کامپوزیت‌های FRP بر مصالح معمول می‌باشد. در این مقاله یک مدل مقاومت فشاری برای بتن محصور شده و دورپیچ شده توسط FRP معرفی شده که در واقع توسعه‌ای از تئوری مقاومت موهر می‌باشد؛ این مدل، تنش فشاری محصور شده (f'_{cc}) را به تنش محصور کنندگی (f'_l) مربوط می‌نماید. در فرم کلی این مدل نیازمند اطلاعاتی درباره مقاومت فشاری تک محوری (f'_c)، مقاومت کششی تک محوره (f'_t) و یک عدد n مرتبط با شکل پوش موهر حالات مقاومت نهایی می‌باشد. یک مدل سهمی درجه دو که به صورت عددی بسط داده شده برای استفاده در بتن محصور شده با FRP توسط نویسندگان پیشنهاد شده است. صحت معادله پیشنهادی با استفاده از آزمایشات موجود نمونه‌های بتنی محصور شده به کمک دورپیچ FRP مورد تایید قرار گرفته است. در انتها، یک مثال کاربردی برای تقویت ستون بتن آرمه پل نیز آورده شده است.

واژه‌های کلیدی: پل بتن آرمه، دورپیچ FRP، محصور شدگی، پوش مقاومت نهایی موهر، تقویت

۱. مقدمه

در پاسخ سازه‌ای، پل‌ها نسبت به دیگر سازه‌ها منحصر به فرد هستند. درجه نامعینی استاتیکی در پل‌ها عموما در مقایسه با ساختمانها بسیار کمتر است؛ بنابراین شکست یک ستون و یا یک فونداسیون می‌تواند باعث خرابی کل سیستم پل گردد. به علاوه، تأثیر اندرکنش خاک-سازه و تغییر مکان ناشی از حرکت زلزله نیز در پل‌ها بسیار محسوس‌تر از ساختمانهاست. از آنجایی که پل، یک مولفه حیاتی در سیستم حمل‌ونقل می‌باشد، می‌بایست امنیت لرزه‌ای کافی در طول یک زلزله را برای آن فراهم آورد. از زمان زلزله سن فرناندو[2] در سال ۱۹۷۱، در تمامی‌آیین‌نامه‌های معتبر، طراحی ستون‌های بتن آرمه پل‌ها به علت ضعف آرماتورهای عرضی و یا ناکافی بودن جزئیات اجرایی لرزه‌ای دچار تغییر اساسی گردید. بنابراین بسیاری از