

توسعه روشی ساده به منظور پیش‌بینی عمر خستگی روسازی

دال خط راه‌آهن

مقاله پژوهشی

امین خواجه دزفولی*، استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: Amin_dezfuly@scu.ac.ir

دریافت: ۹۸/۰۳/۱۹ - پذیرش: ۹۸/۰۷/۲۵

صفحه ۸۱-۶۵

چکیده

براساس ادبیات موضوع، خستگی بتن مهمترین عامل از بین رفتن روسازی دال خط راه‌آهن می‌باشد. در این مقاله، روشی ساده توسعه داده شده است تا با کمک آن بتوان عمر روسازی دال خط را تخمین زد. به این منظور با کمک مدل نظری تیر دوگانه قرار گرفته بر روی بستر ارتجاعی، تاریخچه زمانی تنش تجربه شده توسط دال بتنی ناشی از عبور یک چرخ قطار تقریب زده می‌شود. در ادامه و با کمک روش سیلان باران، تعداد سیکل‌های دامنه تنش تجربه شده توسط دال بتنی ناشی از عبور ناوگان تقریب زده می‌شود. در نهایت و با توجه به مدل رفتاری خستگی بتن ناشی از تنش‌های کششی و براساس اصل ماینر، عمر دال بتنی تخمین زده می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که افزایش ضخامت روسازی دال خط و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن باعث افزایش شدید طول عمر روسازی می‌شوند. همچنین افزایش سختی بستر روسازی منجر به افزایش خفیفی در عمر روسازی می‌شود. افزایش بار محوری قطار و کاهش سرفاصله زمانی اعزام قطار تاثیر بسیار مخربی بر کاهش عمر روسازی دال خط دارند.

واژه‌های کلیدی: روسازی دال خط راه‌آهن، خستگی، عمر

۱- مقدمه

طراحی و توسعه روش‌های طراحی این دسته از روسازی‌های راه‌آهن و بخصوص دال بتنی آن در دسترس می‌باشد (خواجه دزفولی، ۱۳۹۷). این امر در حالیست که روند مدون و کلاسه‌بندی شده‌ای به منظور تحلیل و طراحی روسازی بالاستی راه‌آهن در مراجع مختلف توسعه داده شده است (ذاکری و صادقی، ۲۰۰۷؛ صادقی و براتی، ۲۰۱۰). در راستای تحلیل روسازی دال خط راه‌آهن، تلاش‌های مختلفی به صورت تحلیلی و عددی صورت گرفته است (صادقی و همکاران، ۲۰۱۶؛ صادقی و همکاران، ۲۰۱۷؛ اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۶). در مراجع مختلف، تلاش‌های اندکی در خصوص طراحی اجزای مختلف روسازی دال خط راه‌آهن شده است. دال بتنی مهمترین عضو روسازی دال خط راه‌آهن

حمل و نقل ریلی در مقایسه با سایر واریانت‌های حمل و نقل نظیر حمل و نقل جاده‌ای و حمل و نقل هوایی دارای مزایای فراوانی مانند صرفه‌های اقتصادی، آلودگی کمتر زیست محیطی و ایمنی بالاتر می‌باشد (UIC, 2010). در میان روسازی‌های مختلف راه‌آهن، امروزه استفاده از روسازی دال خط راه‌آهن به دلیل هزینه‌های بسیار کمتر تعمیر و نگهداری آن و همچنین پایداری و مقاومت بیشتر آن در برابر نیروهای وارده، در حال گسترش می‌باشد (شیباو و همکاران، ۲۰۰۸؛ ذاکری و همکاران، ۲۰۱۱). متأسفانه به دلیل جوان بودن تکنولوژی تحلیل، طراحی و ساخت روسازی دال خط راه‌آهن و همچنین انحصاری بودن این موضوع، مطالب بسیار اندکی در خصوص تحلیل، تعیین معیارهای

توسط پاودا و همکاران انجام گرفته است (پاودا و همکاران، ۲۰۰۸؛ پاودا و همکاران ۲۰۱۵)، عمر خستگی دال بتنی روسازی دال خط ناشی از تنش‌های فشاری تجربه شده توسط روسازی دال خط (به علت عبور ناوگان) ارزیابی شده است. در تحقیقات آنها، مدلی عددی از روسازی دال خط توسعه داده شده است و در این مدل عددی، روسازی دال خط تحت اثر بارهای ناوگان قرار گرفته است. در ادامه با کمک مدل عددی توسعه داده شده، تاریخچه زمانی تنش تجربه شده توسط دال بتنی استخراج شده است. در نهایت با شمارش تعداد سلیکل‌های تنش و با استفاده از مدل خستگی بتن ناشی از تنش‌های فشاری، طول عمر دال بتنی تخمین زده شده است. در تحقیقات انجام شده توسط پاودا و همکاران (پاودا و همکاران، ۲۰۰۸؛ پاودا و همکاران ۲۰۱۵)، با توجه به اینکه دال بتنی در سطوح بالا و پایین خود دارای میلگردهای خمشی می‌باشد، بنابراین فرض بر آن بوده که هیچگونه تنش خمشی کششی به بتن وارد نشده و صرفاً تنش‌های فشاری به آن وارد می‌شوند. بر همین اساس در تحقیقات انجام شده توسط پاودا و همکاران، از مدل تخریب بتن ناشی از تنش‌های فشاری استفاده شده است و به بیانی دیگر تصور شده است که تمامی تنش‌های کششی توسط میلگردهای خمشی تحمل می‌شوند (پاودا و همکاران، ۲۰۰۸؛ پاودا و همکاران ۲۰۱۵). در صورتی که سختی بستر دال بتنی به میزان کافی تامین شده باشد، نیازی به استفاده از میلگردهای خمشی درون دال بتنی نمی‌باشد (ایسولد و مارکین، ۲۰۰۳). اگر در دال بتنی میلگردهای خمشی وجود داشته باشند، در این صورت تنش‌های کششی هر چند ناچیز ایجاد شده در دال بتنی منجر به خستگی و خرابی دال بتنی می‌گردند (ایسولد و مارکین، ۲۰۰۳؛ ژو و کای، ۲۰۱۱). تنها پژوهشی که در آن عمر خستگی یک دال بتنی ناشی از تنش-های کششی تخمین زده شده است، تحقیق انجام شده توسط ژو و کای می‌باشد (ژو و کای، ۲۰۱۱). در این تحقیق عمر خستگی بستر بتنی قرارگرفته در زیر دال بتنی پیش‌تنیده روسازی دال خط تعیین شده است (ژو و کای، ۲۰۱۱). در تحقیق آنها مدلی عددی از اندرکنش دال خط و ناوگان توسعه داده شده و تاریخچه زمانی تنش تجربه شده توسط دال بتنی تعیین شده است (ژو و کای، ۲۰۱۱). در ادامه با کمک شمارش سیکل‌های تنش به کمک روش سیلان باران، و با

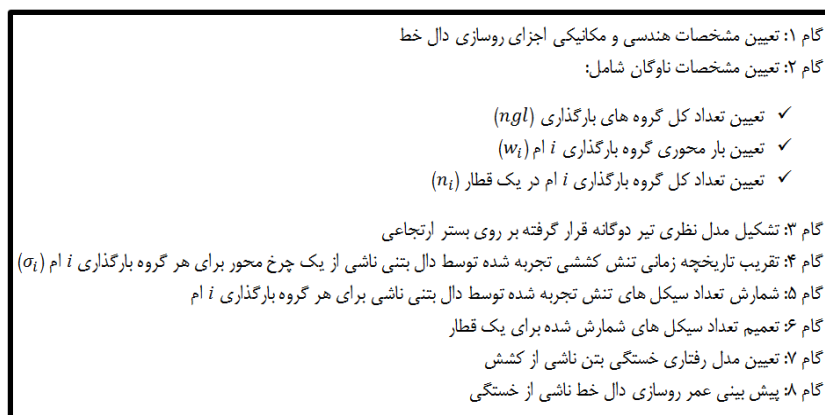
است که باعث متمایز شدن آن از سایر روسازی‌های راه‌آهن می‌گردد. براساس ادبیات موضوع، بستر روسازی دال خط راه‌آهن از مقدار سختی بسیار زیادی باید برخوردار باشد (ایسولد، ۲۰۰۳). همین امر باعث می‌شود تا تنش‌های خمشی (تنش کششی) قابل توجهی درون دال بتنی ناشی از عبور ناوگان ایجاد نگردد و طراحی دال بتنی روسازی دال خط عملاً براساس معیارهای سازه‌ای نباشد (ایسولد، ۲۰۰۳؛ ایسولد و مارکین، ۲۰۰۳). براساس آیین‌نامه راه‌آهن آمریکا (AREMA)، معیار طراحی دال بتنی در روسازی دال خط معیارهای بهره‌برداری نظیر خستگی بتن دال بتنی ناشی از تنش‌های کششی می‌باشد (AREMA, 2006). براساس توصیه این آیین‌نامه، روند طراحی دال بتنی روسازی دال خط راه‌آهن باید مشابه با روند طراحی دال بتنی در روسازی بتنی راه و فرودگاه باشد (طراحی بر مبنای معیار خستگی). در همین راستا و در تحقیقات معدودی، دال بتنی روسازی دال خط بر اساس معیارهای خستگی مورد طراحی قرار گرفته است. خواجه دزفولی با ایجاد تغییراتی در روش آشتو (روش طراحی دال بتنی روسازی بتنی راه و فرودگاه) و توسعه روش آشتوی اصلاح شده، ضخامت دال بتنی روسازی دال خط راه‌آهن را براساس معیارهای خستگی تخمین زده است (خواجه دزفولی، ۱۳۹۷). خواجه دزفولی و ساکی‌پور با ایجاد اصلاحاتی در روش انجمن سیمان پورتلند (PCA) که مختص طراحی روسازی بتنی راه و فرودگاه می‌باشد، روش اصلاح شده PCA را به منظور تخمین عمر دال بتنی روسازی دال خط راه‌آهن ارائه کرده‌اند (خواجه دزفولی و ساکی‌پور، ۱۳۹۶). نکته قابل توجه در این میان این است که روش‌های آیین‌نامه‌ای ارائه شده، مختص طراحی روسازی دال خط قرار گرفته بر روی بستر سخت می‌باشد. در صورتی که دال خط بر روی بستر خاکی نرم قرار گیرد، روش‌های آیین‌نامه‌ای موجود کاربردی نداشته و باید روش‌های دیگری جهت طراحی دال بتنی روسازی دال خط مورد استفاده قرار گیرد. خاویر و همکاران عمر خستگی ریل را در روسازی دال خط را تخمین زده‌اند (خاویر و همکاران، ۲۰۱۶). در تحقیق انجام شده توسط آنها، مدلی عددی از دال خط ساخته شده است و سپس با توجه به تاریخچه زمانی تنش تجربه شده توسط ریل، عمر ریل ناشی از معیار خستگی تخمین شده است (خاویر و همکاران، ۲۰۱۶). در تحقیقاتی دیگر که

نظری تیردوگانه قرار گرفته بر روی بستر ارتجاعی، تاریخچه زمانی تنش کششی دال بتنی تقریب زده شده و سپس با کمک روش سیلان باران، تعداد سیکل‌های تنش شمارش می‌شود. در نهایت با توجه به مدل تخریب خستگی بتن ناشی از تنش‌های کششی وارد بر آن، عمر دال بتنی تخمین زده می‌شود.

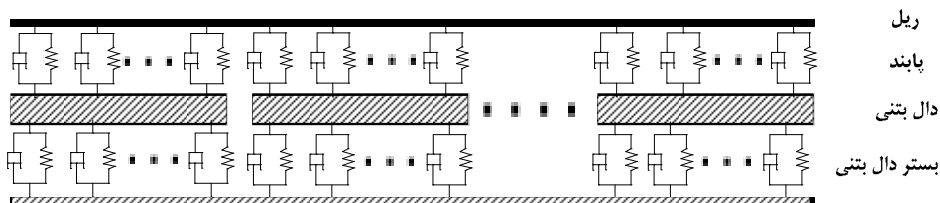
۲- روش انجام تحقیق

در شکل ۱، الگوریتم کلی تخمین عمر دال بتنی در این تحقیق ارائه شده است. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، در ابتدا مشخصات هندسی و مکانیکی اجزای مختلف روسازی دال‌خط تعیین می‌شوند. در ادامه و با توجه به مشخصات ناوگان، گروه‌های بارگذاری تعیین می‌شوند. سپس با تشکیل مدل نظری تیر دولایه قرار گرفته بر روی بستر ارتجاعی، تاریخچه زمانی تنش تجربه شده توسط دال بتنی تقریب زده می‌شود. در ادامه با کمک روش سیلان باران، تعداد سیکل‌های تنش شمارش می‌شوند. در نهایت با کمک مدل تخریب بتن ناشی از تنش‌های کششی، عمر دال بتنی روسازی دال‌خط تخمین زده می‌شود. در ادامه جزئیات مراحل مختلف نشان داده شده در الگوریتم شکل ۱ تشریح شده‌اند.

توجه به مدل تخریب بتن ناشی از تنش‌های کششی، عمر بستر بتنی تخمین زده شده است (ژو و کای، ۲۰۱۱).
 مروری بر ادبیات موضوع در زمینه طراحی دال بتنی روسازی دال‌خط راه‌آهن نشان می‌دهد که کلیه تحقیقات انجام شده وابسته به مدل‌های عددی ساخته شده از روسازی دال‌خط می‌باشند. به بیانی دیگر، استفاده از الگوریتم‌های توسعه داده شده در این تحقیقات، مستلزم استفاده از برنامه‌های کامپیوتری و صرف هزینه محاسباتی بالا می‌باشد. از سویی دیگر، در هیچ یک از تحقیقات عددی انجام شده، عمر خستگی دال بتنی روسازی دال‌خط راه‌آهن براساس تنش‌های کششی ایجاد شده در آن تعیین نشده است. این امر درحالیست که براساس توصیه آیین‌نامه راه‌آهن آمریکا، طراحی دال بتنی روسازی دال‌خط راه‌آهن باید بر مبنای خستگی ناشی از تنش‌های کششی ایجاد شده در آن صورت گیرد. همچنین روش‌های آیین‌نامه‌ای موجود جهت طراحی روسازی دال‌خط محدود به دال‌های بتنی قرار گرفته بر روی بستر خاکی سخت می‌باشند. بر همین اساس ضرورت توسعه یک روش ساده که بتواند به صورت تقریبی و با توجه به تخریب بتن دال بتنی ناشی از خستگی کششی (در تمامی حالات سختی بستر)، عمر دال بتنی را تخمین بزند، به شدت نیاز می‌شود. این تحقیق در راستای پاسخگویی به همین نیاز انجام گرفته است. بر همین اساس، در ابتدا با کمک مدل



شکل ۱. الگوریتم پیش بینی عمر روسازی دال‌خط راه‌آهن



شکل ۲. نمایی از روسازی دال‌خط و اجزای آن

۱-۲- تعیین مشخصات هندسی و مکانیکی اجزای

روسازی دال خط

اجزای اصلی روسازی دال خط راه آهن شامل ریل، پابند، دال بتنی و بستر زیرین آن می‌باشد. در شکل ۲ نمایی دو بعدی از روسازی دال خط نشان داده شده است. دال بتنی در روسازی دال خط به صورت قطعاتی مجزا ساخته و به کار برده می‌شود. مشخصات هندسی و مکانیکی اجزای مختلف روسازی دال خط مورد استفاده در این مقاله شامل صلبیت خمشی ریل ($E_r I_r$) بر حسب نیوتن در میلیمتر مربع، سختی پد پابند (k_{pad}) بر حسب نیوتن بر میلیمتر، فاصله میان پابندها (S_{pad}) بر حسب میلیمتر، عرض دال بتنی (B) بر حسب میلیمتر، ضخامت دال بتنی (h) بر حسب میلیمتر، مدول الاستیسیته بتن (E_c) بر حسب نیوتن بر میلیمتر مربع، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن (f'_c) بر حسب نیوتن بر میلیمتر مربع و سختی بستر دال بتنی (k_{sub}) بر حسب نیوتن بر میلیمتر مکعب می‌باشند.

۲-۲- تعیین مشخصات ناوگان

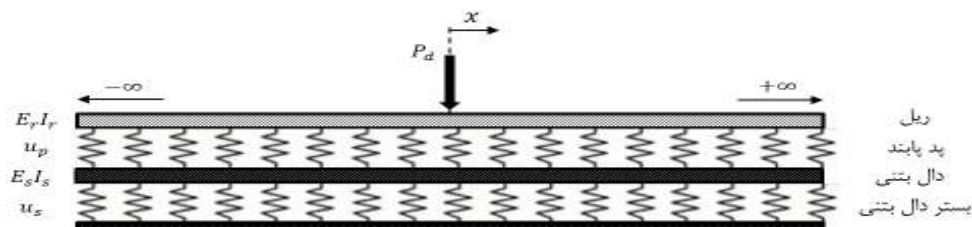
مشخصات ناوگان عبوری شامل تعیین تعداد کل گروه‌های بارگذاری (n_{gl})، تعداد چرخ محورهای گروه بارگذاری Z ام در یک رام قطار (\bar{n}_1) و بار محوری گروه بارگذاری Z ام (P_1) می‌باشد. کلیه چرخ محورهایی که دارای بار محوری یکسان می‌باشند، یک گروه بارگذاری در نظر گرفته می‌شوند. به عنوان مثال زمانی که یک رام قطار شامل ۱۰ واگن مسافری چهارمحوره با بار محوری ۱۴ تن و یک لکوموتیو ۶ محوره با بار محوری ۲۰ تن می‌باشد، در اینصورت می‌توان گفت که این رام قطار شامل ۲ گروه بارگذاری ($n_{gl} = 2$) می‌باشد. گروه بارگذاری اول دارای بار محوری ۱۴ تن ($P_1 = 14 \text{ ton}$) و دارای تعداد ۴۰ چرخ محور ($\bar{n}_1 = 40$) تن و همچنین گروه بارگذاری دوم دارای بار محوری ۲۰ تن ($P_2 = 20 \text{ ton}$) و دارای تعداد ۶ چرخ محور ($\bar{n}_2 = 6$)

می‌باشد. باید توجه داشت که با توجه به شرایط بهره‌برداری (سرفاصله زمانی اعزام قطارها)، میزان ترافیک عبوری از روی روسازی دال خط در طول یکسال تعیین می‌شود. \bar{m}_j تعداد دفعات عبور گروه بارگذاری Z ام از روی روسازی دال خط در طول یکسال می‌باشد.

۳-۲- تشکیل مدل نظری تیر دولایه بر روی بستر

ارتجاعی

در ادبیات موضوع، به منظور تعیین لنگر خمشی ایجاد شده در اجزای روسازی راه آهن ناشی از عبور ناوگان، مدل‌های نظری و عددی مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است. مدل نظری تیر دولایه قرار گرفته بر روی بستر ارتجاعی، یکی از روش‌های ساده و در عین حال نسبتاً دقیقی است که به منظور تعیین لنگر خمشی ایجاد شده در دال بتنی روسازی دال خط کاربرد دارد (هتتی، ۱۹۶۴). در این مدل نظری، کلیه اجزای روسازی شامل ریل، پابند، دال بتنی و بستر دال بتنی در نظر گرفته شده‌اند. ریل و دال بتنی به صورت تیرهای پیوسته و با طول بی‌نهایت شبیه‌سازی شده‌اند. همچنین پد پابند و بستر دال بتنی به صورت فنرهای گسترده در نظر گرفته شده‌اند. در این مدل فرض بر آن است که یک چرخ محور بر روی ریل و در وسط آن قرار گرفته است. در شکل ۳، نمایی از مدل نظری تیر دولایه قرار گرفته بر روی بستر ارتجاعی به همراه بار چرخ روی آن نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ۳ نشان داده شده است، تیر بالا معادل ریل می‌باشد که صلبیت خمشی آن $E_r I_r$ می‌باشد. میان تیر بالا و پایین، فنری گسترده با مدول u_p در نظر گرفته شده است. u_p معادل مدول پد پابند می‌باشد و با کمک رابطه ۱ تعیین می‌شود. در رابطه ۱، u_p مدول پد پابند (Mpa)، k_p سختی پد پابند (N/mm) و S_p فاصله پابندها از یکدیگر (mm) می‌باشند.



شکل ۳. مدل نظری تیر دو لایه قرار گرفته بر روی بستر ارتجاعی

$$u_p = \frac{k_p}{S_p} \quad (۱)$$

و مدول u_s قرار گرفته است. u_s مدول بستر دال بتنی می‌باشد که با کمک رابطه ۲ تعیین می‌شود. در رابطه ۲، u_s مدول بستر دال بتنی (Mpa)، k_s مدول عکس العمل بستر دال بتنی (N/mm^3) و B_s عرض دال بتنی (mm) می‌باشد. با نوشتن معادلات تعادل برای مدل نظری تیر دولایه قرار گرفته بر روی بستر ارتجاعی، معادلات دیفرانسیل ارائه شده در رابطه ۳ تشکیل می‌شوند (هنتی، ۱۹۶۴).

$$u_s = \frac{k_s}{B_s} \quad (۲)$$

$$E_r I_r \frac{d^4 y_r}{dx^4} + u_p (y_r - y_s) = 0 \quad (۳)$$

$$E_s I_s \frac{d^4 y_s}{dx^4} + (u_p + u_s) y_s - u_p y_r = 0$$

توابع هارمونیک سینوس و کسینوس و همچنین با اعمال شرایط مرزی و بر اساس تئوری کلاسیک خمش تیر، تابع لنگر خمشی دال بتنی به صورت معادله ۴ تعیین می‌گردد (هنتی، ۱۹۶۴).

$$M(x_i) = -\frac{P_d u_r}{8\beta E_r I_r} \left[\frac{e^{-\lambda_1 x_i}}{\lambda_1} (\cos \lambda_1 x_i - \sin \lambda_1 x_i) - \frac{e^{-\lambda_2 x_i}}{\lambda_2} (\cos \lambda_2 x_i - \sin \lambda_2 x_i) \right] \quad (۴)$$

روسازی دال خط عدد ۲ در نظر گرفته می‌شود (AREMA, 2006). همچنین در رابطه ۴، پارامترهای β ، λ_1 ، λ_2 به کمک روابط ارائه شده در معادله ۵ محاسبه می‌شوند (هنتی، ۱۹۶۴). کلیه پارامترهای موجود در معادله ۵، پیش‌تر تعریف شده‌اند.

$$A = \frac{u_r (I_r + I_s) + u_s I_r}{E_r I_r I_s}, \quad B = \frac{u_r u_s}{E_r I_r E_s I_s} \quad (۵)$$

$$\alpha = \frac{A}{2}, \quad \beta = \sqrt{\frac{A^2}{4} - B}$$

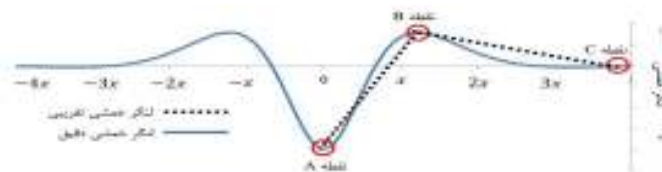
$$D_1 = \frac{u_r}{E_r I_r} - (\alpha - \beta), \quad D_2 = \frac{u_r}{E_r I_r} - (\alpha + \beta)$$

$$\lambda_1 = \sqrt[4]{\frac{\alpha + \beta}{4}}, \quad \lambda_2 = \sqrt[4]{\frac{\alpha - \beta}{4}}$$

تیر پایینی در مدل تیر دولایه بر روی بستر ارتجاعی، معادل دال بتنی می‌باشد. صلبیت خمشی دال بتنی ($E_s I_s$) پارامتری می‌باشد که در مدل نظری تیر دو لایه کاربرد دارد. E_s مدول الاستیسیته بتن دال بتنی (Mpa) و I_s ممان اینرسی مقطع عرضی دال بتنی حول محور افقی گذرنده از مرکز سطح آن (mm^4) می‌باشد. در مدل نظری تیر دو لایه قرار گرفته بر روی بستر ارتجاعی، تیر پایینی بر روی بستری با فنر گسترده

در معادلات نشان داده شده در رابطه ۳، $y_r(x)$ مقدار تغییر شکل قائم ریل در راستای قائم و در محل x و $y_s(x)$ مقدار تغییر شکل قائم دال بتنی در راستای قائم و در محل x می‌باشد. بقیه پارامترها نیز پیش‌تر تعریف گردیده‌اند. با در نظر گرفتن جابجایی تیرهای بالا و پایین به صورت ترکیبی از

در رابطه ۴، $M(x_i)$ لنگر خمشی دال بتنی در محل x_i ($N \cdot mm$)، $E_r I_r$ صلبیت خمشی ریل ($N \cdot mm^2$)، u_r مدول پد پابند (Mpa) و P_d بار شبه استاتیکی چرخ محور (N) می‌باشند. مقدار P_d با ضرب ضریب ضربه دینامیکی در مقدار بار استاتیکی چرخ محور محاسبه می‌شود. براساس آیین‌نامه راه‌آهن آمریکا (AREMA) ضریب ضربه دینامیکی در



شکل ۴: نمودار لنگر خمشی دال بتنی ناشی از یک چرخ محور

گردد تا محل نقاط B و C تعیین شود. با توجه به پیچیده بودن معادله لنگر خمشی دال بتنی (معادله ۴)، حل پارامتریک آن و تعیین محل دقیق این نقاط امکان‌پذیر نمی‌باشد. به منظور یافتن محل تقریبی نقاط B و C در نمودار لنگر خمشی دال بتنی، روندی سعی و خطا پیموده می‌شود. به این منظور، در ابتدا پارامتر مشخصه طول L_β به کمک رابطه ۶ تعیین می‌گردد (ین و لی، ۲۰۰۷). کلیه پارامترهای مورد استفاده در رابطه ۶، پیش‌تر تعریف شده‌اند. محل تقریبی نقطه B در نمودار لنگر خمشی دال بتنی در حدود فاصله L_β از نقطه اعمال بار ($x = 0$) می‌باشد. همچنین محل تقریبی نقطه C در نمودار لنگر خمشی دال بتنی در حدود فاصله $3/5L_\beta$ از نقطه اعمال بار ($x = 0$) می‌باشد. باید توجه داشت که محل‌های حدس زده شده برای نقاط B و C، به صورت تقریبی بوده و باید به صورت دقیق‌تری تعیین شوند. به همین دلیل فرض می‌شود که محل دقیق‌تر نقاط B و C در محدوده ۳ متری از فاصله حدس زده شده قرار دارد. بر همین اساس و به منظور یافتن دقیق‌تر محل نقاط B و C، تعداد ۹ نقطه که با یکدیگر فاصله ۰/۵ متری دارند در نظر گرفته می‌شوند (به جدول ۱ توجه شود).

$$L_\beta = \sqrt[4]{\frac{E_s I_s}{u_s}} + \sqrt[4]{\frac{E_s I_s}{u_p}} \quad (6)$$

جدول ۱. تعیین مختصات نقاط B و C در نمودار تقریبی لنگر خمشی دال بتنی

نقاط i	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
فاصله نقطه از محل حدس زده شده \bar{x}_i	-3	-2/5	-2	-1/5	-1	-0/5	0	1/5	2

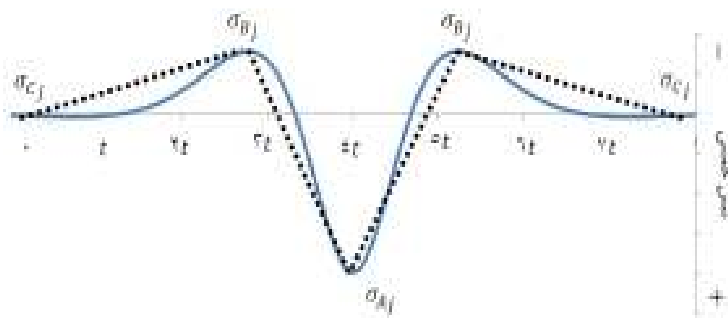
با کمک روابط ۷ و ۸ و ۹ مختصات مختلف به ترتیب برای نقاط B و C تعیین می‌شود. در روابط ۷ و ۸، i شماره نقطه (به کمک جدول ۱ تعیین می‌شود)، \bar{x}_i فاصله نقطه i ام از محل حدس زده شده (به کمک جدول ۱ تعیین می‌شود)

$$x_{B_i} = L_\beta + \bar{x}_i \quad (7)$$

$$x_{C_i} = 3/5 \times L_\beta + \bar{x}_i \quad (8)$$

نمودار لنگر خمشی تقریب زده شده، لحاظ شده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نمودار تاریخچه زمانی لنگر خمشی تقریبی تجربه شده در یک نقطه دلخواه از دال بتنی ناشی از عبور یک چرخ محور، به صورت شکل ۴ ترسیم شده است. حال با کمک تئوری ساده خمش، مقدار تنش کششی ایجاد شده در دال بتنی محاسبه می‌گردد (رابطه ۹). در رابطه ۹، σ_{ij} تنش خمشی ایجاد شده در دال بتنی در نقطه i ام و ناشی از عبور چرخ محور گروه بارگذاری i ام (M_{ij})، M_{ij} لنگر خمشی ایجاد شده در دال بتنی در نقطه i ام و ناشی از عبور چرخ محور گروه بارگذاری i ام (N .mm) و S_x مدول مقطع عرضی دال بتنی (mm^3) می‌باشد. شمارنده i بین ۱ تا ۳ متغیر می‌باشد. شمارنده i برابر ۱، ۲ و ۳ به ترتیب معادل نقاط A، B و C در نمودار تقریبی لنگر خمشی نشان داده شده در شکل ۴ می‌باشد. همچنین مقدار i از ۱ تا n_{gl} متغیر می‌باشد (n_{gl} نشان‌دهنده تعداد کل گروه‌های بارگذاری می‌باشد). بر همین اساس می‌توان بیان کرد که به ازای هر گروه بارگذاری (به ازای یک بار محوری مشخص) یک نمودار تنش خمشی با کمک سه نقطه A، B و C تقریب زده می‌شود و به بیانی دیگر، تعداد n_{gl} نمودار تقریبی تاریخچه زمانی تنش محاسبه می‌شود. در شکل ۵ نمایی از تاریخچه زمانی تنش تقریب زده شده برای گروه بارگذاری i ام نشان داده شده است.

$$\sigma_{ij} = \frac{M_{ij}}{S_x}$$



شکل ۵. نمودار تقریبی تاریخچه زمانی تنش خمشی دال بتنی ناشی از گروه بارگذاری i ام

با قرار دادن مختصات مختلف (تعیین شده به کمک روابط ۷ و ۸) در رابطه ۹، مقدار لنگر خمشی ایجاد شده در دال بتنی به ازای مختصات نقاط مختلف (۹ مقدار برای نقطه B و ۹ مقدار برای نقطه C) تعیین می‌شود. با محاسبه لنگر هر ۹ نقطه موجود در جدول ۱، می‌توان مختصات نقاط B و C را تعیین کرد. بدین ترتیب مقدار لنگر در نقطه B، حداکثر لنگر منفی بدست آمده از جدول در فاصله x خواهد بود. محل نقطه C، در جایی خواهد بود که مقدار لنگر در آن فاصله صفر می‌گردد.

۲-۴- تقریب تاریخچه زمانی تنش تجربه شده توسط

دال بتنی

با در نظر گرفتن یک نقطه دلخواه از دال بتنی، در صورتی که فرض گردد یک چرخ محور با سرعت ناچیز از روی روسازی عبور کند (سرعتی کمتر از ۱۰ کیلومتر بر ساعت)، لنگر خمشی تقریب زده شده در شکل ۴ در آن نقطه از روسازی به وجود می‌آید (هتنی، ۱۹۶۴؛ ین و لی، ۲۰۰۷، فریبا، ۱۹۷۲). به بیانی دیگر تاریخچه زمانی لنگر خمشی تجربه شده توسط آن نقطه به صورت شکل ۴ می‌باشد. با توجه به اینکه ضریب ضربه دینامیکی در مقدار بار استاتیکی چرخ محور ضرب شده است، بنابراین می‌توان با اطمینان بالا فرض کرد که اثرات دینامیکی عبور قطار از روی ریل نیز در

(۹)

می‌باشد (ژو و کای، ۲۰۱۱). بنابراین در این مرحله باید تعداد سیکل‌های بسته و نیم بسته نمودار هیستریزس شمارش شوند. یکی از روش‌های متداول شمارش تعداد سیکل‌های

۲-۵- شمارش تعداد سیکل‌های تنش

در پیش‌بینی عمر بتن ناشی از خستگی، تعداد سیکل‌های بسته نمودار هیستریزس (نمودار تنش - کرنش) دارای اهمیت

گرفته است و این درحالیست که یک رام قطار شامل تعداد nw_j چرخ محور از گروه بارگذاری j ام می‌باشد. بنابراین با توجه به اصل ماینر (هوانگ، ۲۰۰۴) و در نظر گرفتن اثرات تخریب تجمعی خطی ناشی از خستگی (ژو و کای، ۲۰۱۱)، به منظور در نظر گرفتن اثرات کل چرخ‌های گروه بارگذاری j ام، کفایت تعداد چرخ‌های گروه بارگذاری j ام در یک رام قطار (nw_j) در تعداد سیکل‌های یک چرخ محور ضرب شوند. به بیانی دیگر، در صورتی که در یک رام قطار، گروه بارگذاری j ام دارای nw_j چرخ محور باشد، در این صورت با توجه به جدول ۲، دامنه تنش $\sigma_{A_j} - \sigma_{B_j}$ به تعداد $1/5 \times nw_j$ و دامنه تنش σ_{B_j} به تعداد nw_j به روسازی دال‌خط اعمال می‌شود (ستون آخر جدول ۲). باید توجه داشت که تعداد کل گروه‌های بارگذاری ngl می‌باشد و جدول شماره ۲ باید به ازای هر گروه بارگذاری (ngl) تشکیل شود.

تنش روش سیلان باران، می‌باشد (پاودا و همکاران، ۲۰۰۸؛ پاودا و همکاران، ۲۰۱۵). در صورتی که تاریخچه زمانی تنش تجربه شده توسط دال بتنی تابعی پیچیده باشد، به منظور شمارش تعداد سیکل‌های تنش به کمک روش سیلان باران نیاز به استفاده از برنامه‌های کامپیوتری می‌باشد (پاودا و همکاران، ۲۰۱۵؛ ژو و کای، ۲۰۱۱). اما در این تحقیق با توجه به سادگی تاریخچه زمانی تنش تجربه شده توسط دال بتنی (شکل ۵)، بدون نیاز به هیچگونه برنامه کامپیوتری تعداد سیکل‌های تنش شمارش می‌شوند. در جدول ۲، سیکل‌های تنش تاریخچه زمانی تنش ارائه شده در شکل ۵ برای گروه بارگذاری j ام شمارش شده‌اند. در جدول ۲، مقادیر σ_{A_j} و σ_{B_j} تنش خمشی تجربه شده توسط دال بتنی به ترتیب در نقاط A و B ناشی از گروه بارگذاری j ام می‌باشند و به کمک رابطه ۹ محاسبه می‌شوند. محاسبات انجام شده تاکنون فقط برای عبور یک چرخ محور از گروه بارگذاری j انجام

جدول ۲. تعداد سیکل تنش تقریبی تجربه شده توسط دال بتنی ناشی از گروه بارگذاری j ام

ردیف (i)	تنش ابتدا	تنش انتها	میانگین تنش σ_{mean}	دامنه تنش $\Delta\sigma_{ij}$	تعداد سیکل برای یک چرخ	تعداد سیکل برای nw_j چرخ محور
۱	σ_{A_j}	σ_{B_j}	$\frac{\sigma_{A_j} - \sigma_{B_j}}{2}$	$\Delta\sigma_{1j} = \sigma_{A_j} - \sigma_{B_j}$	۱/۵	$nw_j \times 1/5$
۲	σ_{B_j}	0	$\frac{\sigma_{B_j}}{2}$	$\Delta\sigma_{2j} = \sigma_{B_j}$	۱	nw_j

۲-۶- تخمین عمر دال بتنی روسازی دال‌خط راه‌آهن

در رابطه ۱۱، f_c مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن (Mpa) و f_{ctm} مقاومت کششی استاندارد بتن (Mpa) می‌باشد. همچنین در رابطه ۱۰، $\Delta\sigma_{ej}$ با توجه به اصل ماینر و به کمک رابطه ۱۲ تعیین می‌شود (ژو و کای، ۲۰۱۱).

$$\Delta\sigma_{ej} = \frac{f_{ctm}}{13/92} \log \left(\frac{1}{n_{ij}} \sum_i n_{ij} 10^{\frac{13/92 \Delta\sigma_{ij}}{f_{ctm}}} \right) \quad (12)$$

در رابطه ۱۲، $\Delta\sigma_{ej}$ دامنه تنش معادل گروه بارگذاری j ام (Mpa)، f_{ctm} مقاومت کششی استاندارد بتن (Mpa)، i شمارنده ردیف تنش در جدول ۲ (از ۱ تا ۲ تغییر می‌کند)، j شمارنده گروه بارگذاری، $\Delta\sigma_{ij}$ دامنه تنش ردیف i ام در جدول ۲ و گروه بارگذاری j ام و n_{ij} تعداد تکرارهای دامنه تنش ردیف i ام (آخرین ستون جدول ۲) و گروه بارگذاری j

در این مرحله، با کمک یک مدل خرابی خستگی بتن ناشی از تنش‌های کششی، طول عمر دال بتنی تخمین زده می‌شود. تعداد تکرارهای مجاز دامنه تنش معادل گروه بارگذاری j ام ($\Delta\sigma_{ej}$) به کمک رابطه ۱۰ تعیین می‌شود (کورنلیسن، ۱۹۸۴).

$$N_j = 10^{13/92 - 13/92 \left(\frac{\Delta\sigma_{ej}}{f_{ctm}} \right)} \quad (10)$$

در رابطه ۱۰، N_j تعداد تکرارهای مجاز گروه بارگذاری j ام، $\Delta\sigma_{ej}$ دامنه تنش معادل گروه بارگذاری j ام (Mpa) و f_{ctm} مقاومت کششی استاندارد بتن (Mpa) می‌باشند. مقاومت کششی استاندارد بتن (f_{ctm}) به کمک رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود (EN, 1992).

$$f_{ctm} = 0/3 \times (f_c)^{2/3} \quad (11)$$

عکس‌العمل بستر دال بتنی در نظر گرفته شده است که به ترتیب معادل بستر نرم، متوسط و سخت می‌باشند. به منظور تعیین عمر خستگی دال بتنی به کمک روش ارائه شده توسط ژو و کای (ژو و کای، ۲۰۱۱)، مدلی دو لایه از اندرکنش دال‌خط و ناوگان ساخته می‌شود (اسماعیلی و همکاران، ۲۰۱۶). مشخصات روسازی دال‌خط همانند مشخصات روسازی استفاده شده در این بخش است. ناوگانی با مشخصات ناوگان تهران از روی روسازی دال‌خط عبور می‌کند. تاریخچه زمانی تنش کششی تجربه شده توسط دال بتنی ناشی از عبور ناوگان محاسبه می‌گردد. با اعمال روش سیلان باران بر روی تاریخچه زمانی تنش بدست آمده، تعداد سیکل‌های تنش شمارش می‌گردد. شمارش تعداد سیکل‌های تنش به کمک روش سیلان باران، با استفاده از یک کد که در محیط نرم افزار MATLAB تهیه شده است انجام می‌گیرد و در نهایت با کمک مدل پیش‌بینی عمر خستگی بتن ناشی از تنش‌های کششی و سیکل‌های تنش شمارش شده، عمر خستگی روسازی دال‌خط راه‌آهن محاسبه می‌شود (ژو و کای، ۲۰۱۱). در شکل ۶، عمر دال‌بتنی روسازی دال‌خط ناشی از خستگی به کمک روش ارائه شده در این تحقیق و روش ارائه شده توسط ژو و کای (ژو و کای، ۲۰۱۱) با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، عمر تخمین زده شده توسط روش تحقیق حاضر در تمامی حالات از عمر تخمین زده شده توسط ژو و کای (ژو و کای، ۲۰۱۱) کمتر می‌باشد و این امر نشان دهنده دست بالا بودن نتایج روش ساده ارائه شده در این تحقیق می‌باشد. همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، در هر دو روش، با افزایش مدول بستر دال بتنی، عمر خستگی دال‌بتنی افزایش می‌یابد. همانگونه که در شکل ۶ نشان داده شده است، اختلاف میان نتایج بدست آمده از این دو روش در حدود ۱۳ تا ۱۶ درصد می‌باشد. باید توجه داشت که استفاده از روش ژو و کای (ژو و کای، ۲۰۱۱) مستلزم صرف هزینه محاسبات بالا (ساخت مدل عددی اندرکنش دال‌خط و قطار، انجام تحلیل به کمک مدل ساخته شده، تعیین تاریخچه زمانی تنش دال‌بتنی، اعمال روش سیلان باران بر روی تاریخچه زمانی تنش به کمک نرم‌افزار کامپیوتری و نهایتاً شمارش تعداد سیکل‌های تنش) می‌باشد. در نقطه مقابل، با کمک روش

ام می‌باشند. همچنین پارامتر n_{ej} (تعداد تکرارهای دامنه تنش معادل $\Delta\sigma_{ej}$) به کمک رابطه ۱۳ تعیین می‌شود.

$$n_{ej} = n_{1j} + n_{2j} \quad (13)$$

در رابطه ۱۳، n_{1j} تعداد تکرار ردیف ۱ در جدول ۲ گروه بارگذاری j ام (ستون آخر جدول ۲) و n_{2j} تعداد تکرار ردیف ۲ در جدول ۲ گروه بارگذاری j ام (ستون آخر جدول ۲) می‌باشند. پس از تعیین تعداد تکرارهای مجاز برای تمامی گروه‌های بارگذاری (N_j)، نوبت به تخمین عمر روسازی دال‌خط بر حسب سال می‌رسد. با در نظر گرفتن اصل ماینر و پدیده خطی تجمعی خستگی بتن، رابطه ۱۴ به منظور محاسبه عمر روسازی دال‌خط (age) بر حسب سال مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$age = \sum_{j=1}^{ngl} \frac{N_j}{\bar{m}_j} \quad (14)$$

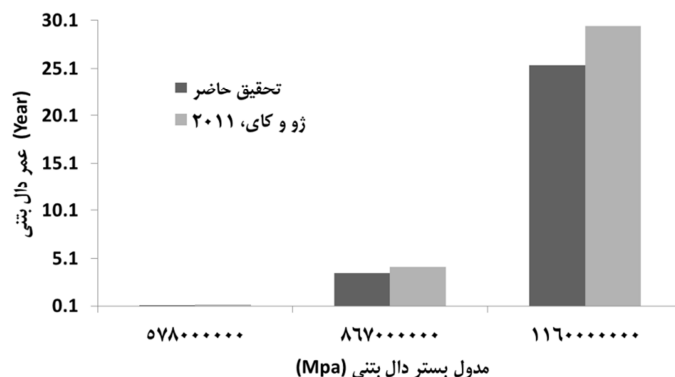
در رابطه ۱۴، age عمر روسازی دال‌خط بر حسب سال، N_j تعداد تکرارهای مجاز گروه بارگذاری j ام (توسط رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود)، \bar{m}_j تعداد عبور چرخ محورهای گروه بارگذاری j ام در طول یک سال (با توجه به مشخصات ناوگان در بخش ۲-۲ محاسبه می‌شود).

۳- اعتبارسنجی نتایج به دست آمده

به منظور اعتبارسنجی نتایج بدست آمده توسط روش ارائه شده در این پژوهش، مقایسه‌ای میان عمر خستگی دال بتنی روسازی دال‌خط بدست آمده از روش ارائه شده در این تحقیق و مقدار متناظر بدست آمده از روش ارائه شده توسط ژو و کای (ژو و کای، ۲۰۱۱) (که روشی عددی با هزینه محاسبات بالا محسوب می‌شود) انجام گرفته است. به منظور انجام این مقایسه، نیاز است تا صورت مسئله‌ای تعریف و با کمک این دو روش حل گردد. قطار مسافری دارای ۱۰ واگن (هر واگن دارای چهار چرخ محور) با بار محوری ۱۴ تن در نظر گرفته می‌شود. سیستم تعلیق ناوگان از نوع مشخصات ناوگان تهران در نظر گرفته می‌شود (صادقی و همکاران، ۲۰۱۷). سرفاصله زمانی اعزام قطارها ۵ دقیقه می‌باشد. مقادیر ضخامت دال بتنی، مقاومت فشاری بتن و مدول پدپابند به ترتیب ۲۵ سانتیمتر، ۲۵ مگاپاسکال و ۷۰ نیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شده است. همچنین سه مقدار $5/78 \times 10^8$ ، $8/67 \times 10^8$ و $1/16 \times 10^9$ مگاپاسکال برای مدول

دست بالا تخمین زده شده است. این موضوع نشان دهنده کارایی و دقت روش ساده ارائه شده در این تحقیق می‌باشد.

حاضر و بدون استفاده از هیچگونه نرم‌افزار کامپیوتری (بدون صرف هزینه محاسبات بالا) عمر خستگی دال بتنی حداکثر با حدود ۱۶ درصد خطا نسبت به روش دقیق و به صورت



شکل ۶. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج ادبیات موضوع

۴- نتایج و بحث

تنش کششی مجاز بتن تجاوز نکرده است. در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ لگاریتم طول عمر روسازی دال‌خط براساس سرفاصله زمانی اعزام قطارها و بارمحوری قطارها ارائه شده است. در این شکل‌ها، ضخامت روسازی ۲۵ سانتیمتر، مدول بستر ۵۷۸۰ نیوتن بر متر مربع در نظر گرفته شده است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن در نتایج ارائه شده در شکل‌های ۷ تا ۹ به ترتیب ۲۵، ۴۰ و ۵۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است.

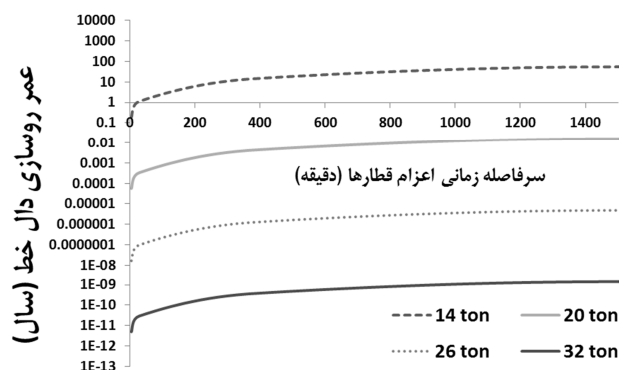
همانگونه که در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده است، با افزایش سرفاصله زمانی اعزام قطارها، طول عمر روسازی دال‌خط افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در بار محوری ۱۴ تن، با افزایش سرفاصله زمانی اعزام قطارها از ۵ دقیقه به ۱۴۴۰ دقیقه (افزایش ۲۸۷ درصدی)، طول عمر روسازی دال‌خط از ۰/۱۹ سال به ۵۴/۹ سال افزایش می‌یابد (افزایش ۲۸۷ درصدی). این امر بدین معنی است که با افزایش n درصدی سرفاصله زمانی اعزام قطارها، شاهد افزایش n درصدی طول عمر روسازی دال‌خط خواهیم بود. به بیانی دیگر سرفاصله زمانی اعزام قطارها دارای تأثیری خطی بر طول عمر روسازی است. این پدیده در کلیه حالات قابل مشاهده شده است.

به منظور نشان دادن قابلیت روش توسعه داده شده در این تحقیق، با کمک این روش مثال‌های مختلفی از تعیین عمر روسازی دال‌خط تحت مشخصات هندسی، مکانیکی و بهره‌برداری مختلف بررسی شده است. به بیانی دیگر، با حل مثال‌های مختلف، تأثیر ضخامت بتنی (مشخصات هندسی)، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، سختی بستر دال بتنی (مشخصات مکانیکی)، بار محوری واگن‌ها و سرفاصله زمانی اعزام قطارها (مشخصات بهره‌برداری) در طول عمر روسازی دال‌خط راه‌آهن مورد ارزیابی قرار گرفته است. بر همین اساس و در جدول ۳، مقادیر مختلف در نظر گرفته شده برای این پارامترها ارائه شده‌اند. در تمامی حالات، عرض دال بتنی ۲/۶ متر در نظر گرفته شده است. ریل UIC60 به عنوان ریل روسازی دال‌خط در نظر گرفته شده است و همچنین مدول پد پایند $70 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ در نظر گرفته شده است. به علاوه، فرض شده است که یک رام قطار، شامل ۱۰ واگن چهار محوره می‌باشد و تمامی محورها دارای بار محوری یکسان می‌باشند.

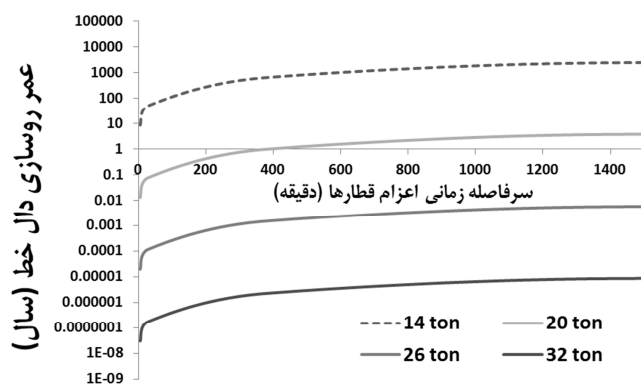
با توجه به مقادیر ارائه در جدول ۳، ۴۳۲ حالت مختلف (مطالعه پارامتریک) برای تعیین طول عمر روسازی دال‌خط با مشخصات هندسی، مکانیکی و بهره‌برداری متفاوت تعیین شده است. نکته حائز اهمیت این است که در هیچ یک از حالات، تنش کششی ایجاد شده در بتن دال‌خط از مقدار

جدول ۳. مقادیر در نظر گرفته شده برای بررسی پارامتریک

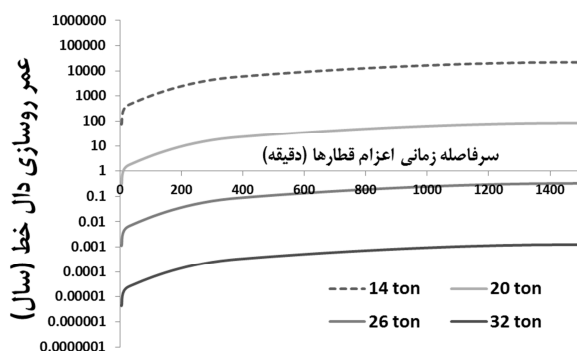
نوع مشخصه	متغیر	واحد	مقادیر
مشخصات هندسی	ضخامت دال بتنی	cm	۵۵، ۴۰، ۲۵
مشخصات مکانیکی	مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن	Mpa	۵۵، ۴۰، ۲۵
	مدول بستر دال بتنی	Mpa	$1/16 \times 10^9$ ، $8/67 \times 10^8$ ، $5/78 \times 10^8$
مشخصات بهره‌برداری	بار محوری	ton	۳۲، ۲۶، ۲۰، ۱۴
	سرفاصله زمانی اعزام قطار	min	۱۴۴۰، ۳۶۰، ۳۰، ۵



شکل ۷. تاثیر سرفاصله زمانی اعزام قطارها و بارمحوری بر طول عمر روسازی دال خط در حالت ضخامت ۲۵ سانتیمتر، مدول بستر ۵۷۸ مگا نیوتن بر متر مربع و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ۲۵ مگاپاسکال



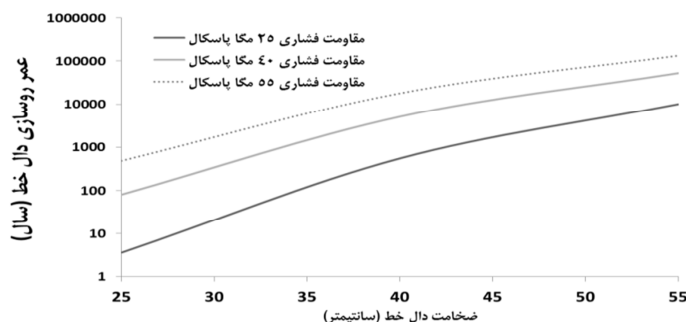
شکل ۸. تاثیر سرفاصله زمانی اعزام قطارها و بارمحوری بر طول عمر روسازی دال خط در حالت ضخامت ۲۵ سانتیمتر، مدول بستر ۵۷۸ مگا نیوتن بر متر مربع و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ۴۰ مگاپاسکال



شکل ۹. تاثیر سرفاصله زمانی اعزام قطارها و بارمحوری بر طول عمر روسازی دال‌خط در حالت ضخامت ۲۵ سانتیمتر، مدول بستر ۵۷۸ مگا نیوتن بر متر مربع و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ۵۵ مگاپاسکال

می‌باشد. به بیانی دیگر افزایش ۳۷/۵ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن منجر به افزایش ۲۱۰۰ درصدی طول عمر روسازی می‌شود. این امر نشان می‌دهد که افزایش مقاومت فشاری بتن، تاثیر بسیار زیادی بر طول عمر روسازی دال‌خط راه آهن دارد. تاثیری که افزایش سرفاصله زمانی اعزام قطارها و افزایش بار محوری بر طول عمر روسازی دال‌خط دارد، برای تمامی حالات مختلف مقاومت فشاری بتن، ضخامت دال‌خط و سختی بستر یکسان و ثابت می‌باشد. بر همین اساس در ادامه برای دو حالت مختلف بار محوری ۱۴ تن (سرفاصله زمانی ۵ دقیقه) و بار محوری ۳۲ تن (سرفاصله زمانی ۵ دقیقه) نتایج ارائه شده است. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱، با ثابت نگه داشتن مقدار مدول بستر دال‌خط به میزان $8/67 \times 10^8$ نیوتن بر متر مربع، تاثیر ضخامت دال‌خط و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بر عمر روسازی دال‌خط به ترتیب برای بار محوری ۱۴ تن (سرفاصله زمانی ۵ دقیقه) و بار محوری ۳۲ تن (سرفاصله زمانی ۵ دقیقه) بررسی شده است.

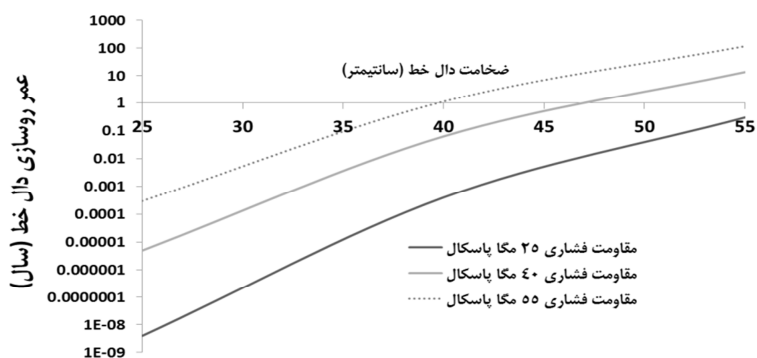
همچنین در شکل‌های ۷ تا ۹، با کاهش بارمحوری قطار، عمر روسازی دال‌خط افزایش می‌یابد. به گونه‌ای که با کاهش بار محوری از ۲۰ تن به ۱۴ تن (کاهش حدود ۳۰٪)، عمر روسازی دال‌خط از ۰/۰۲ سال به ۵۴ سال افزایش می‌یابد (افزایش ۲۷۰۰ درصدی). این امر بدین معناست که افزایش میزان بار محوری قطارهای عبوری از روی دال‌خط، تاثیر بسیار زیادی در طول عمر روسازی دال‌خط دارد و این تاثیر به صورت تصاعدی می‌باشد. همانگونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، درصد تاثیر افزایش بارمحوری در طول عمر روسازی دال‌خط برای تمامی حالات یکسان می‌باشد. در صورتی که شکل‌های ۷، ۸ و ۹ با یکدیگر مقایسه شوند، با افزایش مقاومت فشاری بتن (با ثابت فرض کردن بار محوری و سرفاصله زمانی اعزام قطارها)، طول عمر روسازی افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، با در نظر گرفتن بار محوری ۲۰ تن و سرفاصله زمانی ۳۶۰ دقیقه، طول عمر روسازی دال‌خط برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ۲۵، ۴۰ و ۵۵ مگاپاسکال به ترتیب برابر با ۰/۰۰۴، ۰/۹۴ و ۲۱/۲ سال



شکل ۱۰. تاثیر ضخامت دال‌خط و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بر طول عمر روسازی دال‌خط در حالت مدول بستر $8/67 \times 10^8$ نیوتن بر متر مربع، بار محوری ۱۴ تن و سرفاصله زمانی اعزام ۵ دقیقه

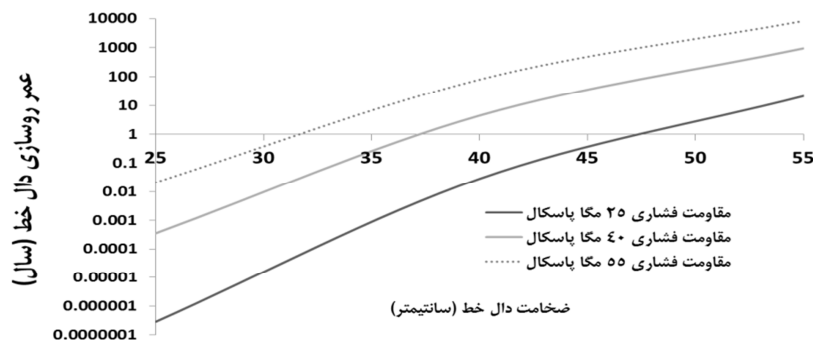
افزایش مقاومت فشاری از ۴۰ به ۵۵ مگاپاسکال (افزایش ۳۷/۵ درصدی)، طول عمر روسازی دال خط از ۸۰ سال به ۴۸۲ سال افزایش پیدا می‌کند (افزایش ۵۰۰ درصدی). در صورتی که در ضخامت ۵۵ سانتیمتری، با افزایش مقاومت فشاری از ۴۰ به ۵۵ مگاپاسکال (افزایش ۳۷/۵ درصدی)، طول عمر روسازی دال خط به میزان ۱۵۰ درصد افزایش پیدا می‌کند. نتایج ارائه شده در شکل ۱۰، برای بار محوری ۱۴ تن و سرفاصله زمانی اعزام قطارها به مدت ۵ دقیقه می‌باشد. این مشخصات بهره‌برداری کاملاً با شرایط بهره‌برداری خطوط مترو منطبق می‌باشد. براساس نتایج ارائه شده در شکل ۱۰ می‌توان بیان داشت که در صورت استفاده از بتنی با مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیش از ۴۰ مگا پاسکال در روسازی دال خط، عمر بیش از ۱۰۰ سال برای روسازی دال خط طراحی شده محتمل خواهد بود.

همانگونه که در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است، با افزایش ضخامت دال بتنی عمر روسازی دال خط به شدت افزایش پیدا می‌کند و این پدیده برای تمامی حالات مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن صادق می‌باشد. به عنوان مثال در شکل ۱۰ (بار محوری ۱۴ تن) و در مقاومت فشاری ۴۰ مگاپاسکال، زمانی که ضخامت دال بتنی از ۲۵ سانتیمتر به ۴۰ سانتیمتر افزایش پیدا می‌کند (افزایش ۶۰ درصدی)، طول عمر روسازی دال خط از ۸۰ سال به بیش از ۵۰۰۰ سال افزایش پیدا می‌کند (افزایش ۹۸ درصدی). همچنین با افزایش مقاومت ۲۸ روزه بتن، طول عمر دال بتنی نیز افزایش پیدا می‌کند. البته نکته حائز اهمیت این است که هرچه ضخامت دال بتنی بیشتر شود، تاثیر مقاومت ۲۸ روزه بتن در افزایش طول عمر روسازی کمتر می‌باشد. به عنوان مثال در شکل ۱۰ (بار محوری ۱۴ تن) و در ضخامت ۲۵ سانتیمتر، با



شکل ۱۱. تاثیر ضخامت دال خط و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بر طول عمر روسازی دال خط در حالت مدول بستر دال خط

$$8/67 \times 10^8 \text{ نیوتن بر متر مربع، بار محوری ۳۲ تن و سرفاصله زمانی اعزام ۵ دقیقه}$$

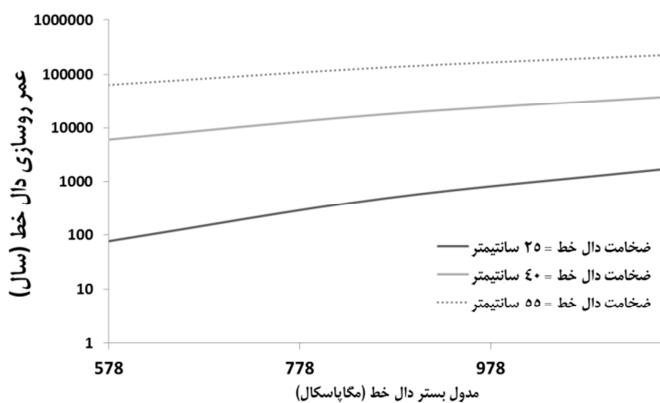


شکل ۱۲. تاثیر ضخامت دال خط و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن بر طول عمر روسازی دال خط در حالت مدول بستر دال خط $8/67 \times 10^8$

$$\text{نیوتن بر متر مربع، بار محوری ۳۲ تن و سرفاصله زمانی اعزام ۳۶۰ دقیقه}$$

به دیدی مناسب‌تر از عمر روسازی دال‌خط راه‌آهن در خطوط باری، نتایج مربوط به مدول بستر دال‌خط $8/67 \times 10^8$ نیوتن بر متر مربع، بار محوری ۳۲ تن و سرفاصله زمانی اعزام ۶ ساعت (۳۶۰ دقیقه) در شکل ۱۲ ارائه شده‌اند. همانگونه که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، با افزایش سرفاصله زمانی اعزام قطارها به ۳۶۰ دقیقه (۶ ساعت) در خط باری (بار محوری ۳۲ تن)، طول عمر روسازی دال‌خط در مقایسه با سرفاصله زمانی ۵ دقیقه به شدت افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در یک خط باری (با سرفاصله زمانی ۶ ساعت) اگر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ۵۵ مگاپاسکال و ضخامت دال بتنی ۴۰ سانتیمتر باشد، عمر روسازی دال‌خط به بیش از ۸۰ سال می‌رسد. این افزایش عمر روسازی دال‌خط در سایر حالات ضخامت دال بتنی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن نیز مشهود می‌باشد.

در شکل ۱۱ و با افزایش بار محوری به ۳۲ تن، طول عمر روسازی دال‌خط در مقایسه با بار محوری ۱۴ تن به شدت کاهش پیدا می‌کند. این نکته در نتایج شکل‌های ۷ تا ۹ نیز دیده می‌شود. در این حالت نیز با افزایش ضخامت دال بتنی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، طول عمر روسازی دال‌خط افزایش پیدا می‌کند و میزان تاثیر آنها نیز مساوی با تاثیر آنها در بار محوری ۱۴ تن می‌باشد. حداکثر بار محوری در خطوط باری راه‌آهن حدود ۳۲ تن می‌باشد. با فرض سرفاصله زمانی ۵ دقیقه در خطوط باری، مشاهده می‌شود فقط ضخامت ۵۵ سانتیمتر و مقاومت فشاری ۵۵ مگاپاسکال عمری حدود ۱۱۵ سال برای روسازی دال‌خط ایجاد می‌کنند و در بقیه موارد عمر روسازی حداکثر ۱۰ سال و یا خیلی کمتر از ۱۰ سال می‌باشد. البته باید توجه داشت که معمولاً سرفاصله زمانی اعزام قطارها در خطوط باری راه‌آهن بیش از ۵ دقیقه است. بر همین اساس و به منظور رسیدن



شکل ۱۳. تاثیر سختی بستر و ضخامت دال‌خط بر طول عمر روسازی دال‌خط در حالت مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ۵۵ مگا پاسکال، بار محوری ۱۴ تن و سرفاصله زمانی اعزام ۵ دقیقه



شکل ۱۴. تاثیر سختی بستر و ضخامت دال‌خط بر طول عمر روسازی دال‌خط در حالت مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ۵۵ مگا پاسکال، بار محوری ۳۲ تن و سرفاصله زمانی اعزام ۵ دقیقه

تأثیر سختی بستر و ضخامت دال‌خط بر طول عمر روسازی دال‌خط در حالت مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ۵۵ مگا پاسکال و سرفاصله زمانی اعزام ۵ دقیقه برای بار محوری ۱۴ تن و ۳۲ تن به ترتیب در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. همانگونه که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشهود است، افزایش سختی بستر دال‌خط منجر به افزایش طول عمر روسازی دال‌خط می‌گردد. مقایسه نتایج شکل‌های ۱۰ تا ۱۱ با نتایج شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نشان دهنده تأثیر بسیار زیادتر تغییرات ضخامت نسبت به تغییرات سختی بستر بر تغییرات عمر روسازی می‌باشد. همانگونه که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، برای یک خط مترو (بار محوری ۱۴ تن و سرفاصله زمانی اعزام ۵ دقیقه)، ضخامت ۲۵ سانتیمتر برای روسازی دال‌خط و تحت بستر با هر شرایط (سختی کم، متوسط و یا زیاد) عمر بیش از ۷۰ سال روسازی دال‌خط تضمین شده می‌باشد. با مقایسه شکل‌های ۱۳ و ۱۴ با یکدیگر می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش بار محوری از مقدار ۱۴ تن به ۳۲ تن، عمر روسازی دال‌خط به شدت کاهش پیدا می‌کند. در خطی که بار محوری ۳۲ تن و سرفاصله زمانی اعزام قطارها ۵ دقیقه می‌باشد، ضخامت دال بتنی باید ۵۵ سانتیمتر باشد تا عمر روسازی دال‌خط به بیش از ۱۰ سال برسد.

۵- نتیجه گیری

استفاده از روسازی دال‌خط راه‌آهن به دلیل هزینه‌های تعمیر و نگهداری پایین در مقایسه با روسازی بالاستی راه‌آهن روز به روز در حال گسترش می‌باشد. یکی از معیارهای مهم و اساسی در طراحی این دسته از روسازی‌ها، خستگی دال بتنی می‌باشد. روش‌های آیین‌نامه‌ای موجود به منظور طراحی روسازی دال‌خط، صرفاً برای طراحی دال خط‌های قرار گرفته بر روی بستر سخت کاربرد دارند. مروری بر ادبیات موضوع نشان می‌دهد که پیش‌بینی طول عمر روسازی دال‌خط راه‌آهن براساس معیار خستگی در تمامی شرایط سختی بستر منوط به استفاده مدل‌های عددی پیچیده و در نتیجه صرف هزینه محاسباتی بالا می‌باشد. بر همین اساس، نیاز به توسعه روشی ساده و کم هزینه جهت طراحی روسازی دال‌خط راه‌آهن براساس معیار خستگی به شدت احساس می‌شود. در پاسخگویی به این نیاز مهم، این تحقیق انجام شده است. در این تحقیق، با کمک مدل نظری

تیر دوگانه قرار گرفته بر روی بستر ارتجاعی، روسازی دال خط راه‌آهن ناشی از یک بار چرخ محور تحلیل شده و تاریخچه زمانی تنش تجربه شده توسط دال بتنی محاسبه می‌شود. در ادامه با شمارش تعداد سیکل‌های تنش تجربه شده توسط دال بتنی و با توجه به مدل تخریب بتن ناشی از کشش، طول عمر دال بتنی روسازی دال‌خط تقریب زده می‌شود. نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش سرفاصله زمانی اعزام قطارها، طول عمر روسازی دال‌خط افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در بار محوری ۱۴ تن، با افزایش ۲۸۷ درصدی سرفاصله زمانی اعزام قطارها، طول عمر روسازی دال‌خط دچار افزایش ۲۸۷ درصدی می‌گردد. این امر بدین معناست که سرفاصله زمانی اعزام قطارها بر طول عمر روسازی، دارای تأثیری خطی می‌باشد. همچنین نتایج نشان داد که با کاهش بارمحوری قطار، عمر روسازی دال‌خط افزایش

می‌یابد به عنوان مثال با کاهش بار محوری از ۲۰ تن به ۱۴ تن، عمر روسازی دال‌خط شاهد افزایشی ۲۷۰۰ درصدی (از ۰/۰۲ سال به ۵۴ سال) می‌باشد. به بیانی دیگر، افزایش میزان بار محوری، تأثیر بسیار زیادی در کاهش طول عمر روسازی دال‌خط در مقایسه با سرفاصله زمانی اعزام قطار دارد. همچنین، تأثیری که افزایش بار محوری و سرفاصله زمانی اعزام قطارها بر طول عمر روسازی دارند، برای تمامی حالات مختلف مقاومت فشاری بتن، ضخامت دال‌خط و سختی بستر یکسان و ثابت می‌باشد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن یکی از پارامترهای بسیار تأثیرگذار بر افزایش طول عمر روسازی دال‌خط می‌باشد. به عنوان مثال، با لحاظ کردن بار محوری ۲۰ تن و سرفاصله زمانی ۳۶۰ دقیقه، طول عمر روسازی دال‌خط برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ۲۵، ۴۰ و ۵۵ مگاپاسکال به ترتیب برابر با ۰/۰۰۴، ۰/۹۴ و ۲۱/۲ سال می‌باشد. به بیانی دیگر افزایش ۳۷/۵ درصدی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن منجر به افزایش ۲۱۰۰ درصدی طول عمر روسازی می‌شود. یکی از پارامترهای بسیار موثر در کنترل عمر روسازی دال‌خط، ضخامت آن می‌باشد. به بیانی دیگر، با افزایش ضخامت دال بتنی عمر دال بتنی روسازی دال‌خط به شدت افزایش پیدا می‌کند و این پدیده برای تمامی حالات مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن صادق می‌باشد. به عنوان مثال با بار محوری ۱۴ تن و در مقاومت فشاری ۴۰

- خواجه دزفولی، ا.، ساکی پور، ش. (۱۳۹۶)، "پیش بینی عمر روسازی دال خط راه آهن با کمک مدل تخریب فرسایش PCA" چهارمین کنفرانس ملی دستاوردهای اخیر در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، تهران، ایران.

-AREMA, (2006), American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, "Concrete Slab Track".

-Cornelissen, H. A. W., (1984), "Fatigue Failure of Concrete in Tension". Heron. Delft, The Netherlands.

-EN., (1992), "Design of concrete structures".

-Esmaeili, M., Mohammadzadeh, S. and Mehrali, M., (2016), "Dynamic Response of the Coupled Vehicle-Floating Slab Track System using Finite Element Method". Int. J. Transp. Eng. 4: pp.9-26.

-Esveld, C., (2003), "Recent development in slab track". European Railway Review, 2: 81-85.

-Esveld, C. and Markine, V., (2003), "Use of expanded polystyrene (EPS) sub-base in railway track design". In: IABSE Symposium, Antwerp, Belgium.

-Fryba, L., (1972), "Vibration of solids and structures under moving loads". Springer. Netherlands.

-Hetenyi, M., (1964), "Beams on Elastic Foundation". The University of Michigan Press, Ann Arbor.

-Huang, Y. H., (2004), "Pavement analysis and design". Pearson Prentice Hall, Pearson Education Inc. USA, New Jersey.

-International Union of Railways, UIC, 2010. "High Speed around the World Maps". UIC Lecture. Paris. France.

-Poveda, E., Rena C., Lancha, C. and Ruiz, G., (2008), "Finite element analysis on the fatigue damage under compression of a concrete slab track". VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures FraMCoS-8.

مگاپاسکال، با افزایش ضخامت دال بتنی از ۲۵ سانتیمتر به ۴۰ سانتیمتر، طول عمر روسازی دال خط از ۸۰ سال به بیش از ۵۰۰۰ سال افزایش پیدا می کند. نتایج بدست آمده نشان می دهد که در خطوط مترو با بار محوری ۱۴ تن و سرفاصله زمانی اعزام قطارها به مدت ۵ دقیقه، در صورت استفاده از بتنی با مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیش از ۴۰ مگا پاسکال در روسازی دال خط، عمر بیش از ۱۰۰ سال روسازی دال خط طراحی شده محتمل خواهد بود. همچنین در یک خط باری با بار محوری ۳۲ تن و سرفاصله زمانی ۶ ساعت، اگر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ۵۵ مگاپاسکال و ضخامت دال بتنی ۴۰ سانتیمتر باشد، عمر روسازی دال خط به بیش از ۸۰ سال می رسد. این افزایش عمر روسازی دال خط در سایر حالات ضخامت دال بتنی و مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن نیز مشهود می باشد. هر چند که افزایش سختی بستر دال خط منجر به افزایش طول عمر روسازی دال خط می گردد، اما این تاثیر در مقایسه با تاثیر ضخامت روسازی کمتر می باشد. برای یک خط مترو با بار محوری ۱۴ تن و سرفاصله زمانی اعزام ۵ دقیقه، ضخامت ۲۵ سانتیمتر برای روسازی دال خط و تحت بستری با هر شرایط سختی (سختی کم، متوسط و یا زیاد) عمر بیش از ۷۰ سال روسازی دال خط محتمل خواهد بود. البته در روسازی دال خطی که بار محوری ۳۲ تن و سرفاصله زمانی اعزام قطارها ۵ دقیقه می باشند، ضخامت دال بتنی باید ۵۵ سانتیمتر باشد تا عمر روسازی دال خط به بیش از ۱۰ سال برسد.

۶- سپاسگزاری

بدینوسیله از حمایت مالی دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه SCU.EC98.31051 در انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می گردد.

۷- مراجع

- خواجه دزفولی، ا. (۱۳۹۷)، "تعیین حداقل ضخامت روسازی دال خط راه آهن به کمک روش AASHTO" پژوهشنامه حمل و نقل، پژوهشکده حمل و نقل، دوره ۱۵، شماره ۱.

- Xavier, N., Abraham G., and Varkey, M. 2016. "Fatigue Evaluation of Track Slabs Reinforced with Steel and CFRP Bars using Finite Element Analysis". *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 9: pp.16241-16248.
- Yen, Sh. and Lee, Y., (2007), "Parameter Identification and Analysis of a Slab Track System Using 3D ABAQUS Program". *Journal of Transport. Eng. ASCE*. 133: pp.288-297.
- Zakeri, J.A., Esmaili, M. and Fathali, M., (2011), "Evaluation of humped slab track performance in desert railways". *P. I. Mech. Eng. F. J. Rai*. 225: pp.566- 573.
- Zakeri, J.A. and Sadeghi, J., (2007), "Field investigation on load distribution and deflections of railway track sleepers". *J. Mech. Sci. Technol*. 21: pp.1948- 1956.
- Zhu, Sh. and Cai Ch., (2011), "Fatigue life prediction of CRTS I ballastless slab track". *Third International Conference on Transportation Engineering. ICTE. ASCE*.
- Poveda, E., Rena C., Lancha, C. and Ruiz, G., (2015), "A numerical study on the fatigue life design of concrete slabs for railway tracks". *Eng. Struct*. 100: pp.455-467.
- Sadeghi, J., Khajehdezfuly, A., Esmaili, M. and Poorveis, D. (2016), "Dynamic Interaction of Vehicle and Discontinuous Slab Track Considering Nonlinear Hertz Contact Model". *J. Transp. Eng*. 142: pp.1-11.
- Sadeghi, J., Liravi, H. and Esmaili, M.H. (2017), "Experimental investigation on loading pattern of railway concrete slabs". *Constr. Build. Mater*. 153: pp.481-495.
- Sadeghi, J. and Barati, P., (2010), "Evaluation of conventional methods in Analysis and Design of Railway Track System". *Int. J. Civ. Eng*. 8: pp.44-56.
- Sadeghi, J. and Barati, P., (2010), "Improvements of conventional methods in railway track analysis and design". *Can. J. Civ. Eng*. 37: pp.675- 683.
- Shiau, Y., Huang, Ch., Wang, M. and Lu, L., (2008), "New Model of Cement Product – Precast Slab Track for THSR (Taiwan High Speed Rail)". *25th International Symposium on Automation and Robotics in Construction. ISARC*, pp.129-140.