تعیین حداقل ضخامت روسازی دال‌خط راه آهن به کمک روش AASHTO

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

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

دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۲۵ – پذیرش: ۱۳۹۷/۰۱/۲۰

صفحه۶۹-۸۵

چکیده

استفاده از روسازی دال‌خط در خطوط راه آهن درون شهری و برون شهری به صورت روز افزون در حال گسترش می باشد. با اینحال تا کنون در آیین نامه های مختلف راه آهن در جهان، روند مشخصی به منظور طراحی و تعیین ضخامت روسازی دال‌خط ارائه نشده است. در این پژوهش با ایجاد تغییراتی در روش آیین نامه ای آشتو که برای تعیین ضخامت دال بتنی روسازی های بتنی راه و فرودگاه کاربرد دارد، روندی به منظور تعیین ضخامت دال‌خط راه آهن ارائه گردیده است. نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش سختی بستر روسازی دال‌خط، حداقل ضخامت مورد نیاز روسازی دال‌خط کاهش پیدا می کند. افزایش ۲۴ برابری سختی بستر، منجر به کاهش ۱۰ درصدی ضخامت روسازی دال‌خط می شود. همچنین افزایش ترافیک عبوری از روی دال‌خط منجر به افزایش حداقل ضخامت مورد نیاز روسازی می گردد. افزایش دو و چهار برابری ترافیک عبوری به ترتیب منجر به افزایش ۱۲ و ۲۵ درصدی حداقل ضخامت مورد نیاز روسازی گردید. همچنین نتایج بدست آمده نشان داد که با فرض ثابت بودن تمامی پارامترها و تنها با افزایش بار محوری قطار، حداقل ضخامت مورد نیاز روسازی دال‌خط افزایش می یابد.

واژه‌های کلیدی: روسازی دال‌خط راه آهن، طراحی، خستگی، ضخامت دال بتنی، روش آشتو

۱- مقدمه

با توجه به بررسی های انجام شده، حمل و نقل ریلی در مقایسه با سایر گزینه های حمل و نقل نظیر حمل و نقل جاده ای و هوایی دارای مزایای فراوانی مانند صرفه های اقتصادی، آلودگی کمتر زیست محیطی و ایمنی بالاتر می-باشد (UIC, 2010). براساس آمار و اطلاعات ذکر شده در مراجع مختلف، بیش از ۸۰ درصد خطوط راه آهن موجود در جهان خطوط بالاستی می باشد. پایین بودن هزینه اجرای این خطوط در مقایسه با سایر گزینه ها یکی از مهمترین دلایل استفاده انبوه از خطوط بالاستی در جهان بوده است (Indraratna et al., 2006). با توجه به کاربرد وسیع روسازی بالاستی در خطوط راه آهن جهان، تحقیقات متعددی در زمینه چگونگی تحلیل و طراحی خطوط بالاستی صورت گرفته است (میرمحمدصادقی، ۱۳۸۷). امروزه در بحث ساخت خطوط راه آهن جدید، روسازی دال‌خط راه آهن در مقایسه با روسازی معمول بالاستی راه آهن به دلیل هزینه تعمیر و نگهداری به مراتب پایین‌تر و پایداری بهتر سازه خط، از محوبیت بالایی برخوردار است (Shiau et al., 2008). به دلیل جوان بودن تکنولوژی طراحی و ساخت روسازی های دال‌خط، تحقیقات بسیار معدودی به ارائه

روند تحلیل و طراحی این روسازی اشاره کرده اند (خواجه دزفولی، ۱۳۹٤). به بیانی دیگر تا کنون روشی مدون به منظور تحلیل و طراحی روسازی دال‌خط راه آهن ارائه نشده است. تنها آیین نامه ای که در زمینه طراحی خطوط دال‌خط راه آهن، نکاتی خلاصه را اشاره کرده است، آیین نامه راه آهن آمریکا (AREMA) می باشد. در آیین نامه AREMA توصیه شده است که روند طراحی روسازی دال‌خط راه آهن باید مشابه روند طراحی روسازی‌های بتنی راه و فرودگاه باشد (AREMA, 2006). بر اساس همین توصیه، پژوهش های محدودی در زمینه طراحی روسازی دال‌خط راه آهن انجام شده و نتایج آن منتشر شده است. براساس تحقیقات انجام شده، EV_2 بستر دال بتنی در روسازی دال‌خط راه آهن باید از مقدار ۱۲۰ مگاپاسکال بیشتر باشد (Esveld, 2003). با توجه به سختی نسبتا زیاد بستر دال بتنی در روسازی دال‌خط، لنگر خمشی بسیار ناچیزی درون دال بتنی ایجاد می شود و در نتیجه تنش های کششی ناچیزی ناشی از بار قطار در دال بتنی ایجاد می‌شود (Esveld and Markine, 2003). در این وضعیت، دال بتنی نیاز به هیچگونه میلگرد خمشی تقویتی در بالا و پایین مقطع عرضی خود نداشته و صرفا نیاز است تا میلگردهای حرارتی در مرکز آن قرار گیرد (Esveld and Markine, 2003). به بیانی دیگر، ترک‌ها و خرابی های ایجاد شده در دال بتنی به دلیل تجاوز تنش های کششی ایجاد شده در دال بتنی از مقدار تنش مجاز کششی بتن نمی‌باشند. بر همین اساس می توان بیان داشت که معیار طراحی دال بتنی در روسازی دال‌خط راه آهن از نوع معیارهای بهره برداری و شامل معیارهایی نظیر خستگی و فرسایش بتن می‌باشد (Zhu and Cai, 2011). وضعیت دال بتنی روسازی دال‌خط راه‌آهن در این حالت کاملا مشابه با وضعیت دال بتنی در روسازی راه و فرودگاه می باشد. روش‌های آیین نامه ای AASHTO و PCA دو روش مهم در طراحی دال بتنی روسازی راه و فرودگاه بر اساس معیارهای بهره برداری (خستگی و فرسایش) می باشند (Huang, 2004). به منظور تعیین ضخامت دال بتنی در روسازی راه و فرودگاه از روش AASHTO بهره برده می شود، تا در طول دوران بهره برداری دال بتنی دچار خستگی و فرسایش نگردد (Huang, 2004).

علی‌رغم توصیه آیین‌نامه AREMA درخصوص طراحی روسازی دال‌خط راه آهن با کمک روش های طراحی روسازی بتنی راه و فرودگاه، تاکنون در هیچ تحقیقی از روش آیین نامه AASHTO به منظور تعیین ضخامت دال بتنی روسازی دال‌خط استفاده نشده است (AREMA, 2006). بر همین اساس در این مقاله، با کمک روش AASHTO ضخامت دال بتنی روسازی دال‌خط راه آهن با توجه به معیارهای خستگی و فرسایش تعیین می گردد. به این منظور در ابتدا بارگذاری روسازی راه آهن با بارگذاری روسازی راه معادل‌سازی می‌گردد. در ادامه با تعریف معیارهای مختلف طراحی برای روسازی دال‌خط راه آهن و براساس روش AASHTO، روند تعیین ضخامت دال بتنی روسازی دال‌خط راه آهن با کمک روش AASHTO پیموده می گردد.

۲- پیشینه تحقیق

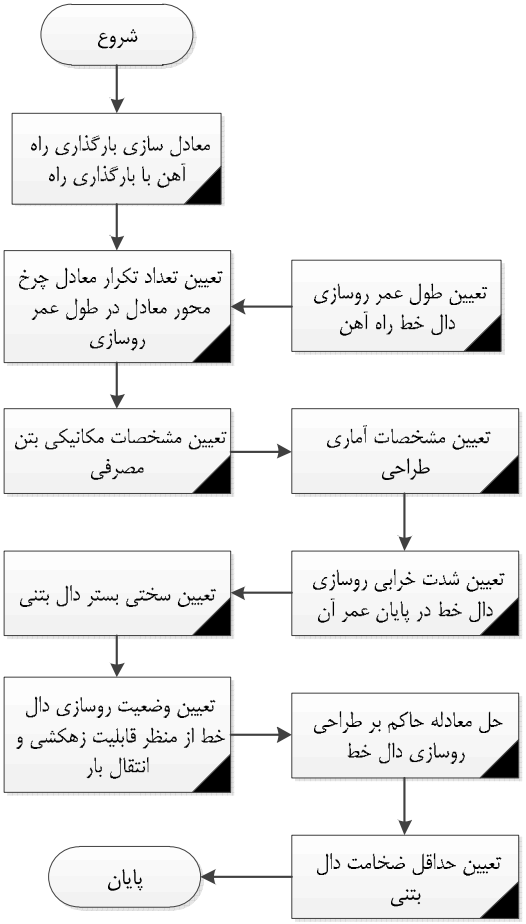
در روش آشتو با توجه به ترکیب معیارهای خستگی و فرسایش دال بتنی، ضخامت آن تعیین می‌شود. در این روش با توجه به پارامترهای مختلفی نظیر مدول الاستیسته بتن، مدول گسیختگی بتن، ضریب انتقال بار، ضریب زهکشی، کارایی دال بتنی، حجم ترافیک عبوری از روی دال بتنی و ... ضخامت دال بتنی تعیین می‌گردد. به منظور کنترل معیارهای بهره برداری دال بتنی در روش آشتو، از دو مدل تخریب ترک خوردگی ناشی از خستگی و مدل تخریب خردگی و فرسایش استفاده می‌شود (Huang, 2004). پارامتر خستگی دال بتنی ارتباطی غیر مستقیم با میزان نسبت تنش ایجاد شده در دال بتنی دارد.

از سویی دیگر، نسبت تنش ایجاد شده در دال بتنی با کمک تقسیم تنش خمشی موجود در دال بتنی به مدول گسیختگی بتن بدست می آید. خستگی ایجاد شده در دال بتنی، می تواند دو نوع ترک عرضی و طولی در سازه دال ایجاد کند. محل ایجاد این ترک‌ها در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. در شکل ۱، دو حالت بحرانی ایجاد ترک در دال بتنی ناشی از دو نوع حالت بارگذاری مختلف نشان داده شده است. در صورتی که دال‌خط دارای عرض کمی باشد و ریل به لبه کناری دال بتنی نزدیک باشد، با عبور قطار از روی دال‌خط، در کناره لبه دال بتنی ترک عرضی ایجاد می گردد (در شکل ۱ با درنظر گرفتن پارامتر X برابر صفر، بار چرخ قطار بر روی لبه دال‌خط قرار خواهد گرفت). به بیانی دیگر عامل ایجاد ترک عرضی در لبه دال بتنی، بارگذاری بر روی لبه کناری آن می باشد. از سویی دیگر، همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، در صورتی که قطار از روی درزهای عرضی موجود در دال‌خط عبور کند، ایجاد ترک طولی در سازه دال بتنی امری محتمل خواهد بود.

شکل۱. بارگذاری بر روی لبه کناری و درز عرضی دال بتنی روسازی دال‌خط راه آهن

علاوه بر پارامتر خستگی، معیارهای خردگی و فرسایش نیز در تعیین ضخامت دال بتنی به کمک روش آشتو درنظر گرفته می‌شوند (Huang, 2004). طبق گزارشات آشتو علت تخریب برخی از دال های بتنی روسازی صلب راه، خردگی و فرسایش آنها بوده است. میزان تغییرشکل ایجاد شده در دال بتنی در مقایسه با تنش ایجاد شده در آن، نقش بسیار مهم‌تری را در فرسایش و خردگی دال بتنی ایفا می‌کند. هنگامی که بار یک چرخ محور نزدیک به درز عرضی (واقع در انتها یا ابتدای دال بتنی روسازی دال‌خط) باشد، تغییر شکل بحرانی بیشتر در گوشه دال بتنی ایجاد می شود. در نتیجه رخ دادن پدیده خردگی و فرسایش دال بتنی در محل درزهای عرضی بسیار محتمل تر از رخ دادن آن در سایر نقاط می‌باشد. با توجه به آنچه که بیان شد، پیش نیاز استفاده از روش AASHTO در تعیین ضخامت دال بتنی در روسازی دال‌خط راه آهن، معادل سازی بارگذاری روسازی راه آهن با بارگذاری روسازی راه می‌باشد. در ادامه پارامترهای موثر در روش AASHTO به منظور تعیین ضخامت دال بتنی در روسازی دال‌خط تعیین می گردند. در نهایت با حل معادله حاکم بر وضعیت سلامت دال بتنی، ضخامت دال بتنی روسازی دال‌خط راه آهن بر اساس معیارهای خستگی و فرسایش تعیین می‌شود. در شکل ۲، الگوریتم طی شده در این مقاله به منظور تعیین ضخامت دال بتنی ارایه شده است. در بخش های بعدی،

مطابق با الگوریتم ارائه شده در شکل ۲ جزییات روند تعیین ضخامت دال بتنی در روسازی دال‌خط راه آهن به کمک روش AASHTO ارائه شده است.

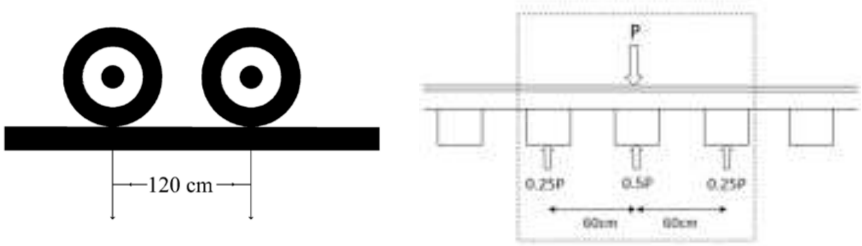


شکل ۲. الگوریتم تعیین ضخامت دال بتنی در روسازی دال‌خط راه آهن به کمک روش AASHTO

۲-۱- معادل سازی بارگذاری روسازی راه آهن با بارگذاری روسازی راه

روش آشتو به منظور تعیین ضخامت دال بتنی در روسازی‌های راه توسعه داده شده است (Huang, 2004). برهمین اساس، روش آشتو با توجه به بارگذاری وسیله نقلیه در راه به کار گرفته می شود. پیش نیاز استفاده از روش آشتو به منظور تعیین ضخامت دال بتنی در روسازی دال‌خط راه آهن، معادل‌سازی بارگذاری راه آهن با بارگذاری وسیله نقلیه در راه می باشد. در روند تعیین ضخامت دال بتنی روسازی های صلب راه و فرودگاه به روش آشتو، آنچه که در رابطه با ترافیک عبوری از روی روسازی راه مورد استفاده قرار می گیرد، تعداد چرخ های تک ۸/۲ تنی هم ارز عبوری از روی روسازی در طول دوره بهره برداری (دوره طراحی) می‌باشد (Huang, 2004). با توجه به تفاوت میان بارگذاری در روسازی صلب راه و روسازی دال‌خط راه آهن، باید بارگذاری روسازی دال‌خط راه آهن به نحوی با بارگذاری روسازی صلب راه معادل سازی شود. در صورتی که یک چرخ محور واگن بر روی یک پابند قرار گیرد، بار چرخ محور در روسازی دال‌خط راه آهن در

راستای طولی به طور تقریبی بین سه پد زیر ریل (پد زیر ریل میانی و دو پد زیر ریل مجاور) تقسیم می شود (Amsler and Hoognedoorn, 2010, Song et al., 2011). با فرض اینکه فاصله میان مرکز به مرکز پابندها (پد زیر ریل) در راستای طولی خط، حدود ۶۰ سانتیمتر باشد (میرمحمدصادقی، ۱۳۸۷)، در این صورت بار یک چرخ محور به صورت تقریبی در طولی معادل ۱۲۰ سانتیمتر به دال بتنی روسازی دال‌خط اعمال می گردد (شکل ۳-الف). از سویی دیگر، چرخ های مرکب دومحوره (Tandem) در روسازی های راه به صورت ۲ چرخ هستند که به فاصله تقریبی ۱۲۰ سانتیمتر (فاصله مرکز به مرکز چرخ ها، ۱۲۰ سانتیمتر می باشد) از یکدیگر واقع شده اند (شکل ۳-ب). با توجه به اصول حاکم بر تحلیل روسازی‌های صلب راه و به منظور تقریب مناسب پاسخ روسازی، بار چرخ محور مرکب دومحوره در طولی معادل ۱۲۰ سانتیتر بر روی دال بتنی توزیع می‌شود (Huang, 2004). بر همین اساس می توان نتیجه گرفت که بار یک چرخ محور قطار در روسازی دال‌خط راه آهن و بار یک چرخ محور مرکب دومحوره در روسازی راه، هر دو به طور تقریبی در طولی معادل ۱۲۰ سانتیمتر بر روی دال بتنی توزیع می شوند. در نتیجه می توان بیان داشت که یک چرخ محور قطار راه آهن با بار محوری P معادل با یک چرخ محور مرکب دو محوره با بار محوری P در وسیله نقلیه راه می باشد.



(الف) توزیع بار چرخ محور بین سه پابند **(ب) چرخ مرکب دو محوره (Tandem)**

شکل ۳. معادل سازی بار گذاری راه آهن با بارگذاری روسازی راه الف) توزیع بار چرخ محور بین سه پابند
ب) چرخ مرکب دومحوره

۲-۲- تعیین دوره طراحی (Age)

آنچه که در مورد این پارامتر باید در نظر گرفته شود این است که دوره طراحی نباید با عمر روسازی یکسان در نظر گرفته شود. به بیانی دیگر، دوره طراحی همان دوره تحلیل ترافیک می باشد. معمولا به منظور طراحی روسازی صلب راه یک دوره طراحی ۲۰ ساله مد نظر قرار می گیرد. با در نظر گرفتن اهمیت مسیر، حجم ترافیک و بار ترافیک عبوری می توان دوره طراحی را افزایش و یا کاهش داد. برای مسیرهای مهمی که حجم ترافیکی بالایی دارند، می توان دوره طراحی را تا ۶۰ سال افزایش داد.

۲-۳- تعیین تعداد تکرارهای چرخ محور معادل ($W_{8/2}$)

یکی از پارامترهای تاثیرگذار در تعیین ترافیک عبوری، توزیع بارمحوری می باشد. در طول دوران بهره برداری از یک روسازی دال‌خط، انواع مختلف قطارها اعم از باری و مسافری با تناژهای مختلف از روی آن عبور می کنند. همچنین هر قطار با توجه به نوع آن (مسافری، باری یا

ترکیبی)، از واگن هایی با بارهای محوری مختلف تشکیل شده است. به‌عنوان مثال، در یک قطار بارمحوری لکوموتیو، بار محوری واگن باری و بار محوری واگن مسافری متفاوت از یکدیگر می‌باشند. بر همین اساس می‌توان بیان داشت که یک روسازی در طول عمر خود، بارهای محوری متفاوتی را تجربه می کند. به چرخ محورهای دارای بار محوری یکسان، گروه بارگذاری گفته می شود. همچنین هر قطار با توجه به نوع خود دارای تعداد مختلفی چرخ محورهای واگن باری، واگن مسافری و لکوموتیو می باشد. به عنوان مثال اگر یک قطار شامل ۲ لکوموتیو (هر لکوموتیو دارای دو بوژی سه محوره با بار محوری ۲۰ تن)، شامل ٤ واگن باری (هر واگن باری شامل دو بوژی دو محوره با بار محوری ۲۵ تن) و شامل ۸ واگن مسافری (هر واگن مسافری شامل دو بوژی دو محوره با بار محوری ١٦ تن) می باشد. در این صورت می توان گفت که اگر این قطار یک بار از روی روسازی راه آهن عبور کند، چرخ محور دارای بار محوری ۲۰ تن (گروه بارگذاری اول) ٦ دفعه، چرخ محور با بار محوری ۲۵ تن (گروه بارگذاری دوم) ١٦ دفعه و چرخ محور دارای بار محوری ١٦ تن (گروه بارگذاری سوم) ۳۲ دفعه از روی روسازی عبور کرده اند. در نتیجه با عبور یک‌بار عبور قطار از روی روسازی، ۱۲۰ تن ناشی از گروه بارگذاری اول، ٤۰۰ تن ناشی از گروه بارگذاری دوم و ۵۱۲ تن ناشی از گروه بارگذاری سوم از روی روسازی عبور کرده اند. به عنوان یک نتیجه گیری کلی می توان بیان داشت که هر یک از گروه های بارگذاری (چرخ محورهای دارای بار محوری یکسان) سهم مشخصی از کل تناژ ناخالص عبوری از روی روسازی در پایان دوره بهره برداری (MGT_m) دارند.

با تعیین میزان تجمعی تناژ ناخالص عبوری از روی دال‌خط ناشی از گروه بارگذاری j پس از گذشت m سال از بهره برداری (MGT_{m_j}) می توان تعداد تکرارهای گروه بارگذاری j را در طول m سال تعیین کرد. با کمک رابطه ۱ می توان تعداد تکرارهای گروه بارگذاری j را در طول m سال محاسبه کرد.

$$\bar{n}_j = \frac{MGT_{m_j}}{w_j} \qquad (۱)$$

در رابطه ۱، MGT_{m_j} میزان تجمعی تناژ ناخالص عبوری از روی دال‌خط ناشی از گروه بارگذاری j پس از گذشت m سال از بهره برداری، $\bar{n}_j$ تعداد دفعات عبور گروه بارگذاری j از روی روسازی پس از گذشت m سال از بهره برداری و w_j بار محوری گروه بارگذاری j ام (بر حسب تن) می باشد. به منظور تعیین تعداد دفعات عبور گروه بارگذاری j ام از روی روسازی پس از گذشت m سال از بهره برداری ($\bar{n}_j$)، در ابتدا با توجه به مشخصات ناوگان هایی که در طول عمر روسازی قرار است از روی دال‌خط عبور کنند، تمام بارهای محوری مختلفی که در طول عمر روسازی از روی آن عبور می‌کنند، شناسایی می‌گردند. به عنوان مثال برای یک روسازی با دوره طراحی ۲۰ ساله، قرار است تمامی ناوگان هایی که از روی آن عبور می کنند، دارای بارهای محوری ١٤، ١٦، ۱۸ و ۲۰ تن باشند. در این مسئله می توان بیان داشت که چهار گروه بارگذاری وجود دارد. در ادامه با توجه به تعداد و مشخصات ناوگان های عبوری در هر سال، سهم هر یک از گروه های بارگذاری از کل تناژ عبوری از روی خط تعیین می شود. به عنوان نمونه از روی یک روسازی دال‌خط که دارای یک دوره طراحی ۲۰ ساله است، سالیانه ۱۰ MGT بار عبور می کند و مشخصات ناوگان های عبوری به گونه ای است که چهار گروه بارگذاری ١٤، ١٦، ۱۸ و ۲۰ تن وجود دارند.

جدول ۱. محاسبه پارامترهای مربوط به توزیع بار محوری در دوره طراحی

شماره گروه بارگذاری	بار محوری وارده (تن)	سهم گروه بارگذاری از کل بار ناخالص عبوری از خط در طول یک سال (MGT_{m_j})	تعداد تکرار پیش بینی شده عبور گروه بارگذاری در طول دوره طراحی ۲۰ ساله$(\bar{n}_j)$
۱	۱٤	٤	$\bar{n}_1 = \frac{20 \times 4 \times 10^6}{14} = 5/71 \times 10^6$
۲	۱٦	۲	$\bar{n}_2 = \frac{20 \times 2 \times 10^6}{16} = 2/5 \times 10^6$
۳	۱۸	۳	$\bar{n}_3 = \frac{20 \times 3 \times 10^6}{18} = 3/34 \times 10^6$
٤	۲۰	۱	$\bar{n}_4 = \frac{20 \times 1 \times 10^6}{20} = 1 \times 10^6$
مجموع		۱۰	$12/55 \times 10^6$

جدول ۲. ضرایب هم ارز بار (دال بتنی با ضخامت ۲۲/۸٦ سانتیمتر و نشانه خدمت نهایی ۲/۵)

ضریب هم ارز بار	بار محوری (kN)		ضریب هم ارز	بار محوری (kN)
۷/۷۳	۲۱۳/۵		۰/۰۰۰۱	۸/۹
۹/۰۷	۲۲۲/٤		۰/۰۰۰۵	۱۷/۸
۱۰/٦	۲۳۱/۳		۰/۰۰۲	۲٦/۷
۱۲/۳	۲٤۰/۲		۰/۰۰۵	۳۵/٦
۱٤/۲	۲٤۹/۱		۰/۰۱۳	٤٤/۵
۱٦/۳	۲۵۸		۰/۰۲٦	۵۳/٤
۱۸/۷	۲٦٦/۹		۰/۰٤۸	٦۲/۳
۲۱/٤	۲۷۵/۸		۰/۰۸۲	۷۱/۲
۲٤/٤	۲۸٤/۷		۰/۱۳۳	۸۰
۲۷/٦	۲۹۳/٦		۰/۲۰٦	۸۹
۳۱/۳	۳۰۲/۵		۰/۳۰۸	۹۷/۹
۳۵/۳	۳۱۱/٤		۰/٤٤٤	۱۰٦/۸
۳۹/۸	۳۲۰/۳		۰/٦۲۲	۱۱۵/۷
٤٤/۷	۳۲۹/۲		۰/۸۵۰	۱۲٤/٦
۵۰/۱	۳۳۸/۱		۱/۱٤	۱۳۳/۵
۵٦/۱	۳٤۷		۱/٤۹	۱٤۲/۳
٦۲/۵	۳۵۵/۹		۱/۹۲	۱۵۱/۲
٦۹/٦	۳٦٤/۸		۲/٤۳	۱٦۰/۱
۷۷/۳	۳۷۳/۷		۳/۰۳	۱٦۹
۸٦	۳۸۲/۵		۳/۷٤	۱۷۸
۹۵	۳۹۱/٤		٤/۵۵	۱۸٦/۸
۱۰۵	٤۰۰/٤		۵/٤۸	۱۹۵/۷
			٦/۵۳	۲۰٤/٦

با توجه به تعداد و مشخصات ناوگان ها، سهم هر یک از گروه های بارگذاری به ترتیب ٤، ۲، ۳ و ۱ MGT از ۱۰ MGT کل می باشد. در ادامه با توجه به طول دوره طراحی، سهم هر یک از گروه های بارگذاری در یک سال از کل تناژ عبوری و بار محوری گروه بارگذاری مربوطه، تعداد تکرار های گروه بارگذاری مربوطه محاسبه می شود. مثال ارائه شده در این بخش به صورت کامل در جدول ۱ ارائه شده است. در ستون اول جدول ۱، شماره گروه های بارگذاری آورده شده است. میزان بار محوری هر گروه بارگذاری در ستون دوم جدول ۱ مشخص شده است. سهم هر یک از گروه های بارگذاری از مقدار ۱۰ MGT کل سالیانه در ستون سوم جدول ۱ مشخص شده است. در ستون چهارم جدول ۱، تعداد تکرار پیش بینی شده برای هر گروه بارگذاری در طول دوره طراحی محاسبه شده است. نسبت خرابی ایجاد شده در روسازی با توان چهارم نسبت افزایش بار محوری ارتباط دارد. این بدین معناست که اگر بار محوری دو برابر افزایش یابد، نسبت خرابی ایجاد شده در دال بتنی ١٦ برابر می شود (Huang, 2004). بر همین اساس نیاز است تا تعداد تکرارهای پیش بینی شده در مرحله قبل ($\bar{n}_j$)، با تعداد تکرار چرخ محور هم ارز ۸/۲ تنی معادل سازی شوند. بدین منظور ضریبی تحت عنوان ضریب هم ارز بار در تعداد تکرارهای پیش بینی شده هر گروه بارگذاری بدست آمده در مرحله پیشین ($\bar{n}_j$)، ضرب می شود تا این معادل سازی صورت گیرد (طباطبایی، ١٣٩٤). مقدار ضریب هم ارز بار، با توجه به مقدار بارمحوری عددی متفاوت خواهد بود. در روسازی های بتنی راه، ضریب هم ارز بار در آیین نامه آشتو، با توجه به ضخامت دال بتنی، نشانه خدمت دهی نهایی روسازی، نوع چرخ محور و .... تعیین می شود (Huang, 2004). با توجه به اینکه یک چرخ محور راه آهن تاثیری مشابه با یک چرخ محور مرکب دومحوره وسیله نقلیه راه دارد، بنابراین در این بخش از ضرایب هم ارز چرخ محورهای مرکب دو محوره وسیله نقلیه راه استفاده می شود. نحوه تعیین ضریب هم ارز بار برای چرخ محورهای مرکب دومحوره وسیله نقلیه راه از حوصله مباحث این مقاله خارج می باشد (Huang, 2004). در جدول ۲، ضرایب هم ارز بار برای دال بتنی با ضخامت ۲۲/۸٦ سانتیمتر و نشانه خدمت نهایی ۲/۵ ارائه شده است. به منظور سادگی محاسبات می توان برای تمامی حالات (ضخامت های مختلف دال بتنی و نشانه خدمت نهایی مختلف) از ضرایب هم ارز ارائه شده در جدول ۲ بهره برد. اگرچه این امر می تواند منجر به ایجاد اندکی خطا در نتایج بدست آمده گردد، اما با توجه به ساده شدن روند محاسبات، این خطا قابل اغماض می باشد. با توجه به جدول ۲، برای گروه بارگذاری j ام با توجه به میزان بار محوری (w_j)، ضریب هم ارز بار گروه بارگذاری j ام (α_j) استخراج می شود. در ادامه به کمک رابطه ۲، تعداد دفعات عبور اصلاح شده گروه بارگذاری j ام (n_j) تعیین می شود.

$$n_j = \bar{n}_j \times \alpha_j \qquad (۲)$$

در رابطه ۲، $\bar{n}_j$ تعداد دفعات عبور گروه بارگذاری j از روی روسازی در پایان دوره بهره برداری، α_j ضریب هم ارز بار گروه بارگذاری j ام و n_j تعداد دفعات عبور اصلاح شده گروه بارگذاری j ام از روی روسازی در پایان دوره بهره برداری می باشد. در نهایت به کمک رابطه ۳، تعداد دفعات عبور چرخ محورهای معادل ۸/۲ تنی هم ارز در پایان دوره بهره برداری تعیین می‌شود.

$$w_{8/2} = \sum_{j=1}^{ngl} n_j \qquad (۳)$$

در رابطه ۳، ngl تعداد کل گروه‌های بارگذاری، n_j تعداد دفعات عبور اصلاح شده گروه بارگذاری j ام از روی روسازی در پایان دوره بهره‌برداری و $w_{8/2}$ تعداد دفعات عبور چرخ محورهای معادل ۸/۲ تنی هم ارز در پایان دوره بهره برداری می باشند.

۲-٤- تعیین مشخصات مکانیکی بتن

مدول الاستیسیته بتن (E_c) و مدول گسیختگی بتن (S_c) دو پارامتری می‌باشند که در تعیین مشخصات مکانیکی در روش AASHTO نقش ایفا می کنند. براساس ASTM C469، مدول الاستیسیته بتن (E_c) با کمک رابطه ٤ تعیین می شود (Huang, 2004).

$$E_c = 4700\sqrt[2]{f'_c} \qquad (٤)$$

در رابطه ٤، E_c , f'_c مقاومت فشاری بتن بر اساس واحد Mpa می باشد. همچنین مدول گسیختگی بتن (S_c) مورد استفاده در طراحی دال بتنی، با استفاده از انجام آزمایش خمش ۳ نقطه ای بر روی تیری بتنی (دارای بتن به مقاومت ۲۸ روزه) تعیین می‌شود. مقاومت خمشی محاسبه شده در این آزمایش، همان مقاومت استفاده شده در طراحی می باشد. البته به عنوان ضریب اطمینان توصیه می شود که حدود ۱۵ درصد مدول گسیختگی محاسبه شده کاهش یابد (Huang, 2004).

۲-۵- تعیین مشخصات آماری طراحی

دو پارامتر انحراف معیار استاندارد کلی (S_a) و قابلیت اطمینان طراحی (R)، متغییرهایی هستند که براساس داده‌ها و تحقیقات آماری تعیین شده و در تعیین ضخامت دال بتنی بر اساس روش AASHTO کاربرد دارند. انحراف معیار استاندارد کلی (S_a)، پارامتری وابسته به تغییرات ترافیک عبوری و ترافیک نرمال عبوری از روی دال‌خط در طول عمر روسازی دارد. در روش AASHTO مقدار ۰/۳ تا ۰/٤ را به عنوان انحراف معیار استاندارد کلی پیشنهاد شده است (Huang, 2004). پارامتر قابلیت اطمینان طراحی (R)، بیانگر ضریب اطمینان درنظر گرفته شده در روند طراحی می باشد. هر چه مقدار آن بیشتر درنظر گرفته شود، طراحی صورت گرفته با اطمینان بیشتری انجام می گیرد. مقدار ۵۰٪ تا ۹۹/۹٪ را بر حسب اینکه در دال‌خط در چه منطقه ای قرار گرفته است، درنظر گرفته می شود (Huang, 2004). در طراحی روسازی دال‌خط بهتر است که مقدار ضریب اطمینان طراحی حداقل مقدار 90 درصد درنظر گرفته شود.

۲-٦- تعیین شدت خرابی روسازی دال‌خط در پایان دوره طراحی

در روش AASHTO، شاخص قابلیت کارایی برای حالت اولیه روسازی دال‌خط (قبل از شروع دوره بهره برداری) (P_i) مقدار ٤/۵ را درنظر گرفته می‌شود. همچنین مقدار ۲/۵ به عنوان شاخص قابلیت کارایی نهایی (پایان دوره طراحی) (P_t) در نظر گرفته شده است. هرچه که مقدار P_t عدد کوچکتری درنظر گرفته شود، وضعیت دال‌خط پس از طی شدن طول دوره بهره برداری، وضعیت بدتری می باشد. براین اساس می توان مقدار P_t را عدد ۲ نیز فرض کرد. مقدار قابلیت کارایی از دست رفته روسازی دال‌خط به کمک رابطه ۵ تعیین می شود (Huang, 2004).

$$\Delta PSI = P_i - P_t \qquad (۵)$$

در رابطه ۵، P_i شاخص قابلیت کارایی برای حالت اولیه روسازی دال‌خط، P_t شاخص قابلیت کارایی دال‌خط در پایان عمر آن و ΔPSI کارایی از دست رفته روسازی دال‌خط می‌باشد.

۲-۷- تعیین سختی بستر دال بتنی

در روش AASHTO از مدول عکس العمل بستر دال بتنی (k)، به منظور درنظر گرفتن تاثیر سختی بستری که دال بتنی بر روی آن قرار داده شده است، استفاده می شود. از آنجا که با توجه به شرایط آب و هوایی در طول سال ممکن است مقاومت بستر دستخوش تغییراتی شود، بنابراین بهتر است که در تعیین مدول عکس العمل بستر دال‌خط بدترین حالت در نظر گرفته شود. در زمانی که در زیر دال بتنی، مستقیما یک فندانسیون بتنی (بستر بتنی) وجود دارد، تعیین مدول عکس العمل بستر دال‌خط کار پیچیده ای نخواهد بود و کاملا به مشخصات بستر بتنی ارتباط دارد (Sadeghi and Esmaeili, 2017). همچنین در این حالت، مقدار سختی فندانسیون بتنی ارتباط چندانی به شرایط محیطی نداشته و در طول دوره بهره برداری مقداری ثابت می باشد. اما در صورتی که فندانسیون بتنی وجود نداشته باشد، و دال بتنی مستقیما بر روی بستر خاکی و یا یک لایه اساس قرار داده شود، شرایطی متفاوت از وجود یک فندانسیون بتنی در زیر دال بتنی حاکم می باشد. در این حالت، مدول عکس العمل دال بتنی با توجه به شرایط محیطی در طول فصل دستخوش تغییر می گردد (Huang, 2004). در تمامی حالات، مدول عکس العمل بستر با توجه به جنس، میزان تراکم آن و ... قابل تخمین خواهد بود.

۲-۸- تعیین وضعیت روسازی دال‌خط از منظر قابلیت زهکشی و انتقال بار

قابلیت روسازی دال‌خط در دفع آب توسط ضریب زهکشی (C_d) تعیین می شود. هرچه که قابلیت روسازی دال‌خط در دفع آب بیشتر باشد، ضریب زهکشی روسازی عدد بزرگتری درنظر گرفته می شود (Huang, 2004). البته باید توجه داشت که دال بتنی در روسازی دال‌خط قابلیت زهکشی نداشته و در این بخش منظور از قابلیت زهکشی، قابلیت زهکشی مجموعه روسازی دال‌خط می باشد که می تواند شامل لایه های اساس و زیر اساس باشد. ضریب زهکشی روسازی دال‌خط مشابه با ضریب زهکشی در روسازی بتنی راه تعیین می شود (Huang, 2004).

در روسازی دال‌خط، ضریب انتقال بار (J) قابلیت روسازی را در انتقال بار از طریق درزهای عرضی و ترک‌ها نشان می دهد. هرچه که قابلیت دال بتنی در انتقال بار بیشتر باشد، ضریب انتقال بار مقدار کمتری می باشد (Huang, 2004). در روسازی دال‌خط راه آهن به دلیل اینکه ریل عامل انتقال بار قطار بین دو دال بتنی مجاور می باشد، بنابراین وضعیت دال‌خط از منظر انتقال بار وضعیت مناسبی می باشد. همچنین در صورتی که در اطراف روسازی دال‌خط، شانه بتنی احداث گردد (دال بتنی روسازی دال‌خط از نظر جانبی و قائم به شانه بتنی متصل باشد)، قابلیت انتقال بار افزایش و درنتیجه ضریب انتقال بار کاهش می‌یابد. در برخی موارد در تونل ها به دلیل وجود فضای محدود در اطراف دال بتنی و پر کردن فضای اطراف دال بتنی با ملات بتنی، باید فرض شود که اطراف دال بتنی، شانه بتنی احداث شده است. معمولا در فضای آزاد، در اطراف دال بتنی شانه بتنی قرار ندارد. براساس بررسی های انجام شده، در صورتی که در اطراف دال بتنی، شانه بتنی احداث شده باشد، ضریب انتقال بار مقدار ۲/۵ و در صورتی که روسازی دال‌خط بدون شانه بتنی اجرا شده باشد، ضریب انتقال بار مقدار ۳ درنظر گرفته می‌شود (Huang, 2004).

۲-۹- حل معادله حاکم بر طراحی روسازی دال خط

در روش AASHTO، معادله ای ارائه شده است که میان ضخامت دال بتنی و تمامی پارامترهایی که در بخش های پیشین معرفی گردیده اند، رابطه ای برقرار کرده است (رابطه ٦) (Huang, 2004). در رابطه ٦، $w_{8/2}$ تعداد تکرارهای پیش بینی شده چرخ محور معادل، R

قابلیت اطمینان طراحی، S_a انحراف معیار استاندارد کلی، D ضخامت روسازی بر حسب اینچ، ΔPSI میزان کاهش قابلیت کارایی دال‌خط در پایان دوره طراحی، p_t نشانه خدمت نهایی دال‌خط، S_c مدول گسیختگی بتن بر حسب پوند بر اینچ مربع، C_d ضریب زهکشی روسازی دال‌خط، J ضریب انتقال بار، E_c مدول الاستیسیته بتن بر حسب پوند بر اینچ مربع و k مدول عکس العمل بستر دال بتنی بر حسب پوند بر اینچ مکعب می‌باشد.

$$\log w_{8/2} = RS_a + 7/35\log(D+1) - 0/06 + \frac{\log[\Delta PSI/(4/5-1/5)]}{1+1/624\times10^7/(D+1)^{8/46}} + (4/22 - 0/32p_t)\log\left\{\frac{S_cC_d(D^{0/75}-1/132))}{215/63J[D^{0/75}-18/42/(E_c/k)^{0/25}]}\right\} \quad (٦)$$

جدول۳. سناریوهای مختلف درنظر گرفته شده برای بهره‌برداری از خطوط باری و مسافری

نوع خط	متغییر	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳
باری	بار ناخالص عبوری (MGT)	۵	۱۰	۲۰
مسافری	سرفاصله زمانی (دقیقه)	۲۵	۱۵	۵

تمامی پارامترهای مورد استفاده در رابطه ٦ بجز مقدار ضخامت دال بتنی (D)، پارامترهایی معین بوده و در بخش‌های پیشین محاسبه شده اند. تنها پارامتر مجهول در رابطه ٦، مقدار ضخامت دال بتنی (D) می باشد. به منظور تعیین مقدار D باید رابطه ٦ حل گردد. همانگونه که در رابطه ٦ مشاهده می شود، مقدار ضخامت دال بتنی (D) با سایر پارامترها رابطه ای غیرخطی دارد. بنابراین به منظور حل رابطه ٦ و تعیین مقدار ضخامت دال بتنی (D)، از روندی سعی و خطا استفاده می شود (Huang, 2004).

۳- ارایه نتایج و بحث

در این بخش به منظور بررسی کارایی روش توسعه داده شده برای تعیین ضخامت دال بتنی روسازی دال‌خط راه آهن، حداقل ضخامت روسازی دال‌خط برای دو خط راه‌آهن مسافری و باری تعیین می شود. همچنین برای هر یک از خطوط مسافری و باری، سناریوهای مختلف بهره برداری (میزان ترافیک عبوری از خط) درنظر گرفته شده است. در جدول شماره ۳، سناریوهای مختلف بهره برداری برای هر دو خط مسافری و باری ارائه شده اند.

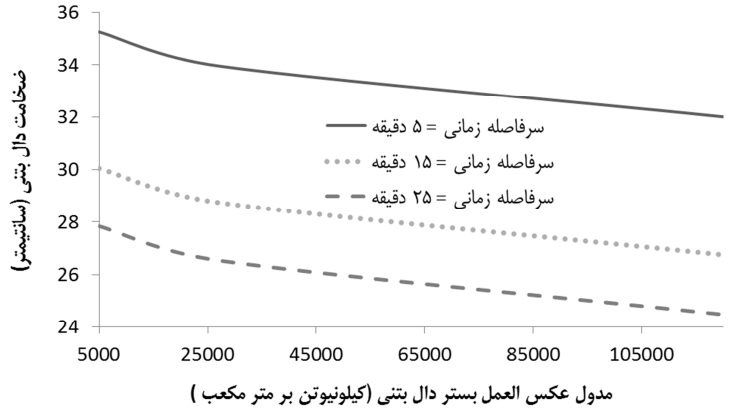
در خط باری، میزان بار ناخالص عبوری از خط متغییر درنظر گرفته شده است (رضایی و بویه نیا، ۱۳۸۳) و در خط مسافری، سرفاصله زمانی اعزام قطارها متغییر می‌باشد. همچنین فرض شده است که خط ریلی دارای کاربری باری، در در فضای آزاد قرار گرفته و هیچ گونه شانه بتنی در اطراف آن قرار ندارد. بر همین اساس، ضریب انتقال بار برای خط دارای بهره برداری باری مقدار ۳ درنظر گرفته می شود. قطار باری عبوری از روی خط در این حالت، شامل واگن های باری ٤ محوره دارای بار محوری ۲۰ تن و لکوموتیو ٦ محوره دارای بار محوری ۲۰ تن می‌باشد. برای خط ریلی که دارای کاربری مسافری است، دو وضعیت قرارگیری درون تونل دو قلو و قرار گیری درون تونل تک درنظر گرفته شده است. زمانی که خط ریلی درون تونل دو قلو قرار می‌گیرد، اطراف روسازی دال‌خط دارای شانه بتنی می باشد و در این وضعیت ضریب انتقال بار عدد ۲/۵ درنظر گرفته می شود. زمانی که دال‌خط در تونل تک قرار داشته باشد، فرض می شود که در اطراف دال‌خط شانه بتنی قرار ندارد و در این حالت مقدر ضریب انتقال بار برابر ۳ درنظر گرفته می‌شود. قطار مسافری شامل ۷ واگن مسافری ٤ محوره دارای بار محوری ١٤ تن می باشد

(این مشخصات معادل مشخصات قطار متروی تهران می باشد) (خواجه دزفولی، ۱۳۹٤).

در تمامی سناریوهای بهره برداری درنظر گرفته شده برای هر دو خط مسافری و باری، سه مقدار ۵۰۰۰ کیلونیوتن بر متر مکعب (متوسط)، ۲۷۰۰۰ کیلونیوتن برمترمکعب (زیاد) و ۱۲۰۰۰۰۰ کیلونیوتن برمترمکعب (خیلی زیاد) به عنوان مدول عکس العمل برای بستر دال بتنی درنظر گرفته شده است. با توجه به مقادیر درنظر گرفته شده، ۹ وضعیت مختلف برای خط باری و ۱۸ حالت مختلف برای خط مسافری ایجاد می شود. با درنظر گرفتن دوره طراحی ۳۰ ساله، حداقل ضخامت روسازی دال‌خط با کمک روش AASHTO برای تمامی حالات موجود تعیین شده است. همچنین به منظور استفاده از روش AASHTO، درصد قابلیت اطمینان طراحی ۹۵ درصد، انحراف معیار استاندارد کلی ۰/۳، میزان کاهش قابلیت کارایی دال خط در پایان دوره طراحی ۲، مدول گسیختگی بتن ٤ مگاپاسکال، ضریب زهکشی روسازی دال خط ۱ و مدول الاستیسیته بتن ۲۷ گیگا پاسکال درنظر گرفته می شوند (Zhu and Cai, 2011, Huang, 2004, Song et al., 2011). با توجه به مشخصات قطارهای باری و مسافری و با کمک روند تعریف شده در بخش ۲-۳ این مقاله، تعداد تکرارهای چرخ محور معادل 8/2 تنی هم ارز معادل ($W_{8/2}$) در طول دوره طراحی ۳۰ ساله و برای تمامی حالات بهره برداری، در جدول ٤ محاسبه شده است. همانگونه که در جدول ٤ نشان داده شده است، در خط باری کمترین مقدار $W_{8/2}$، $30/5 \times 10^6$ می‌باشد که مربوط به بار ناخالص عبوری برابر با 5 MGT می باشد. همچنین بیشترین مقدار $W_{8/2}$ در سناریوی سوم (بار ناخالص عبوری 20 MGT) به میزان 122×10^6 تعیین شده است. $W_{8/2}$ در خط مسافری از مقدار $16/7 \times 10^6$ (سرفاصله زمانی ۲۵ دقیقه) شروع شده و به مقدار 86×10^6 در سناریوی سوم (سرفاصله زمانی ۵ دقیقه) می‌رسد. اختلاف زیاد میان $W_{8/2}$ تعیین شده برای خطوط مسافری و باری در سناریوهای یکسان، به دلیل این است که بار محوری چرخ ها در قطار باری ۲۰ تن و بار محوری چرخ‌ها در قطار مسافری ١٤ تن می‌باشد. با توجه به جدول ۲ که ضرایب هم ارز بار در آن ارایه شده اند، ضریب هم ارز بار محوری ۲۰ تن عدد ٦/٥ و ضریب هم ارز بار محوری ١٤ تن عدد ١/٤ می‌باشد. همین امر منجر به بیشتر شدن مقدار $W_{8/2}$ خط باری نسبت به خط مسافری شده است.

جدول ٤. تعداد تکرارهای چرخ محور معادل ۸/۲ تنی هم ارز معادل ($W_{8/2}$) در طول دوره طراحی ۳۰ ساله

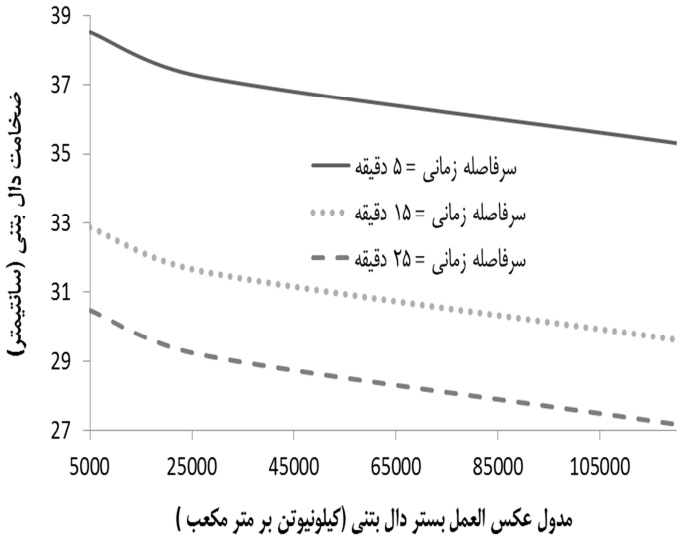
نوع خط	سناریوی ۱	سناریوی ۲	سناریوی ۳
باری	$30/5 \times 10^6$	61×10^6	122×10^6
مسافری	$16/7 \times 10^6$	$28/3 \times 10^6$	86×10^6



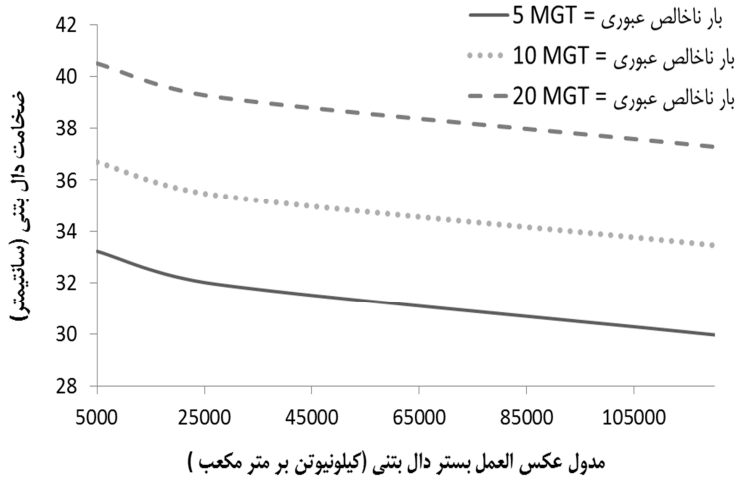
شکل ٤. حداقل ضخامت روسازی خط مسافری دارای شانه بتنی

در شکل ٤، حداقل ضخامت مورد نیاز روسازی دال-خط برای خط مسافری دارای شانه بتنی به ازای شرایط بهره برداری مختلف و سختی بستر دال بتنی مختلف نشان داده شده است. همانگونه که در شکل ٤ مشاهده می شود، با افزایش سختی بستر دال بتنی، ضخامت مورد نیاز کاهش می یابد. همچنین با افزایش سرفاصله زمانی اعزام قطارها، مقدار ضخامت دال بتنی کاهش پیدا می‌کند. در حالت سرفاصله زمانی ۵ دقیقه، بیشترین ضخامت دال بتنی برای مدول عکس العمل بستر ۵۰۰۰ کیلونیوتن بر متر مکعب برابر ۳۵/۳ سانتیمتر و برای مدول عکس عکس العمل بستر ۱۲۰۰۰۰ کیلونیوتن بر متر مکعب برابر ۳۲ سانتمیتر می باشد. به بیانی دیگر در سرفاصله زمانی ۵ دقیقه، با ٢٤ برابر شدن مدول عکس عکس العمل بستر دال بتنی، حداقل ضخامت مورد نیاز دال بتنی حدود ۹ درصد کاهش پیدا می کند. این امر در حالیست که در سرفاصله زمانی ۲۵ دقیقه، با افزایش ٢٤ برابری مدول عکس عکس العمل بستر دال بتنی، مقدار حداقل ضخامت دال بتنی به میزان ۱۲ درصد کاهش می یابد.

در صورتی که مدول عکس عکس العمل بستر دال بتنی ثابت درنظر گرفته شود، با افزایش سرفاصله زمانی اعزام قطار از ۵ دقیقه به ۱۵ دقیقه (کاهش ۳ برابری ترافیک عبوری)، حداقل ضخامت مورد نیاز برای دال بتنی حدود ۱۷ درصد کاهش پیدا می کند. همچنین در صورتی که سرفاصله زمانی اعزام قطار از ۵ دقیقه به ۲۵ دقیقه تغییر کند، (کاهش ۵ برابری ترافیک عبوری)، حداقل ضخامت مورد نیاز برای دال بتنی با کاهشی در حدود ۳۰ درصد مواجه می‌شود.



شکل ۵. حداقل ضخامت روسازی خط مسافری بدون شانه بتنی



شکل ٦. حداقل ضخامت روسازی خط باری

در شکل ۵، حداقل ضخامت دال بتنی برای روسازی دال‌خط مسافری بدون شانه بتنی و برای حالات مختلف سختی بستر دال بتنی و شرایط مختلف بهره برداری (ترافیک عبوری) ارائه شده است. روند موجود در نتایج ارائه شده در شکل ۵ کاملا مشابه با روند مشاهده شده در نتایج شکل ٤ می‌باشد. البته نکته متمایز کننده این دو شکل، افزایش تقریبی ۳ سانتیمتری برای دال بتنی در تمامی حالات بدون شانه بتنی نسبت به زمانی است که شانه بتنی در اطراف روسازی وجود دارد. به بیانی دیگر، در زمانی که شانه بتنی در کنار روسازی قرار داشته باشد،

حرکات دال بتنی محدودتر شده و نتیجتا تنش های کششی ایجاد شده درون دال بتنی کمتر می شود و پدیده خستگی دیرتر اتفاق می افتد. به همین دلیل در زمانی که روسازی دال‌خط بدون شانه بتنی می باشد، مقدار ضخامت دال بتنی در مقایسه با حالت دارای شانه بتنی، اندکی افزایش می یابد (حدود ۳ سانتیمتر). در شکل ٦، حداقل ضخامت مورد نیاز برای دال بتنی در خط باری برای حالات مختلف مدول عکس العمل بستر و شرایط بهره برداری مختلف (ترافیک عبوری مختلف) ارائه شده است. روند موجود در نتایج بدست آمده برای خط باری، کاملا مشابه با روند مشاهده شده در نتایج خط مسافری (شکل‌های ٤ و ٥) می‌باشد. در خط باری، کمترین ضخامت مورد نیاز دال بتنی از ۳۰ سانتیمتر آغاز شده و به حدود ٤١ سانتیمتر می رسد. نکته قابل توجه در نتایج بدست آمده از خط باری این است که حداقل ضخامت مورد نیاز دال بتنی در خط باری به طور میانگین حدود ٥ سانتیمتر از خط مسافری بیشتر می باشد.

٤- نتیجه گیری

با توجه به قدمت استفاده از خطوط بالاستی راه آهن در نقاط مختلف جهان، روند مدونی به منظور تحلیل و طراحی روسازی بالاستی راه آهن در آیین نامه های راه آهن ارائه شده است. هر چند که امروزه استفاده از روسازی دال‌خط در خطوط ریلی جهان رو به گسترش است، اما تاکنون روش مدونی در خصوص طراحی روسازی دال‌خط در دسترس نمی باشد. این امر به دلیل جوان بودن تکنولوژی طراحی و ساخت روسازی دال‌خط در مقایسه با روسازی معمول راه آهن (روسازی بالاستی) و همچنین انحصاری بودن این موضوع می باشد. مهمترین عضو از روسازی دال‌خط راه آهن که آن را نسبت به روسازی بالاستی راه آهن متمایز می کند، دال بتنی می باشد. بر همین اساس تعیین ضخامت دال بتنی گامی مهم در طراحی روسازی دال‌خط راه آهن می باشد. با توجه به شرایط توصیه شده در آیین نامه های راه آهن در ارتباط با روسازی دال‌خط، طراحی دال بتنی روسازی دال‌خط راه آهن روندی مشابه با طراحی دال بتنی در روسازی های بتنی راه می باشد. به بیانی دیگر، معیار طراحی دال بتنی در روسازی دال‌خط معیارهای بهره برداری نظیر خستگی و فرسایش می باشد. یکی از روش هایی که ضخامت دال بتنی راه را براساس معیارهای خستگی و فرسایش تعیین می کند، روش AASHTO می باشد. در این مقاله با ایجاد اصلاحاتی در روش AASHTO، از این روش برای تعیین ضخامت دال بتنی در روسازی دال خط راه آهن استفاده شده است. به این منظور در ابتدا بارگذاری روسازی راه آهن با بارگذاری روسازی راه معادل سازی شده و سپس سایر پارامترهای طراحی به روش AASHTO تعیین می گردند. در نهایت با توجه به پارامترهای تعیین شده، حداقل ضخامت مورد نیاز دال بتنی برای یک طول عمر مشخص تعیین می شود. با درنظر گرفتن یک دوره طراحی ۳۰ ساله، حداقل ضخامت دال بتنی مورد نیاز برای روسازی دال‌خط، برای دو حالت کلی خط باری و خط مسافری تعیین گردید. به منظور تعیین ترافیک عبوری از روی روسازی دال خط، سه سناریوی مختلف کم، متوسط و زیاد برای آنها درنظر گرفته شد. همچنین به منظور بررسی تاثیر سختی بستر روسازی بر ضخامت دال بتنی، سه مقدار سختی متوسط، زیاد و خیلی زیاد به عنوان سختی بستر دال‌خط درنظر گرفته شد. بعلاوه فرض گردید که در خط مسافری، روسازی دال‌خط دارای شانه بتنی و بدون شانه بتنی می باشد. نتایج بدست آمده نشان داد که با افزایش سختی بستر دال بتنی، حداقل ضخامت مورد نیاز دال بتنی کاهش پیدا می کند. برای خطوط باری و مسافری و در تمامی حالات ترافیکی، با افزایش ٢٤ برابری سختی بستر روسازی، حداقل ضخامت روسازی دال‌خط حدود ۱۰

درصد کاهش پیدا می کند. همچنین با قرارگیری شانه بتنی در کنار روسازی دال‌خط، حداقل ضخامت مورد نیاز روسازی دال‌خط حدود ۵ سانتیمتر کاهش پیدا می کند که این امر به دلیل محدود شدن حرکت دال بتنی در حضور شانه بتنی و کاهش پتانسیل خستگی دال بتنی می‌باشد. همچنین با افزایش میزان ترافیک عبوری از روی دال بتنی، حداقل ضخامت مورد نیاز دال بتنی افزایش پیدا می کند. بر همین اساس و با دو برابر شدن میزان ترافیک عبوری از روی روسازی دال‌خط، حداقل ضخامت مورد نیاز روسازی در حدود ۱۲ درصد افزایش پیدا می کند. همچنین با افزایش ٤ برابری ترافیک عبوری از روی روسازی دال‌خط، حداقل ضخامت مورد نیاز دال بتنی حدود ۲۵ درصد افزایش می یابد. در خطوط باری با عبور سالیانه 20 MGT از روی روسازی دال‌خط، حداقل ضخامت مورد نیاز دال بتنی حدود ٤۰ سانتمیتر می باشد و در خطوط مسافری با درنظر گرفتن سرفاصله زمانی اعزام قطارها به مدت ۵ دقیقه، حداقل ضخامت مورد نیاز دال بتنی در حدود ۳۸ سانتیمتر می‌باشد. براساس ادبیات موضوع، افزایش بار محوری اعمالی به دال بتنی منجر به ایجاد خرابی بیشتر در دال بتنی می‌شود. در این مقاله، بار محوری قطار باری ۲۰ تن و بار محوری قطار مسافری ١٤ تن درنظر گرفته شده است. در صورتی که تعداد کل محورهای معادل هم ارز خط باری و خط مسافری یکسان درنظر گرفته شود، در سختی های بستر یکسان، حداقل ضخامت مورد نیاز دال بتنی در خط باری عدد بزرگتری می‌باشد. این امر به دلیل آن است که بار محوری ۲۰ تن خرابی بیشتری نسبت به بار محوری ١٤ تن ایجاد می‌نماید.

۵- مراجع

- خواجه دزفولی، الف. (١٣٩٤)، "بررسی تاثیر پارامترهای سازه ای خط و ناوگان بر افزایش بار دینامیکی در روسازی دال خط راه آهن" رساله دکتری، ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران.

- رضایی ف.، بویه نیا، م. (١٣٨٣)، "امکان سنجی افزایش ظرفیت حمل بار در محور بافق سیرجان"، هفتمین همایش حمل و نقل ریلی، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

- طباطبایی، الف.، م. (١٣٩٤)، "روسازی راه"، چاپ بیست و ششم، ایران، نشر دانشگاهی.

- میرمحمدصادقی، س. ج.، (١٣٨٧)، "اصول و مبانی تحلیل و طراحی خطوط بالاستی راه آهن" چاپ اول، ایران، انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران.

- Amsler, Y. and Hoogendoorn, C. (2010), "Urban Rail Transport- Final consolidated report, European Community under the Sixth Framework Program Priority, Sixth Sustainable development, global change & ecosystems.

- AREMA, American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (2006), "Manual for Railway Engineering- Concrete Slab Track ", Vol. 2, Ch. 8.

- Esveld C. (2003), "Recent development in slab track" European Railway Review, No. 2, pp. 81–85.

- Esveld C. and Markine V. (2003), "Use of expanded polystyrene (EPS) sub-base in railway track design" In: IABSE Symposium, Antwerp, Belgium, pp. 14-15.

- 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, Vilnius, Lithuania, pp. 129–140.

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

- Zhu Sh. and Cai Ch. (2011), "Fatigue life prediction of CRTS I ballast-less slab track" Third International Conference on Transportation Engineering, ASCE.

- Indraratna B., Khabbaz H., Salim W., and Christie D. (2006), "Geotechnical Properties of Ballast and the Role of Geosynthetics" Journal of Ground Improvement, No. 3, pp. 91-102.

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

- Sadeghi J. and Esmaeili M. H. (2017), "Safe distance of cultural and historical buildings from subway lines" Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 96, pp. 89–103.

- Song H. P., Bian X. Ch., Chen Y. and Jiang J. (2011), "An analytical approach for slab track vibration with train-track-ground coupling effect" Proceedings of the 8th international conference on structural dynamics, Belgium, Leuven.