

بررسی تجربی و تحلیلی کنترل ترک طولی در تراورس بتنی پیش تنیده

فریدون رضایی*، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

سیامک رزاقی، کارشناس ارشد، دانشکده فنی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

محمدرضا شیری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

E-mail: frezaie@basu.ac.ir

دریافت: ۱۳۸۸/۱۲/۰۴ - پذیرش: ۱۳۸۹/۰۶/۳۰

چکیده

در شبکه راه آهن ایران، تراورس بتنی پیش تنیده به علت مقاومت بیشتر و سایر مزایای آن در برابر انواع دیگر تراورس ها بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. یکی از عیوب مشاهده شده در این نوع تراورس ها، ایجاد ترک طولی قبل و در هنگام بهره برداری است که معمولاً در رویه تراورس از محل رولپلاکها شروع و به سمت ناحیه وسط و کناره تراورس امتداد می یابد. این ترکها می تواند به علت فشار اضافی درون رولپلاکهای تراورس، ناشی از یخ زدگی آب درون رولپلاک، وجود ذرات ریز سنگدانه در هنگام بستن پیچ رولپلاک، اعوجاج و استاندارد نبودن پیچ و یا رولپلاک و یا عواملی از این قبیل به وجود آید. در این مقاله، تأثیرات عوامل مذکور توسط فشار سیلندری در محل سوراخ رولپلاکها تقریب و مدلسازی شدند. مطالعات عددی با کمینه تغییرات در هندسه تراورس بتنی پیش تنیده منوبلوک B70 و با مدل سازی سوراخ محل رولپلاکها و آرماتورهای پیش تنیدگی انجام پذیرفت و رابطه مابین فشار اضافی ناخواسته داخل رولپلاکها و بتن مورد بررسی قرار گرفت. با اعمال فشار سیلندری در محل رولپلاکها و افزایش آن تا مرحله گسیختگی بتن، تأثیر این فشار در محل رولپلاکها به صورت تحلیلی و تجربی با انجام آزمایش تجربی کتراک بررسی شد.

نتایج نشان می دهند فشارهای ناخواسته درون رولپلاکها، باعث افزایش تنش کششی عرضی و وقوع ترک می شود. در مرحله بعد و با توجه به مسیر ترکها، با قرار دادن آرماتورهای تقویتی عرضی، تنش های کششی عرضی در تراورس تقویت نشده با تراورس تقویت شده مقایسه شد. نتایج نشان می دهند که استفاده از آرماتور معمولی عرضی می تواند راهکاری برای کنترل ترکها و کاهش تنش های کششی در اطراف سوراخ رولپلاکها باشد.

واژه های کلیدی: تراورس بتنی، مدل سازی، آزمایش تجربی، پیش تنیدگی، فشار سیلندری

۱. مقدمه

این نوع تراورس، یک عضو بتنی یکپارچه است که با استفاده از فناوری پیش تنیدگی به نوعی طراحی شده که تنش وارد بر بتن همیشه به صورت فشاری باقی بماند و این نوع تراورس دارای مقاومت بیشتر و وزن کمتر نسبت به تراورس بتنی غیر پیش تنیده باشد. در ایران غالباً از تراورس های نوع B70 که مشخصات هندسی آنها در شکل ۲ آورده شده است، استفاده می شود. وزن تقریبی تراورس های بتنی B70 در حدود ۳۵۰ کیلوگرم است که در آنها ۸ عدد آرماتور طولی با قطر ۷ میلی متر به منظور ایجاد نیروی پیش تنیدگی بکار می رود.

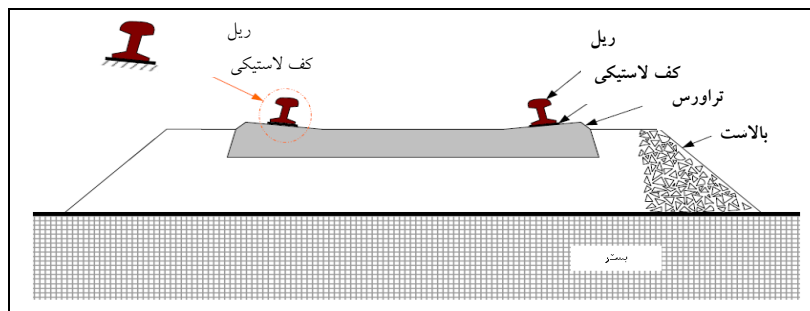
خطوط راه آهن شامل قسمت های مختلف از جمله ریل، تراورس، بالاست و سیستم های پایند است. تراورس ها جزئی از سیستم خطوط ریلی هستند که بین ریل و بالاست قرار می گیرند و نقش آنها حفظ هندسه خط، مقاومت در برابر بارهای قائم و جانبی و انتقال آنها به لایه بالاست است (شکل ۱). پیشرفتهای حاصله در مبحث بتن موجب استفاده از تراورس های بتنی شد که عموماً به دو گروه تراورس های بتن مسلح دوبلوکی (دی بلوک) و تک بلوکی (منوبلوک) تقسیم می شوند. تراورس بتنی پیش تنیده منوبلوک، پراستفاده ترین تراورس در صنعت راه آهن ایران است [رضایی و همکاران، ۱۳۸۳].

رضایی، رزاقی و شیری

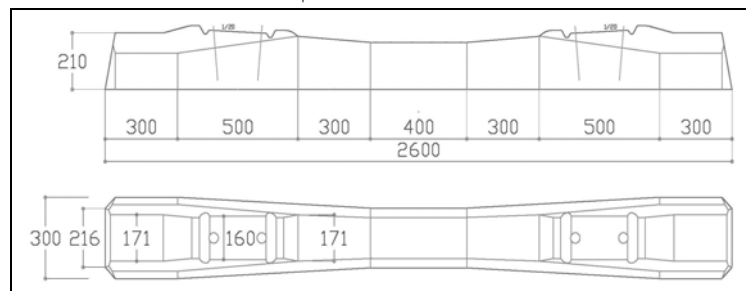
میلگردها بعد از اعمال پیش‌تنیدگی و در آوردن پیچهای ثابت و کششی پیش‌تنیدگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. [رضایی و همکاران، ۱۳۸۳].

چنان که برای تراورس بتنی B70 مشکلی در حین ساخت و یا بهره‌برداری پیش نیاید، بیش از ۵۰ سال عمر می‌کند، ولی گاهی، مواردی باعث معیوب شدن این نوع تراورس‌ها می‌شوند. برای مثال چنان که رولپلاکها در معرض مستقیم نور آفتاب قرار گرفته و به صورت نامناسب دپو شوند، ممکن است باعث تغییر مشخصات مکانیکی از جمله ترد شدن و اعوجاج رولپلاکها شود. یکی از عیوب مشاهده شده ترک طولی است که معمولاً در رویه تراورس مشاهده شده و از محل رولپلاکها شروع و به سمت ناحیه وسط و کناره تراورس امتداد می‌یابد (شکل ۳) [رضایی و کوثری، ۱۳۸۴].

مصالح اصلی در تراورس بتنی پیش‌تنیده بتن، میلگرد پیش‌تنیدگی، رولپلاک و پلاکهای کوچک و بزرگ است. بتن از مهم‌ترین مصالح تراورس به شمار می‌آید و معمولاً از مقاومت فشاری بالا حدود ۵۰ تا ۷۰ مگاپاسکال در آن استفاده می‌شود. از طرفی به علت تماس تراورس با محیطهای مهاجم مختلف، طراحی دوامی آن نیز از اهمیت بسزایی برخوردار است. میلگردهای مصرفی برای کاربردهای پیش‌تنیدگی در تولید تراورس B70 از نوع مفتول‌های ST160 است. مصرف رولپلاک در تراورسها به جهت بستن پیچهای ادوات اتصال ریل به تراورس و تهیه کوپلاژ ریل است. در هر طرف تراورس دو رولپلاک برای بستن ادوات اتصال ریل به تراورس (پابند) تعبیه می‌شود. پلاکها به جهت ثابت نگه‌داشتن



شکل ۱. اجزاء تشکیل دهنده سیستم خطوط راه‌آهن



شکل ۲. هندسه تراورس بتنی پیش‌تنیده منوبلوك نوع B70 مورد مصرف در خطوط ریلی ایران



شکل ۳. ایجاد ترکهای طولی در تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده B70 قبل و در هنگام بهره‌برداری

بررسی تجربی و تحلیلی کنترل ترک طولی در تراورس بتنی پیش تنیده

مربع انجام شد. LINK8 یک المان میله‌ای سه‌بعدی با ۲ گره و ۳ درجه آزادی انتقالی در جهات X,Y,Z است. این المان قادر به مدل‌سازی تغییرشکل‌های پلاستیک و پیش‌تندگی است. بر اساس اصول روش المان محدود، با توجه به لزوم انطباق گره‌های ابتدایی و انتهایی المان LINK8 با گره‌های المان SOLID65 و جهت سهولت این انطباق، حجم اولیه به چندین زیر حجم تبدیل شد تا در مرزهای این حجم‌ها بتوان المانهای LINK8 را قرارداد (شکل ۴) [Kaewunruen and Remennikov, 2006].

با توجه به یکنواخت نبودن مقطع تراورس در طول آن، از المانهای هرمی شکل استفاده شده است (شکل ۵). برای مشخص کردن تعداد المانهای مناسب مورد نیاز، نمودار شکل ۶ تهیه شد. در این نمودار ابتدا مدل با تعداد المانهای کمتر، مش‌بندی شده و بیشینه تنش کششی عرضی روی سطح تراورس در اطراف رولپلاک‌ها، ناشی از بار میلگردهای پیش‌تندگی محاسبه شد و سپس با افزایش تعداد المانها، تغییرات تنش کششی عرضی بررسی شد. مشخص شد که با افزایش تعداد المانها به بیش از ۲۶۰۰۰، تغییرات چندانی در پاسخ تنش کششی عرضی مشاهده نمی‌شود. بنابراین تعداد المانهای لازم برای رسیدن به یک جواب با دقت و سرعت مناسب حدود ۲۶۰۰۰ انتخاب شد.

برای آرماتورهای پیش‌تندگی، از مدل دوخطی الاستو-پلاستیک استفاده شد [Kaewunruen and Remennikov, 2007]. آرماتور پیش‌تندگی با تنش تسلیم معادل ۱۴۳۰ مگاپاسکال، مدول کشسانی اولیه ۲۱۰۰۰ مگاپاسکال و مدول کشسانی ناحیه پلاستیک برابر ۲۰۰۰ مگاپاسکال منظور شد. مقاومت فشاری مشخصه بتن f'_c برابر ۵۵ مگاپاسکال و مدول کشسانی آن از رابطه ۱ محاسبه شد [رضایی و دیگران، ۱۳۸۳]. برای منظور کردن رفتار تنش کرنش چندخطی بتن با مقاومت بالا از رابطه پوپویچ استفاده شد [Popovics, 1973].

$$E_c = 5000\sqrt{f'_c} \quad (1)$$

به منظور انجام روند تحلیل، در ابتدا نیروی پیش‌تندگی معادل ۴/۵ تن، در هر یک از مفتول‌های پیش‌تندگی به تراورس اعمال شد [رضایی و کوثری، ۱۳۸۴]. مطابق نتایج تحلیل و با بررسی صفحات تنش مشخص شد که با توجه به هندسه تراورس در

هدف از این مقاله بررسی اثر فشارهای ناخواسته از طرف سوراخ به بتن اطراف رولپلاک در ایجاد ترکهای طولی و نحوه تقویت عرضی تراورس‌هاست. این فشار می‌تواند ناشی از یخ‌زدگی آب درون رولپلاک، وجود ذرات ریز سنگدانه در هنگام بستن پیچ رولپلاک، اعوجاج و استاندارد نبودن پیچ یا رولپلاک و یا عواملی از این قبیل باشد. تأثیرات مذکور توسط فشار سیلندری در محل رولپلاکها تقریب و مدلسازی شده‌اند. در ادامه، با تعبیه آرماتورهای معمولی، کنترل ترکهای طولی به صورت تجربی با آزمایش کتراک و تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است.

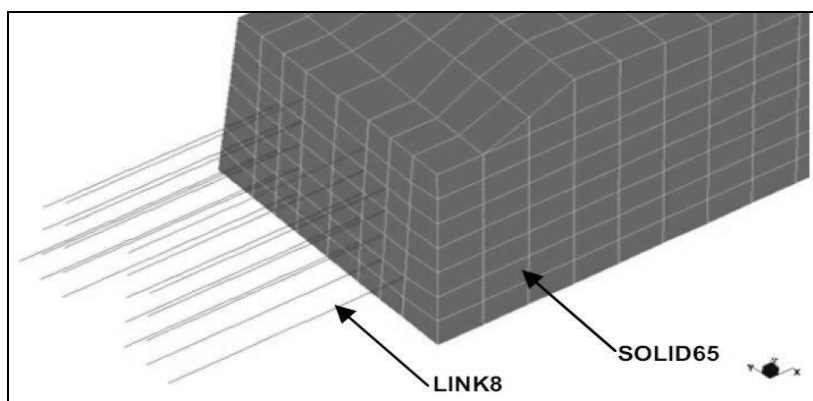
۲. مطالعات عددی تحت بارگذاری فشاری سیلندری محل رولپلاکها

به منظور تحلیل تراورس بتنی پیش‌تند B70 تحت بارگذاری فشاری سیلندری محل رولپلاکها، از روش المان محدود توسط نرم‌افزار ANSYS استفاده شد. معمولاً در مدل‌سازی تراورس از مدل ساده شده‌ای استفاده می‌شود و محل سوراخ رولپلاک‌ها که محل اتصال ریل و تراورس از طریق پیچ و رولپلاک است، مدلسازی نمی‌شود [Sadeghi and Babaei, 2006]. در این تحقیق محل سوراخ رولپلاکها نیز در مدل وارد گردید و با افزایش فشار سیلندری که بر جداره داخل سوراخها اعمال شده، تأثیر آن در محل رولپلاکها بررسی شده است.

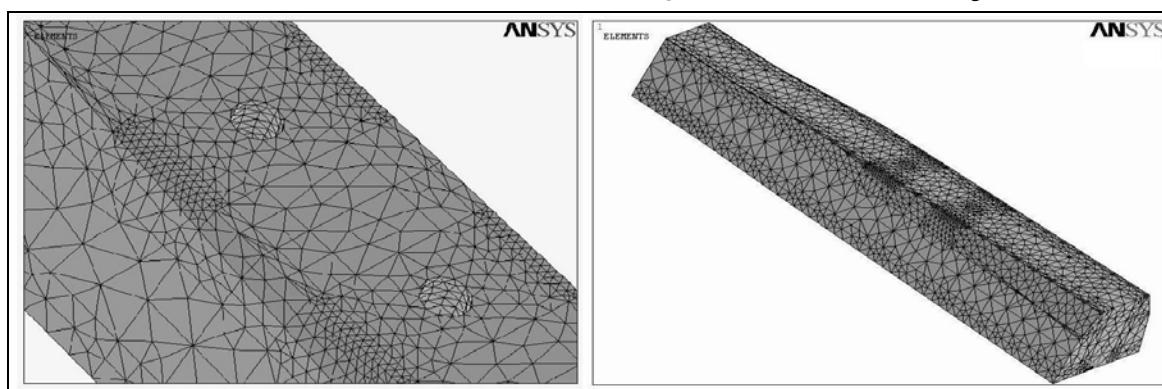
مدلسازی با در نظر گرفتن کمینه اختلاف با هندسه واقعی انجام شد. با در نظر گرفتن تقارن نسبت به صفحه عمود بر محور طولی تراورس و به منظور کاهش حجم حافظه مورد نیاز و نیز افزایش سرعت تحلیل، تنها نصف سازه را می‌توان با اعمال شرایط مرزی سازگار با صفحه تقارن مدلسازی کرد [Shokrieh and Rahmat, 2005]. برای مدلسازی بتن از المان SOLID65 و برای فولاد از المان LINK8 استفاده شد. المان SOLID65 یک المان مکعبی سه-بعدی با ۸ گره و ۳ درجه آزادی انتقالی در جهات X,Y,Z است. این المان قادر به مدل‌سازی رفتار غیرخطی، تغییرشکل‌های پلاستیک و ترک‌خوردگی بوده و همچنین قابلیت و توانایی آشکارسازی مسیرهای ترک‌خوردگی را داراست [Anthony and Wolanski, 2004]. مدل‌سازی آرماتورهای طولی با قرارداد المانهای LINK8 با مشخصات مکانیکی فولاد ST160 و سطح مقطع ۳۸/۵ میلی‌متر

می‌شود [Gonzalez-Nicieza, C. 2008]. همچنین چنان که آثار تحت بار پیش تنیدگی آرماتورها به $3/2$ مگاپاسکال می‌رسد که مقداری قابل توجه و در حدود 70% تنش ترک‌خوردگی و یا تنش کششی قابل تحمل در بتن است (شکل ۷). از طرفی تفاوت بین نیروی پیش‌تنیدگی آرماتورها، باعث افزایش تنش‌های کششی عرضی شده که خود می‌تواند به عنوان پارامتر تعیین‌کننده‌ای در ایجاد و یا ازدیاد ترکهای طولی محسوب شود.

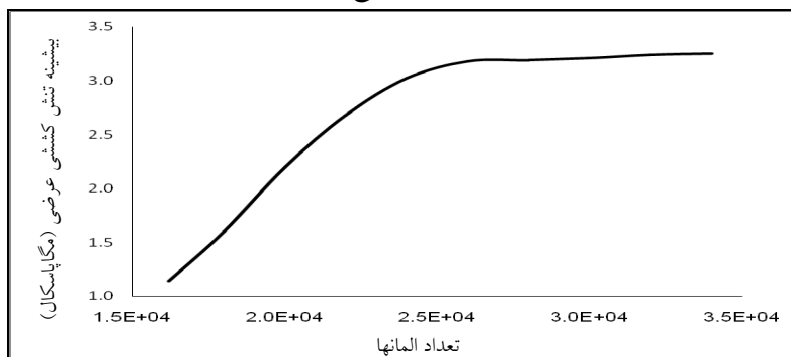
اطراف سوراخ رولپلاکها نیروی کششی عرضی ایجاد یخ‌زدگی آب درون رولپلاک، وجود ذرات ریز سنگدانه در هنگام ناشی از یخ‌زدگی آب درون رولپلاک، وجود ذرات ریز سنگدانه در هنگام بستن پیچ و یا اعوجاج و استاندارد نبودن پیچ و رولپلاک و دیگر عواملی از این قبیل، باعث افزایش این تنش کششی شود، ممکن است تنشهای القایی از حد توان و تحمل بتن در کشش بگذرد و ترک رخ دهد. مقدار تنش کششی اطراف سوراخها، تنها



شکل ۴. نحوه قرارگیری آرماتورهای طولی در مدل عددی [Kaewunruen and Remennikov, 2006]

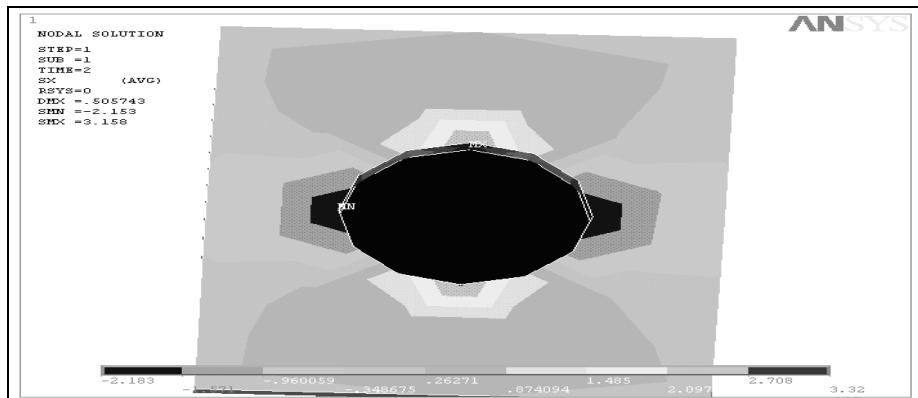


شکل ۵. مش‌بندی کلی و بزرگنمایی شده اطراف سوراخ‌های رولپلاک تراورس بتنی پیش‌تنیده B70

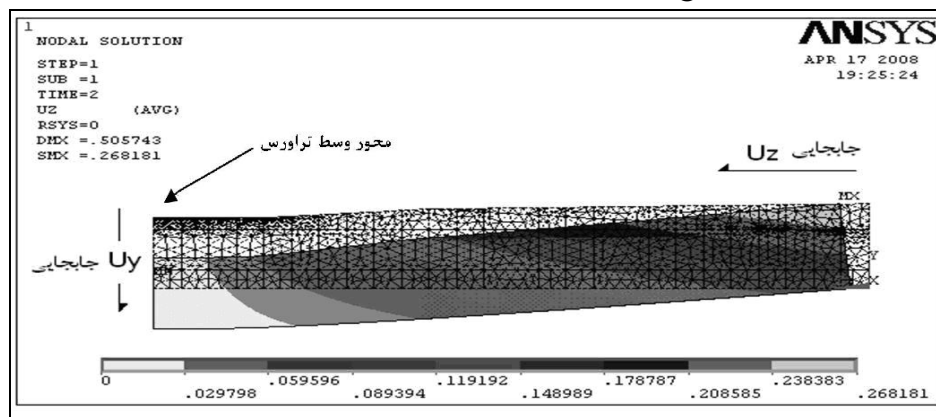


شکل ۶. نمودار افزایش تعداد المانها و تأثیر آن بر بیشینه تنش کششی عرضی در محل رولپلاکها

بررسی تجربی و تحلیلی کنترل ترک طولی در تراورس بتنی پیش تنیده



شکل ۷. تنش کششی در اطراف سوراخ رولپلاک در جهت عرضی تراورس تحت حداکثر نیروی پیش‌تندگی القایی به آرماورها



شکل ۸. تغییر شکل تراورس فقط بر اثر نیروی پیش‌تندگی

نمی‌کند و به این دلیل و به‌خاطر کاهش سیکل‌های بارگذاری-تحلیل، بارگذاری از این مقدار شروع گردیده و افزایش داده شده است. با افزایش فشار سیلندری، مقادیر بیشینه تنش‌های کششی وارد بر بتن تراورس که در امتداد خط واصل دو رولپلاک هر پابند ریل به وجود می‌آید، در هر بارگذاری ثبت شد (شکل ۹). در ابتدای بارگذاری و با گذشتن تنش کششی بتن از حد مقاومت کششی آن (۳/۷ مگاپاسکال)، بتن در امتداد خط واصل دو رولپلاک هر پابند ترک می‌خورد (شکل ۳). طول و بازشدگی این ترکها با افزایش نیرو بیشتر شده و با پیوستن آنها به همدیگر، ترکهای جدیدی شکل می‌گیرند. در ادامه، تجمع این ترکها در یک ناحیه باعث رخداد ترک وسیع طولی و شکست بتن می‌شود (محدوده نزولی شکل ۹). نتایج ترک‌خوردگی مدل تحت فشار سیلندری، منطبق بر ترکهای طولی ایجاد شده در تراورس‌های واقعی است که خود شهادتی بر انتخاب صحیح پارامتر مخرب و ترک دهنده تراورس است.

تغییر مکان‌های حاصله در تراورس بر اثر نیروی پیش‌تندگی با بزرگ‌نمایی در شکل ۸ نمایش داده شده است. کاهش بُعد عضو بتنی در راستای طولی تراورس U_z که باعث کاهش اثرات پیش‌تندگی نیز می‌شود، به ۰/۲۷ میلی‌متر می‌رسد. در این حالت حداکثر جابجایی ارتفاعی U_y به وجود آمده در وسط تراورس به ۰/۵۱ میلی‌متر می‌رسد. انحنای به وجود آمده تحت بار پیش‌تندگی در خلاف جهت انحنای ناشی از بارگذاری قطار است و مطابق با اصول طراحی اعضای پیش‌تندیده، نیروی پیش‌تندگی آرماورها به مقاومت خمشی قطعه کمک می‌کند.

به منظور مدل‌سازی اثر فشارهای ناخواسته از سوراخ رولپلاک‌ها به تراورس، بارگذاری سوراخ رولپلاکها به صورت فشار سیلندری از ۲۰ مگاپاسکال شروع و در هر مرحله با افزایش فشار، تحلیل غیر خطی به صورت استاتیکی تکرار و مقادیر مختلف تنش‌های کششی وارد بر تراورس در هر بارگذاری ثبت شد. مقدار ۲۰ مگاپاسکال، مقدار بار سیلندری است که تأثیر چندانی بر سازه تراورس اعمال



شکل ۹. تغییرات تنش کششی حداکثر اطراف سوراخ رولپلاک‌ها (حد واصل دو رولپلاک هر پابند) با افزایش فشار سیلندری

۳. آزمایش تجربی ماده کتراک و ساخت تراورس

بتنی پیش‌تنیده تقویت‌شده با آرما تور عرضی

در این مرحله با هماهنگی شرکت کارخانجات تولید تراورس کرج اقدام به تهیه نمونه و ساخت تراورس B70 با آرما تورهای عرضی AIII، قطر ۱۲ میلیمتر و با ۶ تیپ مختلف شد (شکل ۱۰).

استفاده از آرما تور طولی صرفاً برای ثابت نگهداشتن آرما تورهای عرضی و سهولت در نصب بوده است.

با توجه به لزوم مجاورت آرما تورهای تقویتی با ترک‌هایی طولی تراورس، شبکه آرما تور معمولی به میلگردهای فوقانی پیش‌تنیدگی متصل شد (شکل ۱۱).

در ادامه صرفاً به منظور مشاهده چشمی و مدل‌سازی واقعی عوامل مخرب ترک‌دهنده تراورس و ایجاد اثرات ناشی از انبساط ناخواسته در درون سوراخ رولپلاک‌ها، نسبت به انجام آزمایش با ماده کتراک اقدام شد.

کتراک ماده‌ای شیمیایی است که پس از ترکیب با آب انبساط حجمی شدیدی پیدا کرده و در صورت محصور شدن، نیرویی فشاری تا مقدار ۸۰ مگاپاسکال ایجاد می‌کند. این ماده به جهت استفاده از همین خاصیت، برای تخریب قطعات بتنی و سنگی بکار می‌رود. ماده کتراک باید پس از اختلاط با آب در مدت ۱۰ دقیقه مصرف شود. میزان اختلاط آب و کتراک در این پروژه به نسبت ۱/۳۳ لیتر آب و ۵ کیلوگرم کتراک بود. در مراحل اولیه آزمایش، ابتدا ماده کتراک روی چند تراورس ضایعاتی آزمایش و

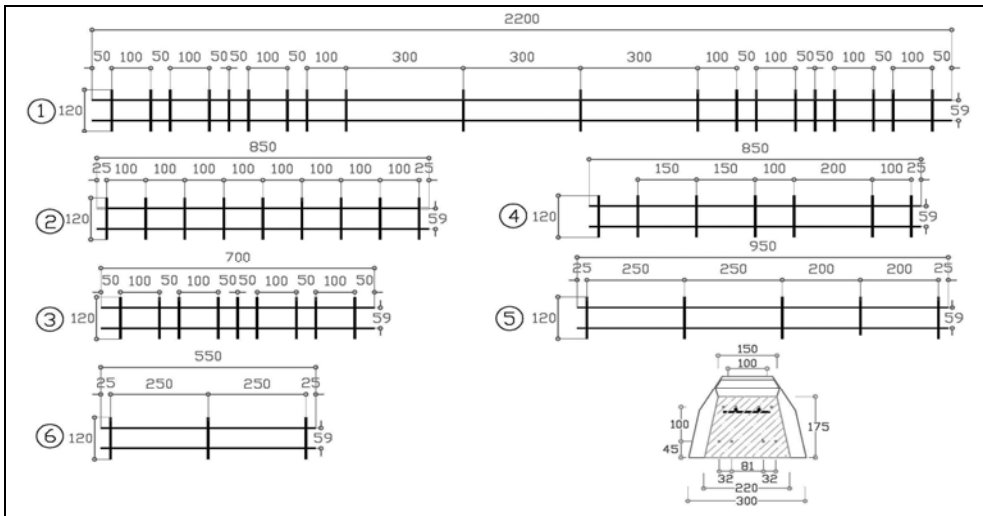
پس از حصول نتایج کمی و کیفی، اقدام به استفاده از این ماده در تراورس‌های ساخته شده اصلی شد. برای تراورس‌های تقویت شده از ماده کتراک به میزان بیشتری استفاده شد تا ترک‌خوردگی به وجود آید. نتایج حاصله از بکار بردن کتراک در تراورس‌های تقویتی و تقویت نشده (شاهد) نشان داد که:

الف) شبیه‌سازی اثرات مخرب و ترک‌دهنده تراورس، که به صورت کاملاً ابتکاری با ماده کتراک انجام شده است، درست و معقول بوده و می‌توان از آن به منظور درک بهتر رفتار و مدل‌سازی تراورس تقویت شده و شاهد، و بررسی صفحات ترک‌خورده استفاده کرد (شکل ۱۲).

ب) با توجه به لزوم افزایش میزان کتراک مصرفی به منظور ایجاد ترک در تراورس‌های تقویتی نسبت به تراورس‌های شاهد، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از آرما تورهای عرضی تقویتی موجب افزایش مقاومت تراورس در برابر عوامل مخرب ترک‌دهنده خواهد شد.

ج) در صورت استفاده از آرما تورهای تقویتی و با آرایش بهینه آنها، می‌توان تراورس را در برابر عوامل مخرب ترک‌دهنده مقاوم کرد به طوری که با تراکم بیشتر آرما تورهای تقویتی در اطراف سوراخ رولپلاک‌ها، تراورس در جهت عرضی تقویت شده و فشار القایی بیشتری را تحمل می‌کند. با افزایش فشار القایی از طرف ماده کتراک به تراورس، مسیر ترک‌ها و صفحه ترک‌خوردگی آن تغییر می‌یابد (شکل ۱۳).

بررسی تجربی و تحلیلی کنترل ترک طولی در تراورس بتنی پیش تنیده



شکل ۱۰. تیپ‌های مختلف شبکه آرماتور تقویتی و محل جای‌گذاری آن‌ها در تراورس



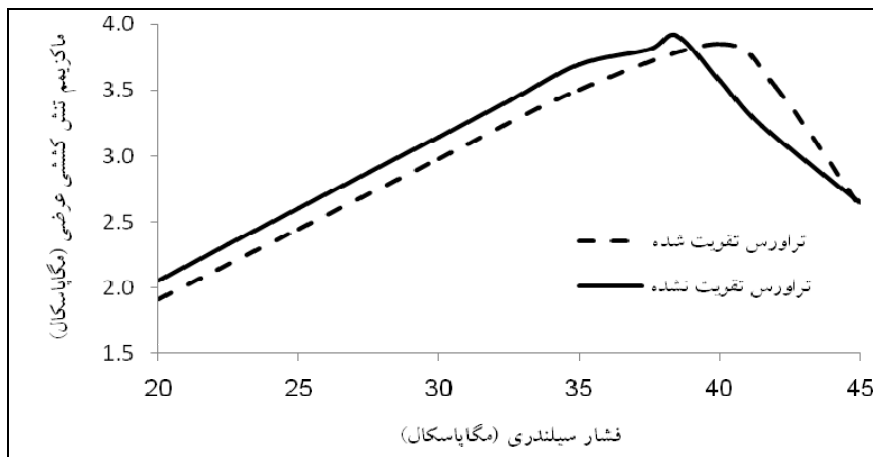
شکل ۱۱. تقویت تراورس با شبکه‌های آرماتور



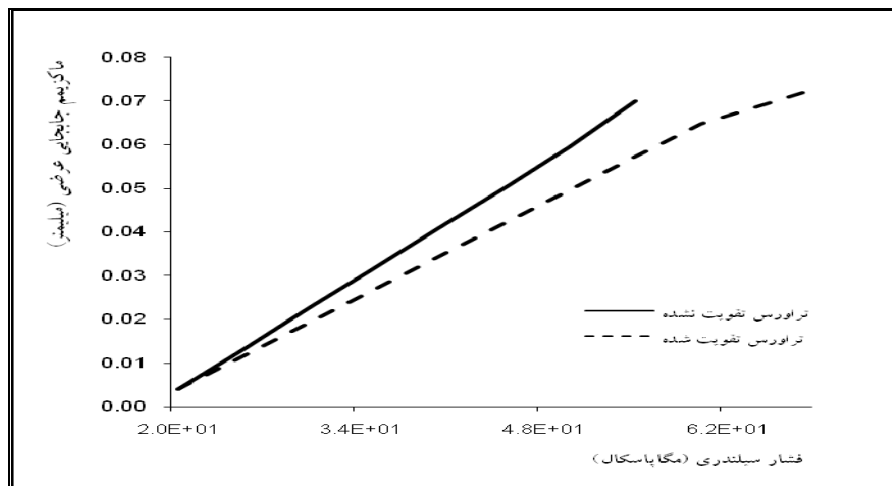
شکل ۱۲. تأثیر آزمایش کتراک بر روی تراورس تقویت نشده



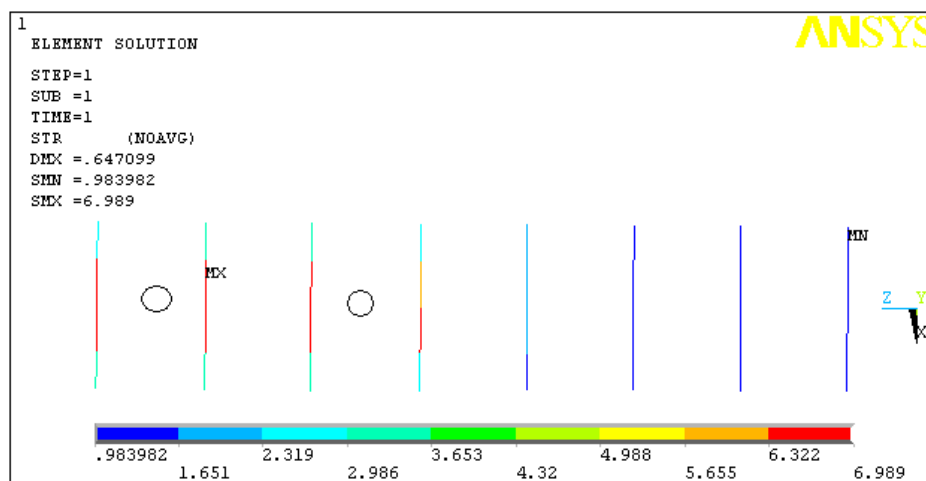
شکل ۱۳. تأثیر آزمایش کتراک بر روی تراورس تقویتی با شبکه آرماتورهای معمولی



شکل ۱۴. مقایسه تغییرات پیشینه تنش کششی عرضی در تراورس تقویت نشده و تقویت شده تحت بارگذاری سیلندری محل رولپلاکها



شکل ۱۵. نمودار پیشینه جابجایی عرضی مجاور رولپلاکها در تراورس تقویت نشده و تقویت شده



شکل ۱۶. توزیع تنش‌های کششی در آرماتورهای عرضی تقویتی

آمده است، در تراورس تقویت شده با تراورس تقویت نشده مقایسه شد (شکل ۱۵).

در تراورس تقویت شده، حداکثر جابجایی عرضی نسبت به حالت تقویت نشده کاهش یافته و نشان دهنده کاهش عرض ترک است. حداکثر جابجایی عرضی در بار ۵۵ مگاپاسکال تراورس تقویت نشده 0.0734 میلی‌متر و در تراورس تقویت شده به 0.054 میلی‌متر کاهش یافته است که نشان دهنده 30% کاهش جابجایی و دلالت بر کاهش عرض ترک طولی رویه تراورس به میزان قابل توجه در تراورس تقویت شده و ایجاد تنش کشش در آرماتورهای تقویتی عرضی می‌شود.

از طرفی با مشاهده تنش‌های کششی در آرماتورهای عرضی تقویتی مشخص شد که این آرماتورها در نزدیکی رولپلاکها تحت تنش بیشتری قرار می‌گیرند و در تحمل تنش عرضی تراورس نقش بیشتری ایفا کرده و بقیه عملاً تنش کمتری را تحمل می‌کنند (شکل ۱۶). بنابراین به منظور بهینه‌سازی آرایش آرماتورهای تقویتی عرضی در تراورس تقویت شده بهتر است بر تراکم آنها در اطراف سوراخها افزود و تعداد آنها را در سایر نواحی کاهش داد.

۵. نتیجه‌گیری

با انجام مطالعات عددی و آزمایشگاهی بر روی تراورس‌های تقویت شده و تقویت نشده برای بررسی اثرات فشارهای ناخواسته از طرف سوراخ رولپلاک به بتن اطراف آن که از عوامل مؤثر در ایجاد ترک‌های طولی است مشخص شد که:

۴. مدل‌سازی عددی تراورس تقویت شده

به منظور تدقیق مطالعات آزمایشگاهی و بررسی نحوه عملکرد تراورس تقویت شده، با افزودن آرماتورهای تقویتی عرضی به مدل و تکرار مراحل بارگذاری، تنش‌های کششی عرضی که عامل ایجاد کننده ترک‌های طولی تراورس هستند در تراورس تقویت نشده و تقویت شده مقایسه شد (شکل ۱۴). نتایج نشان می‌دهند که با اعمال بارگذاری‌های پیش‌تیندگی و فشاری سیلندری، بر روی تراورس تقویت شده، تنش کششی عرضی در بتن در قسمت فوقانی تراورس کاهش یافته و با افزودن مقدار فشار سیلندری تنش کششی قابل توجهی در آرماتورهای تقویتی به وجود خواهد آمد که حاکی از عملکرد مطلوب آنها در جهت تقویت عرضی تراورس است.

برعکس در قسمت تحتانی تراورس تنش کششی ایجاد و شروع به افزایش خواهد کرد که با افزایش فشار سیلندری، در این قسمت ترک خوردگی رخ می‌دهد. از آنجایی که تقویت فقط در نیمه بالایی و در یک لایه در مجاورت وجه فوقانی تراورس انجام شده (شکل ۱۰)، بنابراین روشن است که امکان ترک خوردگی طولی در ناحیه تحتانی تراورس وجود دارد و نتایج آزمایشگاهی آزمایش کتراک نیز مبین آن است (شکل ۱۳). از طرفی استفاده از آرماتور تقویتی، مقدار فشار سیلندری لازم برای رسیدن به تنش کششی قابل تحمل بتن را حدود 13% درصد بهبود می‌بخشد.

حداکثر جابجایی عرضی سطح بالای تراورس در اطراف رولپلاکها که معیاری برای بررسی عرض ترک طولی به وجود

تأسیسات زیربنایی راه آهن جمهوری اسلامی ایران، نشریه شماره ۱۸، خرداد ۱۳۸۳.

- رضایی، فریدون و کوثری، حسین (۱۳۸۴) "بهینه سازی تعمیر و نگهداری تراورس های بتنی پیش تنیده" سومین کنفرانس ملی نگهداری و تعمیرات، انجمن نگهداری و تعمیرات، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، ایران.

- Anthony, J. and Wolanski, B.S. (2004) "Flexural behavior of reinforced and prestressed concrete beams using finite element analysis", A thesis submitted to the Faculty of the Graduate School, Marquette University, in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master of Science Milwaukee, Wisconsin.

- Gonzalez, Nicieza, C. et. al. (2008) "Failure analysis of concrete sleepers in heavy haul railway tracks", Engineering Failure Analysis, Volume 15, Issues 1-2, pp. 90-117, Jan.

- Kaewunruen, S. and Remennikov, A.M. (2006) "Nonlinear finite element modeling of railway prestressed concrete sleeper", Proceedings of the 10th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-10), Bangkok, Thailand, August, pp. 3-5.

- Kaewunruen, S. and Remennikov, A.M. (2007) "Experimental and numerical studies of railway prestressed concrete sleepers under static and impact loads", Asian Institute of Technology, Civil Computing.

- Popovics, S. (1973) "A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 583-599.

- Sadeghi, J.M. and Babae, A. (2006) "Structural optimization of B70 railway prestressed concrete sleepers", Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, Vol. 30, No. B4.

- Shokrieh, M. and Rahmat, M. (2005) "On the reinforcement of concrete sleepers by composite materials", Composites Research Laboratory, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Available online 28 June 2005.

- در اطراف سوراخ رولپلاکها و فقط در صورت اعمال بار پیش تنیدگی، تنش قابل ملاحظه کششی در جهت عرضی تراورس ایجاد می شود. بنابراین چنان که آثار دیگری همچون یخ زدگی آب درون رولپلاک، وجود ذرات ریز سنگدانه در هنگام بستن پیچ و یا اعوجاج و استاندارد نبودن پیچ و رولپلاک، باعث افزایش تنش کششی عرضی شود، امکان بسیاری وجود دارد که تنش کششی القایی در بتن از حد توان و تحمل آن در کشش بگذرد و ترک خوردگی رخ دهد.

- بیشینه تنش کششی در اثر اعمال فشارهای ناخواسته اجرایی درون رولپلاکها، مابین دو رولپلاک هر پابند ایجاد می شود.

- شبیه سازی پارامترهای مخرب و ترک دهنده تراورس که به صورت کاملاً ابتکاری و با استفاده از کتراک با توجه به هندسه ترک القایی از به تراورس انجام شده است، صحیح بوده و می توان از آن به منظور بررسی نحوه تقویت تراورس استفاده کرد.

- فشار سیلندری داخل سوراخها می تواند یکی از عوامل تشدید کننده تنش های کششی عرضی اطراف سوراخها باشد که با افزایش آن تراورس در جهت طولی از لبه بالایی سوراخها ترک می خورد. این نوع ترک خوردگی در عمل هم مشاهده شد.

- با افزودن آرماتورهای تقویتی به تراورس، تنش های کششی عرضی اطراف رولپلاکها، در محلی که استعداد ترک خوردگی وجود دارد کاهش یافته و ترکهای طولی مهار می شوند. ترک خوردگی در تراورس تقویت شده، تحت بار بیشتری که با مصرف ماده بیشتر کتراک نیز همراه بود، رخ می دهد.

- آرماتورهای تقویتی عرضی اطراف سوراخها بیشترین تنش را تحمل می کنند و در تحمل تنش عرضی بیشترین نقش را دارند. بنابراین بهتر است بر تراکم آنها در اطراف سوراخها افزوده شود.

۶. مراجع

- رضایی، فریدون، تدین، محسن، محمد زاده، سعید و اثنی عشری، مهدی (۱۳۸۳) "مشخصات فنی عمومی تولید تراورس بتنی پیش تنیده (تجدید نظر اول)" دفتر مهندسی و نظارت