

اثر ترک بر باربری تراورس بتنی پیش‌تنیده B70 با استفاده از تحلیل مکانیک شکست

سید محمد فرنام^۱، فریدون رضایی^۲

۱- دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشگاه بوعلی سینا

۲- دکتری مهندسی عمران-سازه، دانشیار دانشگاه بوعلی سینا

Email: Seved.Farnam@yahoo.com

چکیده

در این پژوهش با تکیه بر اصول مکانیک شکست در بتن مسلح، رفتار شکست در تراورس بتنی پیش‌تنیده B70 به روش عددی و آزمایشگاهی تحلیل شده است. در بخش عددی این پژوهش، مدل غیرخطی خرابی پلاستیک با استفاده از نرم‌افزار Abaqus و در بخش آزمایشگاهی، روش‌های رپلیکاجیری و تحلیل عکس استفاده شده است. تراورس‌ها با طول پیش‌ترک از صفر تا ۴۵ میلی‌متر و عرض پیش‌ترک از صفر تا ۸ میلی‌متر تحت بار سه نقطه‌ای لنگر خمشی منفی وسط دهانه قرار گرفته‌اند. در این پژوهش میزان کاهش مقاومت قطعه‌ی تراورس پیش‌ترک‌دار در ایجاد ترک و ناپایداری ترک (شکست) برآورد است. نتایج نشان می‌دهند که وجود پیش‌ترک آن‌هم با عرض‌های بسیار کوچک باعث کاهش مقاومت‌های بسیار زیاد در نتایج آزمایش‌های ۲۸ روزه تراورس می‌شوند که در طرح‌های مقاومت‌مصلحی اصلا دیده نشده است. در نتیجه طرح مقاومت‌مصلحی موجود برای طراحی قطعه‌ی تراورس تا زمانی پاسخ‌گو است که هیچ آسیب یا پیش‌ترکی در قطعه وجود نداشته باشد و برای تحلیل و طراحی یک قطعه‌ی بتن پیش‌تنیده‌ای مانند تراورس ما احتیاج به بازرسی‌های دقیق در مورد وجود عیب در آن داریم تا در صورت نیاز با تحلیل مکانیک شکست به‌همراه تحلیل مقاومت‌مصلحی ظرفیت قطعه و به‌طبع آن عمر قطعه تخمین زده شود.

کلمات کلیدی: طراحی مقاومت‌مصلح، طراحی مکانیک شکست، تراورس بتنی پیش‌تنیده، درصد کاهش مقاومت

(تحلیل و طراحی سازه‌های بتنی (کد A))

۱. مقدمه

۱.۱. تراورس بتنی پیش‌تنیده

تراورس‌های بتنی ساده برای اولین بار در سال ۱۹۰۶ برای استفاده بین نورمبرگ و بامبرگ در آلمان ساخته شدند. به علت کمبود چوب و بالا رفتن قیمت آن و عدم خورده شدن بتن توسط حشرها و قارچ‌ها و مقاومت خوب آن، کاربرد تراورس‌های بتنی بعد از جنگ جهانی دوم به سرعت رواج پیدا کرد اما هنوز پاسخگوی نیاز این صنعت نبود. کیفیت پایین بتن باعث مقاومت کم و نیز مشکلات بتن در کشش باعث شد تا بتن‌های با مقاومت بالا و همچنین پیش‌تنیده از سال ۱۹۴۳ وارد این صنعت شوند و امروزه با گسترش چشمگیری در دنیا و البته ایران مواجه شوند. تراورس یکی از مهم‌ترین اجزای خطوط راه‌آهن است که وظیفه‌ی آن دریافت نیروهای وارده از چرخ‌ها به ریل و سپس انتقال آن نیروها به لایه بالاست و در نهایت به زیرسازی مسیر می‌باشد. در شبکه راه‌آهن ایران، تراورس بتنی پیش‌تنیده منوبلوک B70 به علت مقاومت بالا، سبک بودن و سایر مزایای آن بیشتر مورد توجه است.

مطالعات مکانیکی بر روی تراورس‌های بتنی به قرن ۲۱م برمی‌گردد. گوستاوسن در رابطه با آنالیزهای استاتیکی و دینامیکی تراورس بتنی تحقیقاتی انجام داد و تراورس را تحت بارهای وارده از ریل و بالاست به روش اجزا محدود قرار داد [۱]. آنتونی و ولن‌اسکی مطالعاتی در ارتباط با رفتارهای انعطاف‌پذیر تیرهای بتنی پیش‌تنیده و مسلح با استفاده از روش اجزا محدود انجام دادند [۲]. کاونرون و رمنیکوف، رفتار استاتیکی تراورس بتنی پیش‌تنیده را با به‌کار بردن مشخصات غیرخطی مصالح به روش اجزا محدود و آزمایشگاهی بررسی کردند [۳] و [۴]. رضایی و همکاران، مطالعاتی با موضوع "بررسی تجربی و تحلیلی کنترل ترک طولی در تراورس بتنی پیش‌تنیده" انجام دادند. در این مطالعه تأثیر عوامل بوجود آورنده‌ی ترک‌های طولی حاصل از فشار اضافی درون رولپلاک‌ها توسط فشار سیلندری در محل سوراخ‌ها تقریب

و مدل‌سازی شد [۵]. در ادامه رضایی و فرنام، در سال ۲۰۱۵ با مدل‌سازی عددی تراورس بتنی پیش‌تنیده B70 پیش‌ترک‌دار ضریب شدت تنش بحرانی در مود شکست I را در ترک اولیه و ترک نهایی محاسبه کردند و نشان دادند که برخلاف بتن معمولی ضریب شدت تنش بحرانی مود I در تراورس بتنی پیش‌تنیده به طول پیش‌ترک وابسته بوده و با افزایش طول پیش‌ترک به‌صورت خطی رشد می‌کند [۶]. همچنین فرنام و رضایی در سال ۲۰۱۶ در دو مقاله‌ی مختلف نتایج تحلیل مکانیک شکست بر روی تراورس بتنی پیش‌تنیده B70 را به‌صورت آزمایشگاهی با استفاده از روش رپلیکاسیون و تحلیل عکس بر روی اندازه‌ی واقعی تراورس بررسی کردند. آن‌ها با اندازه‌گیری پارامترهای مختلف خرابی و شکست شامل: گسترش خرابی، رشد ترک، بازشدگی دهانه‌ی ترک (CMOD)، ضریب شدت تنش بحرانی و نمودار نیرو- تغییرمکان علاوه‌بر تایید مدل عددی قبلی تحلیل کامل مکانیک شکست بر روی آزمایش سه‌نقطه‌ای لنگر خمشی منفی وسط دهانه انجام دادند [۷ و ۸].

از زمان تولد علم مکانیک شکست در اوایل قرن بیستم به‌علت کاربرد زیاد ماده‌ی بتنی از یکسو و رفتار شبه ترد آن از سوی دیگر در حوزه‌ی بتن، تعداد زیادی مطالعات عددی و تئوری بر روی ویژگی‌های شکست یک قطعه بتنی با در نظر گرفتن شرایط مختلف قطعه یا با در نظر گرفتن اندازه‌های مختلف انجام شده است [۹]. بتن سنگ مصنوعی است که مقاومت فشاری بالایی دارد در مقابل اما مقاومت کششی ندارد. از دیرباز بحث افزایش مقاومت کششی بتن مطرح بوده تا با استفاده از ویژگی مثبت بتن یعنی مقاومت فشاری آن بتوان به یک قطعه‌ی کامل برای باربری‌های مختلف دست پیدا کرد. ایده‌ی بتن مسلح و به‌طبع آن بتن پیش‌تنیده با فلسفه‌ی ارتقا دادن به این موضوع، ترکیبی را در بتن ایجاد کردند که نتایج مختلف نشان‌گر بهبود مشخصات باربری و مکانیک شکستی در بتن شده است. وجود آرماتور باعث افزایش مقاومت کششی ماده کامپوزیت بتن و فولاد شده و پیش‌تنیدگی در فولاد باعث جلوگیری از ایجاد ترک و رشد ترک شده است. در حوزه‌ی بتن مسلح مطالعات تئوری و آزمایشگاهی برای تعیین انرژی شکست در بتن معمولی توسط آزاد و همکاران انجام شد [۱۰]. رویز و همکاران از روشی برای مطالعه‌ی شکست در قطعه بتن کم‌آرمه استفاده کردند و نشان دادند که ظرفیت باربری رابطه‌ی مسقیم با نسبت آرماتور در مقطع دارد [۱۱]. در سال ۲۰۰۷، فرور و همکاران از مکانیک شکست خطی برای محاسبه K_{Ic} در بتن مسلح و با مدل چسبندگی در نوک ترک استفاده کردند [۱۲]. شاووی و همکاران در سال ۲۰۱۱ از تکنیک انتشار آکوستیک برای محاسبه‌ی پارامترهای مکانیک شکست بتن ساده استفاده کردند [۱۳]. در این پژوهش سعی شده که از نتایج موجود در تحلیل مکانیک شکست بر روی قطعه‌ی تراورس با اندازه‌ی واقعی شامل پارامترهای اصلی شکست: مانند نمودار بار-تغییرمکان، رشد ترک و بازشدگی دهانه‌ی ترک به‌منظور تخمین میزان کاهش مقاومت تراورس در برابر ایجاد ترک و ناپایدار شدن ترک (شکست نهایی) استفاده و حساسیت باربری قطعه به‌وجود پیش‌ترک در مبانی تئوری و آزمایشگاهی طراحی مقاومت مصالح تراورس دیده شود. در واقع با طرح مکانیک شکستی با فرض وجود پیش‌ترک نتایج تئوری مقاومت مصالحی تراورس بتنی پیش‌تنیده به چالش کشیده می‌شود.

۲. روش انجام پژوهش

۱.۲. مدل‌سازی عددی

برای مدل‌سازی عددی و تحلیلی از نرم‌افزار ABAQUS/CAE 6.12-1 استفاده شده است. مدل غیرخطی پلاستیک خرابی بتن به‌منظور بررسی ایجاد خرابی و اثرات آن بر تراورس در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است. در ایجاد هندسه‌ی مدل سعی شده است که تا حد امکان مدل با حداقل تغییرات نسبت به واقعیت ساخته شود. ابعاد و اندازه‌ها بر اساس نمونه‌های ساخته شده در کارخانه بتنون صنعت بریس به نرم‌افزار معرفی شده‌اند. در شکل ۱ مدل سه‌بعدی مش‌بندی شده تراورس بتنی پیش‌تنیده‌ی B70 نشان داده شده است. در این مدل‌سازی برای تراورس از مدل Solid، ۸ گره‌ای و برای کابل از مدل Link استفاده شده است.

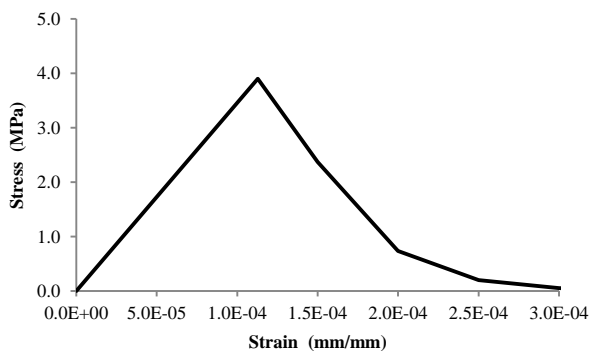


شکل ۱. مدل سه بعدی تراورس بتنی پیش تنیده B70

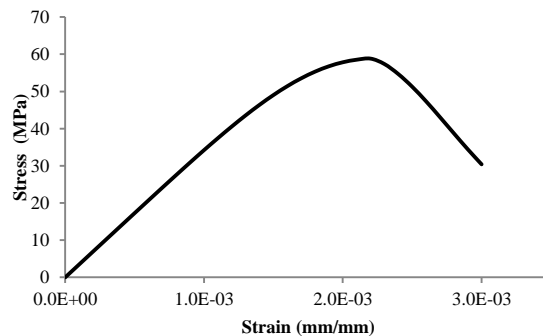
مواد تشکیل دهنده‌ی قطعه‌ی تراورس بتنی پیش تنیده شامل: بتن و کابل هستند که برای ایجاد مدل باید به شکل نزدیک به واقعیت تولید در شرکت بتون صنعت بریس در مدل نرم‌افزاری Abaqus تعریف شوند.

۱.۱،۲ مشخصات بتن

بتن اصلی‌ترین ماده‌ی تشکیل دهنده‌ی تراورس است که باید دارای مقاومت (f_c') ۷ روزه 450 kg/cm^2 روی نمونه‌های استوانه‌ای $15 \times 30 \text{ cm}$ باشد. حداقل مقاومت ۲۸ روزه برای نمونه‌های بتن تراورس باید برابر با 600 kg/cm^2 باشد [۱۴]. تغییر شکل بتن تحت تنش فشاری با منحنی تنش-کرنش آن مشخص می‌شود، با توجه به مدل پلاستیک خرابی بتن نمودارهای تنش-کرنش در فشار و کشش بتن به ترتیب در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. نمودار تنش-کرنش بتن تحت کشش $f_t' = 3.9 \text{ MPa}$

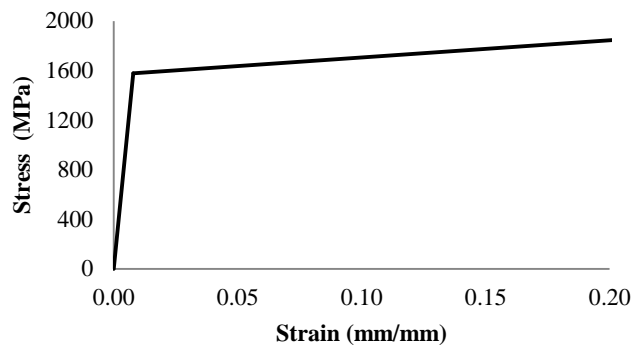


شکل ۲. منحنی تنش کرنش بتن $f_c' = 58.84 \text{ MPa}$

۲.۱،۲ مشخصات کابل

کابل مصرفی برای ساختن تراورس‌های بتنی پیش تنیده از نوع ST-160 به قطر ۷ mm است. برای این کابل مقدار تنش تسلیم، f_y برابر با ۱۴۰۰ MPa و حد کشش مجاز ۱۸۰۰ MPa می‌باشد. نمودار تنش-کرنش فولاد به‌طور یکسان در فشار و کشش را می‌توان به صورت دوخطی، همانند شکل ۴ در نظر گرفت. دیگر مشخصات مکانیکی فولاد کابل پیش تنیدگی در جدول ۱ آمده است [۱۵].

چگالی kg/m^3	ضریب پوآسون، ν	مدول سخت‌شدگی، $E_t(\text{MPa})$	مدول الاستیسیته، $E_s(\text{MPa})$
۷۸۵۰	۰/۳	۲۰۰۰	۱۹۵۰۰۰



جدول ۱. مشخصات مکانیکی فولاد میلگردهای طولی [۱۵]

شکل ۴. نمودار تنش-کرنش فولاد همراه با سخت‌شوندگی خطی

۲،۲ روش آزمایشگاهی

در این پژوهش، آزمایش استاتیکی سه نقطه‌ای لنگر خمشی منفی وسط دهانه بر روی ۲۵ تراورس بتنی پیش‌تنیده B70 پیش‌ترک‌دار تولید شرکت "بتون صنعت بریس" انجام شده است (شکل ۵ و ۶). این تراورس‌ها پس از طی مراحل ساخت و عمل‌آوری و بعد از گذشت ۲۸ روز در آزمایش استفاده می‌شوند.



شکل ۶. سیستم جک آزمایش سه نقطه‌ای خمشی.



شکل ۵. تراورس بتنی پیش‌تنیده B70.

در روند آزمایش سه نقطه‌ای بار با سرعتی بارگذاری می‌شود که برای رسیدن از نیروی صفر به نیروی حداکثر، ۵ دقیقه (حداکثر نرخ بارگذاری ۱۲۰ کیلو نیوتن بر دقیقه) وقت صرف شود [۱۶]. بار اعمال و در آزمایش‌های مختلف، نیرو، تغییر مکان و مشخصات ترک برداشت می‌شود. در این پژوهش از دو روش رپلیکاگیری^۱ و تحلیل عکس^۲ برای برداشت نتایج آزمایش لنگر خمشی منفی وسط دهانه‌ی تراورس بتنی پیش‌تنیده پیش‌ترک‌دار B70 استفاده شده است.

۲،۲،۱ آزمایش رپلیکاگیر

اندازه‌گیری پارامترهای شکست و خرابی با روش جدید رپلیکاگیری در این پژوهش انجام گرفته است. رپلیکا ماده‌ای ترکیبی است از دو جز سخت^۳ و نرم^۴ که در محفظه‌ی نشان داده شده در شکل ۷ قرار می‌گیرند. ماده‌ی نرم خصوصیت نفوذپذیری بالا

¹ Replica

² Image Analysis

³ Hard component

⁴ Soft component

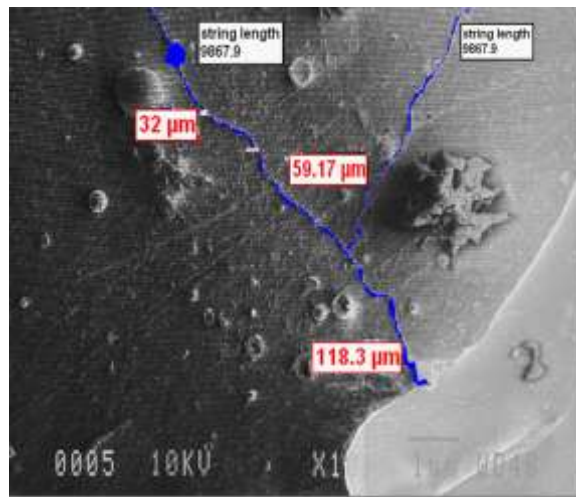
به رپلیکا می‌دهد تا در منافذ قطعه نفوذ کند و ماده‌ی سخت باعث می‌شود تا رپلیکا بعد از نفوذ سخت شده و البته به راحتی از نمونه جدا شود. ماده‌ی ترکیبی^۵ رپلیکا توسط دستگاه تفنگی تزریق رپلیکا در محل ترک تزریق می‌شود (شکل ۷).



شکل ۷. تزریق ماده‌ی رپلیکا.

۲.۲.۲. تحلیل عکس

روش دیگری که در این پژوهش برای بررسی و تحلیل ترک در تراورس بتنی پیش تنیده مورد استفاده قرار گرفته، روش تحلیل عکس است. تحلیل عکس هم به منظور تحلیل ترک‌های بزرگ برداشت شده توسط رپلیکا مورد استفاده قرار گرفته (SEM^۶), هم به صورت مجزا و بر روی عکس‌هایی که مستقیم از ترک گرفته شده است (شکل ۸).



شکل ۸. نمونه‌ی آزمایش میکروسکوپ الکترونی رویشی (SEM) تحلیل عکس شده بر روی رپلیکا.

۳. نتایج

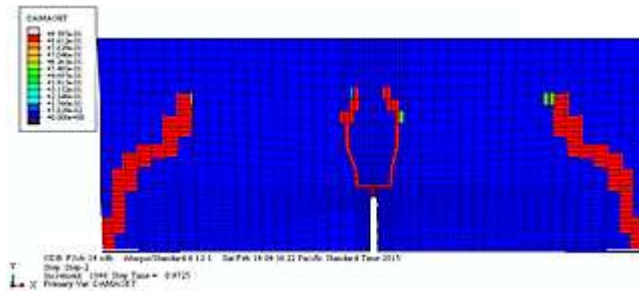
۳.۱. اثر طول پیش ترک

گسترش ترک مهم‌ترین پارامتر تحلیل و طراحی مکانیک شکست یک قطعه به شمار می‌آید. هرچه ترک بیشتر رشد می‌کند، مقاومت باقی‌مانده در قطعه کاهش می‌یابد و در نتیجه بار کمتری نسبت به بار اولیه‌ای که طراحی براساس آن انجام شده بود،

^۵ Compound

^۶ Scan Electron Microscope

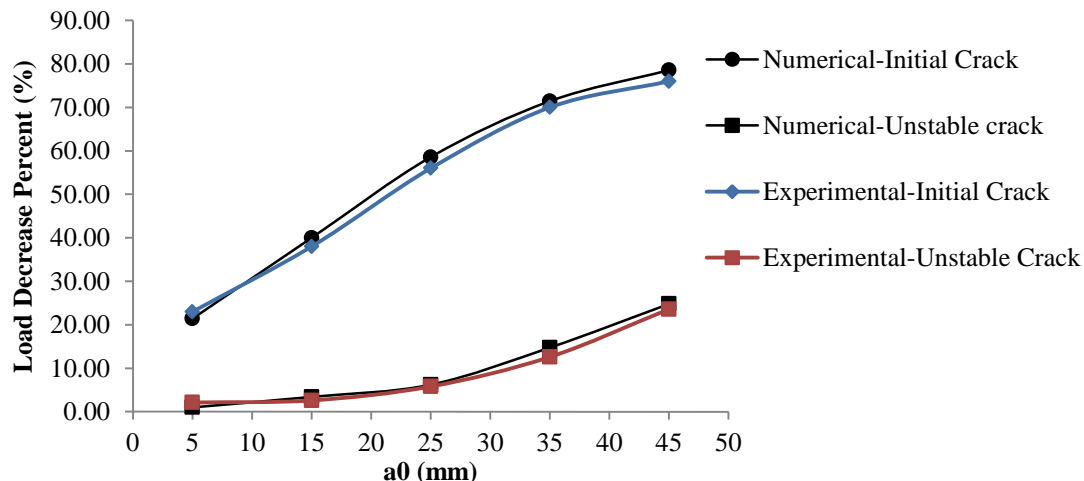
تحمل می‌کند. نتایج تحلیل خرابی نشان داد که خرابی از محل پیش‌ترک شروع و بعد از دوشاخگی به صورت متقارن ادامه پیدا می‌کند تا به مرحله‌ی شکست نهایی برسد، همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود [۶]. در این بخش از پژوهش، گسترش ترک براساس نمودار بار-طول ترک در محل پیش‌ترک در تحلیل عددی و آزمایشگاهی به صورت همزمان بررسی می‌شود. طول ترک تراورس بتنی پیش‌تنیده در محل پیش‌ترک و در یکی از شاخه‌های دوشاخگی ترک (به علت تقارن) در مدل عددی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. در این بخش تاثیر طول پیش‌ترک و عرض پیش‌ترک به صورت جداگانه بررسی شده است.



شکل ۹. مدل کیفی خرابی نهایی تراورس بتنی پیش‌تنیده B70 در محل پیش‌ترک [۶].

برای بررسی اثر طول پیش‌ترک بر روند رشد ترک، عرض ترک ثابت و طول ترک تغییر می‌کند. بدین منظور عرض پیش‌ترک (d0) ۸ میلی‌متر و طول پیش‌ترک (a0) صفر، ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در شکل ۱۰، بررسی بر روی محل پیش‌ترک انجام و با ثابت نگاه‌داشتن مقدار عرض پیش‌ترک به مقدار ۸ میلی‌متر میزان کاهش مقاومت تراورس در برابر ایجاد ترک اولیه و همچنین ترک ناپایداری در تحلیل عددی و آزمایشگاهی ترسیم شده است.

Load Decrease Percent-A0



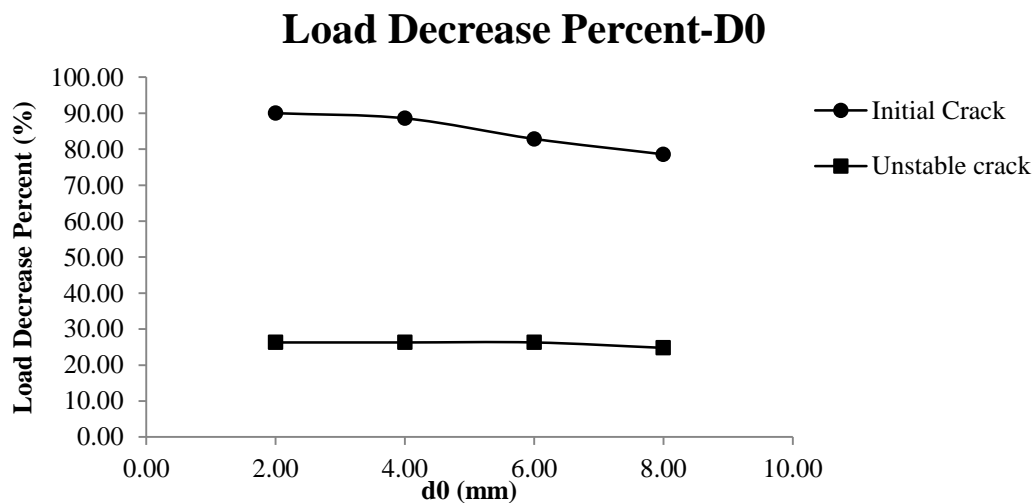
شکل ۱۰. تاثیر طول پیش‌ترک a0 در کاهش مقاومت ایجاد ترک اولیه و ترک ناپایدار در محل پیش‌ترک تراورس.

همان‌طور که در شکل ۱۰ (در نتایج آزمایشگاهی و عددی) دیده می‌شود میزان کاهش مقاومت به‌مراتب در ترک اولیه بیشتر و همچنین در ابتدا با شیب تندتری این کاهش مقاومت رشد می‌کند. تفاوت دیگری که از مقایسه‌ی این دو نمودار مشهود است شیب نمودارها در طول ترک‌های بزرگتر است که برخلاف ترک‌های کوچکتر و در تضاد باهم در ترک اولیه کاهش اما در ترک ناپایداری افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که حساسیت ترک اولیه به وجود ترک بسیار بالاتر از ترک ناپایداری

است. برعکس در طول ترک‌های بزرگتر به نظر می‌آید که حساسیت قطعه به ایجاد ترک در مقایسه با طول ترک اولیه کمتر شده در عین حال که حساسیت ترک ناپایدار بیشتر شده است.

۲.۳. اثر عرض پیش‌ترک

برای بررسی اثر عرض پیش‌ترک بر روند رشد ترک، طول ترک ثابت و عرض ترک تغییر می‌کند. به این منظور طول پیش‌ترک ۴۵ mm و عرض پیش‌ترک ۲، ۴، ۶ و ۸ در تنها مدل عددی بررسی شده است. کاهش مقاومت قطعه در شکل ۱۱ برای ترک اولیه و ناپایداری ترک بطور یک‌جا نمایش داده شده است.



شکل ۱۱. تأثیر عرض پیش‌ترک d_0 در کاهش مقاومت ایجاد ترک اولیه و ترک ناپایدار در محل پیش‌ترک تراورس.

در شکل ۱۱ اثر متفاوت عرض پیش‌ترک بر ایجاد ترک و ناپایداری ترک به خوبی دیده می‌شود. طبق این نمودار تقریباً می‌توان گفت مقدار عرض پیش‌ترک تأثیری بر کاهش مقاومت قطعه در برابر ایجاد ترک ندارد در واقع با افزایش عرض پیش‌ترک تقریباً میزان کاهش مقاومت در برابر ترک اولیه ثابت و مقدار تقریبی ۸۰٪ است.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج کاهش مقاومت با افزایش طول پیش‌ترک نشان می‌دهد که میزان کاهش مقاومت به مراتب در ترک اولیه بیشتر و همچنین در ابتدا با شیب تندتری این کاهش مقاومت رشد می‌کند. این نتایج همچنین نشان می‌دهد که حساسیت ترک اولیه به وجود ترک بسیار بالاتر از ترک ناپایداری است. همچنین نتایج کاهش مقاومت به علت عرض پیش‌ترک نشان می‌دهد که عرض ترک اولیه تأثیری در کاهش مقاومت قطعه در برابر ایجاد ترک ندارد در واقع با افزایش عرض ترک اولیه تقریباً میزان کاهش مقاومت در برابر ترک اولیه ثابت و مقدار تقریبی ۸۰٪ است.

نتایج به دست آمده از تحلیل عددی و آزمایشگاهی هر دو موید نتایج ذکر شده هستند. این نتایج نه تنها روش‌های طراحی مرسوم مقاومت مصالحی را زیر سوال می‌برند بلکه طرح‌های آزمایشگاهی که بر روی تراورس‌ها تعریف می‌شوند را نیز با چالش روبرو می‌کنند. نتایج به خصوص در ترک اولیه بسیار تأمل برانگیز است. وجود ترک آن‌هم با عرض‌های بسیار کوچک باعث افت‌های بسیار زیاد در نتایج آزمایش‌های ۲۸ روزه بر روی تراورس می‌شوند که در طرح‌های مقاومت مصالحی اصلاً دیده نشده است. به طور مثال یک پیش‌ترک با طول ۵ mm و عرضی کمتر از ۲ mm باعث می‌شود در نیروهای به اندازه‌ی ۸۰٪ کمتر

ترک اولیه رخ دهد. قابل ذکر است که در آزمایش‌ها و روش‌های طراحی مرسوم ایجاد ترک به اندازه‌ی ۱۵ mm نشان دهنده‌ی کفایت یا عدم کفایت قطعه‌ی تراورس می‌باشد. نتایج این پژوهش به‌خوبی نشان می‌دهد که طرح مقاومت مصالحی موجود برای قطعه‌ی تراورس تا زمانی پاسخ‌گو است که هیچ آسیب یا پیش‌ترکی در قطعه وجود نداشته باشد. نتایج در این پژوهش نشان می‌دهد که برای تحلیل و طراحی یک قطعه‌ی بتن پیش‌تنیده‌ای مانند تراورس، طراحان احتیاج به بازرسی‌های دقیق در مورد وجود عیب دارند تا در صورت نیاز با تحلیل مکانیک شکست به‌همراه تحلیل مقاومت مصالحی ظرفیت قطعه و به‌طبع آن عمر قطعه تخمین زده شود. نتایج این رساله نشان می‌دهد که طراحی‌های مرسوم نیاز به مکملی به نام طرح مکانیک شکست دارند.

۵. قدردانی

نویسندگان این مقاله از کارخانه تولید تراورس بتنی پیش‌تنیده‌ی B70 "بتون صنعت بریس" برای حمایت مالی و تجهیزاتی از این پژوهش تشکر می‌کنند.

۶. مراجع

- [1] Gustavson, R. 2000. "Static and dynamic finite element analysis of concrete sleepers". Licentiate of Engineering Thesis. Department of Structural Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden.
- [2] Anthony, J., & 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.
- [3] Kaewunruen, S., & Remennikov, A. M. 2006. "Nonlinear finite element modelling of railway prestressed concrete sleeper". Proceedings of the 10th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. 3-5 August, Bangkok, Thailand, pp. 323-328.
- [4] Kaewunruen, S. & Remennikov, A. M. 2007. "Experimental and numerical studies of railway prestressed concrete sleepers under static and impact loads". Civil Comput, Vol. 3: 25-28.
- [5] Rezaei, F., Shiri, M. R. & Farnam, S. M. 2012. "Experimental and numerical studies of longitudinal crack control for pre-stressed concrete sleepers". Eng Fail Anal, Vol. 26: 21-30.
- [6] Rezaei, F. & Farnam, S. M. 2015. "Fracture mechanics analysis of pre-stressed concrete sleepers via investigating crack initiation length". Eng Fail Anal, Vol. 58: 267-280.
- [7] Farnam, S. M. & Rezaei, F. 2016. "Part A- Experimental: Experimental analysis of crack propagation in pre-stressed concrete sleepers by fracture mechanics". Int J Transport Eng, Vol. 4 (3): 163-177.
- [8] Farnam, S. M. & Rezaei, F. 2016. "Part B- Analysis: Experimental analysis of fracture and damage mechanics of pre-stressed concrete sleepers B70". Int J Transport Eng, Vol. 5 (1): 17-29
- [9] Thai DK, Kim SE. Damage analysis of reinforced concrete walls under impact loading using the finite element approach. Eng Fail Anal 2014;45:252-277.
- [10] Azad, A., Mirza, M., Chan, P., 1989. Fracture energy of weakly reinforced concrete beams [J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures 12 (1), 9-18.
- [11] Ruiz, G., Elices, M., Planas, J., 1998. Experimental study of fracture of lightly reinforced concrete beams [J]. Materials and Structures 31 (214), 683-691.
- [12] Ferro, G., Carpinteri, A., Ventura, G., 2007. Minimum reinforcement in concrete structures and material structural instability [J]. International Journal of Fracture 146 (4), 213-231.
- [13] Shaowei, Hu., Jun, Lu., Xiaoqing, Zhong, 2011. Study on characteristics of acoustic emission property in the normal concrete fracture test [J]. Advanced Materials Research 189-193, 1117-1121.
- [۱۴] مشخصات فنی عمومی روسازی راه‌آهن، ۱۳۸۴. نشریه ۳۰۱. معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور (سازمان مدیریت سابق).

[15] ASTM 416/A416M – 06, "Standard specification for steel strand, uncoated seven-wire for prestressed concrete". 2006.

[16] EN 13230-1, "Railway Applications – Track - Concrete sleepers and bearers, Part 1: General Requirements". 2014.