

## تحلیل مکانیک شکست تراورس بتنی پیش تنیده با بررسی اثر اندازه‌ی پیش ترک

سید محمد فرنام \*

دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

فریدون رضایی

دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان

مهدی بیات آوزمانی

کارشناس ارشد مهندسی عمران-سازه، رئیس هیئت مدیره شرکت بتن پژوهش مانا، همدان

### چکیده

تراورس‌های بتنی پیش تنیده به علت ظرفیت بالای مقطع در خطوط سنگین تا ۳۰ ton و با سرعت‌های بالا تا ۲۰۰ km/hr استفاده می‌شود. به منظور بررسی پارامترهای مکانیک شکست، تراورس بتنی پیش تنیده با ۶ طول شکاف اولیه از ۰/۰ mm تا ۴۰ mm با گام افزایش ۱۰ mm و ۴۵ mm تحت بار خمشی سه نقطه‌ای مثبت در نشیمن‌گاه ریل قرار گرفته است. مدل‌سازی تراورس در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS انجام شده است. در این مقاله، پارامترهای مهم تحلیل و طراحی مکانیک شکست از جمله  $K_{Ic}$  اولیه،  $K_{Ic}$  نهایی، نمودار بار-تغییر مکان، بار نهایی و انرژی قطعه محاسبه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که ویژگی‌های شکست بتن پیش تنیده‌ی تراورس با بتن معمولی متفاوت است به طوری که برخلاف بتن معمولی که ضریب شدت تنش به طول شکاف اولیه وابستگی ندارد، در بتن پیش تنیده با افزایش نسبت طول ترک اولیه به ارتفاع مقطع هر دو مقدار ضریب شدت تنش اولیه و نهایی افزایش می‌یابند. همچنین نتایج نمودار بار-تغییر مکان نشان می‌دهد، بار نهایی و انرژی قطعه تراورس بتنی پیش تنیده با افزایش این نسبت به صورت تقریباً خطی کاهش می‌یابند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش ۲۵ درصدی طول پیش ترک، سطح زیر نمودار بار-تغییر مکان ۳۷ درصد کاهش می‌یابد، در حالی که بار نهایی ۲۲ درصد کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: مکانیک شکست، تراورس بتنی پیش تنیده، ضریب شدت تنش، نسبت طول پیش ترک به ارتفاع مقطع.

\* نویسنده مسئول: Seyed.farnam@yahoo.com

## ۱- مقدمه

## ۱-۱- تراورس بتنی پیش تنیده

تراورس‌های بتنی ساده برای اولین بار در سال ۱۹۰۶ برای استفاده بین نورمبرگ و بامبرگ در آلمان ساخته شدند [۱]. به علت کمبود چوب و بالا رفتن قیمت آن و عدم خورده شدن بتن توسط حشرات و قارچ‌ها و مقاومت خوب آن، کاربرد تراورس‌های بتنی بعد از جنگ جهانی دوم به سرعت رواج پیدا کردند. با بالا رفتن سرعت خطوط و تناژ محور چرخ‌ها تراورس‌های بتنی ساده پاسخگوی نیاز این صنعت نبودند. 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 خطوط ریلی شوند. امروزه کاربرد بتن‌های پیش‌تنیده با گسترش چشمگیری در دنیا و البته ایران مواجه شده است [۲]. تراورس یکی از مهم‌ترین اجزای خطوط راه‌آهن است که وظیفه‌ی آن دریافت نیروهای وارده از چرخ‌ها به ریل و سپس انتقال آن نیروها به لایه‌ی بالاست و در نهایت به زیرسازی مسیر می‌باشد. در سال‌های اخیر، افزایش نیازهای انتقال کالا و مسافر در مقایسه با محدودیت ظرفیت ناوگان هوایی و آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از سوخت هواپیما، قطارهای سریع‌السير باری را به مطلوب‌ترین سیستم حمل و نقل خطوط سنگین سریع‌السير تبدیل نموده است [۳]. در خطوط راه‌آهن سرتاسر دنیا، از تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده به علت مقاومت و ظرفیت بالا در خطوط ریلی استفاده می‌شود.

ماتر در مطالعه‌های خود تئوری پیش‌تنیدگی، تئوری الاستیک و عملیات برای کاهش تغییرشکل‌ها و تنش‌های اصلی و برشی در تراورس‌های آزمایشی را شرح داد [۴]. گوستاوسن در رابطه با تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی تراورس بتنی تحقیقاتی انجام داد و تراورس را تحت بارهای وارده از ریل و بالاست به روش اجزای محدود قرار داد [۵]. آنتونی و ولن‌اسکی<sup>۱</sup> مطالعاتی در ارتباط با رفتارهای انعطاف‌پذیر تیرهای بتنی پیش‌تنیده و مسلح با استفاده از روش اجزای محدود انجام دادند [۶]. رمینکوف<sup>۲</sup> و کاونرون<sup>۳</sup> رفتار استاتیکی تراورس بتنی پیش‌تنیده را با بکار بردن مشخصات غیرخطی مصالح به روش اجزای محدود بررسی کردند [۷]. رمینکوف و کاونرون همچنین مطالعه‌ی عددی و آزمایشگاهی

تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده تحت بارهای استاتیکی و ضربه را به روش اجزای محدود انجام دادند [۸]. رضایی و همکاران<sup>۴</sup>، 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 شده است [۹].

## ۱-۲- مکانیک شکست بتن پیش‌تنیده

از زمان تولد علم مکانیک شکست در اوایل قرن بیستم به علت 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 قطعه‌ی بتنی با در نظر گرفتن شرایط مختلف قطعه یا با در نظر گرفتن اندازه‌های مختلف انجام شده است [۱۰-۱۱-۱۲]. بتن، سنگی 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 به طبع 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 [۱۳]. رویز و همکاران از روشی برای مطالعه‌ی شکست در قطعه‌ی بتن کم‌آرمه استفاده کردند و نشان دادند که ظرفیت باربری رابطه‌ی مستقیم با نسبت آرماتور در مقطع دارد [۱۴]. 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 [۱۵]. شاووی و همکاران در سال ۲۰۱۱ از روش انتشار آکوستیک برای محاسبه‌ی پارامترهای مکانیک شکست بتن ساده

<sup>3</sup> Kaewunruen<sup>4</sup> Rezaei, Shiri, Farnam.<sup>1</sup> Wolanski<sup>2</sup> Remennikov

در این مقاله به منظور کاهش زمان تحلیل مدل، نیمی از تراورس مدل شده است. برای تحلیل اجزای محدود توسط نرم افزار آباکوس، مشخصات مصالح اعضای مدل سازی شده باید تعریف گردد. به طور معمول این خواص شامل چگالی، مدول الاستیسیته، ضریب پوآسون و سایر خواص مکانیکی می باشند. در این قسمت پارامترهای مورد نیاز برای مدل سازی بتن مورد استفاده در تراورس بتنی پیش تنیده مورد بررسی قرار می گیرد.

## ۲-۱-۲- مشخصات مصالح

### ۲-۱-۱-۲- مقاومت فشاری

بتن اصلی ترین ماده ی تشکیل دهنده ی تراورس است که طبق نشریه ۳۰۱ سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، باید دارای مقاومت ۷ روزه  $400 \text{ kg/cm}^2$  روی نمونه های مکعبی  $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  باشد. حداقل مقاومت ۲۸ روزه برای نمونه های بتن تراورس باید برابر با  $600 \text{ kg/cm}^2$  باشد. مقاومت حاصله برای نمونه ی استوانه ای با  $f_c'$  نمایش داده می شود.

### ۲-۱-۲- منحنی تنش- کرنش بتن با مقاومت بالا تحت فشار

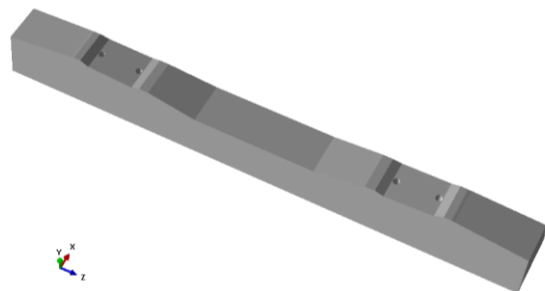
تغییر شکل بتن تحت تنش فشاری با منحنی تنش-کرنش آن مشخص می شود. هر چه بتن تحت تنش فشاری بالاتری قرار گیرد، رفتار غیرخطی آن بیش تر آشکار می شود. همانگونه که از منحنی تنش-کرنش بتن در شکل ۲ مشاهده می شود، پس از رسیدن بتن به مقاومت فشاری حداکثر  $f_c'$ ؛ بتن تحت بارهای کمتر تغییر شکل های بیش تری را تحمل می کند، بدون آنکه در آن شکست رخ دهد. این وضعیت شرایط رفتار نرم تری را برای بتن در محدوده ی بارهای حداکثر و نزدیک به شرایط نهایی شکست فراهم می آورد.

کرنش نظیر تنش حداکثر  $f_c'$  که با  $\epsilon_0$  نمایش داده می شود، برای بتن های با مقاومت پایین تا مقاومت بالا ممکن است در محدوده ی ۰/۰۰۱۵ تا ۰/۰۰۳ متغیر باشد. هم چنین کرنش نهایی نظیر شکست فشاری بتن که با  $\epsilon_{cu}$  نمایش داده می شود، برای انواع بتن از ۰/۰۰۳ به بالا خواهد بود. در بسیاری از آیین نامه های طراحی به صورت محافظه کارانه فرض می شود که  $\epsilon_{cu}=0.003$  باشد [۱۷].

استفاده کردند. در این پژوهش سعی شده که از نتایج موجود در تحلیل مکانیک شکست بر روی قطعه ی تراورس با اندازه ی واقعی شامل پارامترهای اصلی شکست: مانند نمودار بار-تغییر مکان، رشد ترک و بازشدگی دهانه ی ترک به منظور تخمین میزان کاهش مقاومت تراورس در برابر ایجاد ترک و ناپایداری شدن ترک (شکست نهایی) استفاده و حساسیت باربری قطعه به وجود پیش ترک در مبانی تئوری و آزمایشگاهی طراحی مقاومت مصالح تراورس دیده شود [۱۶]. در واقع با طرح مکانیک شکستی با فرض وجود پیش ترک نتایج تئوری مقاومت مصالحی تراورس بتنی پیش تنیده به چالش کشیده می شود. مطالعات و تحقیقات مختلفی در زمینه ی تحلیل مکانیک شکست بتن مسلح در سال های اخیر انجام شده اما در مورد تحلیل مکانیک شکست در حوزه ی بتن پیش تنیده مطالعات کم بوده است. بنابراین در این تحقیق سعی شده که تحلیل عددی مکانیک شکست بر روی یک قطعه ی با اندازه ی واقعی انجام شود. مدلی با کمترین تغییرات هندسی نسبت به تولید تراورس در کارخانه های ایران، ایجاد شده است. در این مقاله، پارامترهای اصلی مکانیک شکست یک تراورس بتنی پیش تنیده ی شکاف دار، مانند نمودار بار-تغییر مکان، بار خرابی، انرژی شکست و در نهایت  $K_{Ic}$  محاسبه می شود.

## ۲- مدل عددی تراورس بتنی پیش تنیده

برای مدل سازی عددی و تحلیلی از نرم افزار ABAQUS/CAE 6.12.1 استفاده شده است. در ایجاد هندسه ی مدل سعی شده است که تا حد امکان مدل با حداقل تغییرات نسبت به واقعیت ساخته شود. ابعاد و اندازه ها بر اساس نمونه های ساخته شده در کارخانه تراورس سازی ایران، به نرم افزار معرفی شده اند. در شکل ۱ هندسه ی تراورس بتنی پیش تنیده ی خطوط سنگین سریع السیر نشان داده شده است.



شکل ۱- تراورس بتنی پیش تنیده خطوط سنگین سریع السیر

هیلبورگ<sup>۳</sup> و همکاران، در سال ۱۹۷۶، رابطه‌ی (۲) را برای محاسبه‌ی  $l_{ch}$  در مقاله‌ی خود ارائه کردند [۲۰].

$$l_{ch} = \frac{E_c G_F}{f_t^2} \quad (2)$$

پارامتر  $G_F$  انرژی شکست بر حسب نیوتن بر متر است. کلاییر و کاراتون برای تعیین مقدار  $G_F$  رابطه‌ی (۳) را پیشنهاد داده‌اند [۱۹].

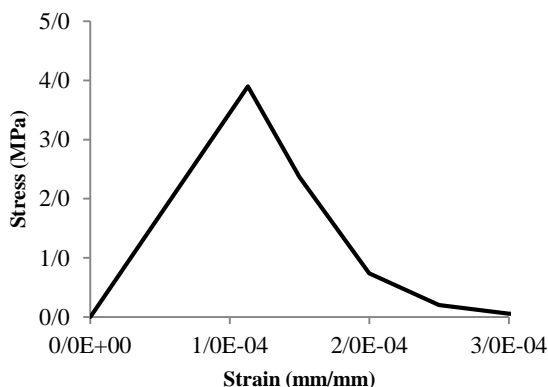
$$G_F = (0.0469d_{max}^2 - 0.5d_{max} + 26) \left( \frac{f_c}{f_{cmo}} \right)^{0.7} \quad (3)$$

در این رابطه مقدار  $f_{cmo} = 10(MPa)$  می‌باشد. پارامتر  $d_{max}$  حداکثر اندازه‌ی سنگدانه‌ها می‌باشد. برای دانه‌بندی استاندارد سنگدانه‌های درشت در تولید بتن تراورس، مقدار  $d_{max}$  برابر ۲۵ mm است. بنابراین مقدار  $G_F$  برابر  $148(N/M)$  محاسبه می‌شود. از روابط کلاییر<sup>۴</sup> و کاراتن<sup>۵</sup> (سال ۲۰۰۵)، نمودار تنش-کرنش بتن تحت کشش به صورت زیر خواهد بود [۱۹].

$$\sigma_t(\varepsilon) = E_c \varepsilon \quad \varepsilon \leq \varepsilon_0 \quad (4)$$

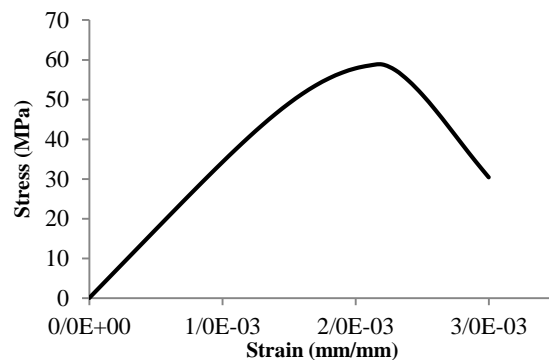
$$\varepsilon > \varepsilon_0 \quad \sigma_t(\varepsilon) = f_t \left[ 2e^{-a(\varepsilon-\varepsilon_0)} - e^{-2a(\varepsilon-\varepsilon_0)} \right] \quad (5)$$

بدین ترتیب نمودارهای تنش-کرنش بتن تحت کشش و نمودار کرنش-پارامتر خرابی بتن تحت کشش به ترتیب در شکل‌های ۳ و ۴ دیده می‌شوند.



شکل ۳- نمودار تنش-کرنش بتن تحت کشش

در این پژوهش برای رسم نمودار تنش-کرنش بتن از رابطه‌ی تنش-کرنش برای در نظر گرفتن رفتار بتن‌های با مقاومت بالا که توسط تورنفلدت و همکاران در سال ۱۹۸۷ ارائه شد، استفاده شده است [۱۸]:



شکل ۲- منحنی تنش کرنش بتن  $f_c' = 58.84(MPa)$

### ۲-۱-۳- منحنی تنش-کرنش بتن تحت کشش

منحنی تنش-کرنش بتن تحت کشش را تا حد تنش کششی حداکثر، می‌توان با یک خط مستقیم با شیب  $E_c$  و تا تنش  $f_t$  تقریب زد [۱۹].

برای نشان دادن گسترش سطح خرابی تحت کشش در بتن، باید مقادیر عددی پارامتر خرابی<sup>۱</sup> به‌ازای کرنش‌های مختلف به نرم‌افزار معرفی گردد. در این مقاله، خرابی حاصل در بتن و ترک‌های ایجاد شده تنها ناشی از کرنش‌های کششی فرض شده‌است و از معرفی پارامتر خرابی در فشار به‌علت تأثیر کم در تشکیل ترک‌ها صرف نظر شده‌است. کلاییر و کاراتن در مقاله‌ی خود از رابطه‌ی (۱) برای محاسبه‌ی پارامتر خرابی در کشش،  $d_t$ ، استفاده کرده‌اند [۱۹].

$$d_t = 1 - \sqrt{\left( \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right) \left[ 2e^{-a(\varepsilon-\varepsilon_0)} - e^{-2a(\varepsilon-\varepsilon_0)} \right]} \quad (1)$$

$$a = \frac{3}{\varepsilon_0 \left[ \frac{2E_c G_F}{l_{ch} f_t^2} - 1 \right]} \geq 0.0$$

پارامتر  $l_{ch}$  طول مشخصه<sup>۲</sup> نام دارد. این پارامتر یک ثابت هندسی است و معیاری برای تعریف طول منطقه‌ی شکست می‌باشد.

<sup>۴</sup> Calayir

<sup>۵</sup> Karaton

<sup>۱</sup> Damage Parameter

<sup>۲</sup> Characteristic Length

<sup>۳</sup> Hillerborg

## ۲-۲- بارگذاری و شرایط مرزی

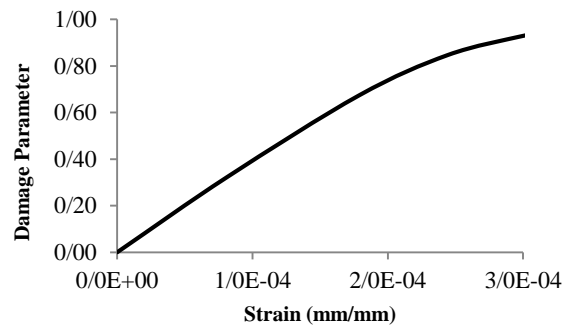
اعمال بارگذاری و شرایط تکیه گاهی بر مدل باید به گونه ای باشد که شرایط واقعی بارگذاری و تولید را برای مدل فراهم نماید. در این مطالعه، برای تراورس بتنی پیش تنیده باید شرایط تکیه گاهی، اعمال نیروی پیش تنیدگی و اعمال بار سه نقطه ای خمشی مثبت نشیمن گاه ریل در نظر گرفته شود. شرایط مرزی و بارگذاری در تراورس دونیمه شده باید شرایطی ایجاد کند تا مدل به شرایط سه بعدی و کامل نزدیک باشد.

## ۲-۲-۱- شرایط تکیه گاهی

در اعمال شرایط تکیه گاهی، مدل باید به گونه ای مقید شود که امکان تغییر شکل در اثر بارگذاری وجود داشته باشد. در مرحله ی اعمال نیروی پیش تنیدگی، با توجه به ایجاد تغییر شکل در راستای محور طولی و محور قائم تراورس بتنی، جابجایی در صفحه ی YZ باید آزاد باشد. در این مرحله، با محدود کردن جابجایی وسط تراورس در راستای افقی (U1)، قائم (U2) و عرضی (U3) و نیز اعمال شرایط تقارن نسبت به صفحه ی YZ، شرایط مورد نظر ایجاد می گردد (شکل ۶ الف). در مرحله ی اعمال بار جابجایی وسط تراورس آزاد شده و صرفاً شرایط تقارن نسبت به صفحه YZ برای تراورس اعمال شده است، همانطور که در شکل ۶ ب دیده می شود. همچنین در مرحله ی اعمال بار، به منظور شبیه سازی آزمایش لنگر مثبت نشیمن گاه طبق استاندارد EN13230-2:2002 [۲۲] دو تکیه گاه صلب در زیر نشیمن گاه ریل با آزادی دوران حول محور X و به فاصله ۳۰۰ mm از محل بار محوری چرخ مدل سازی شده است.

## ۲-۲-۲- اعمال نیروی پیش تنیدگی

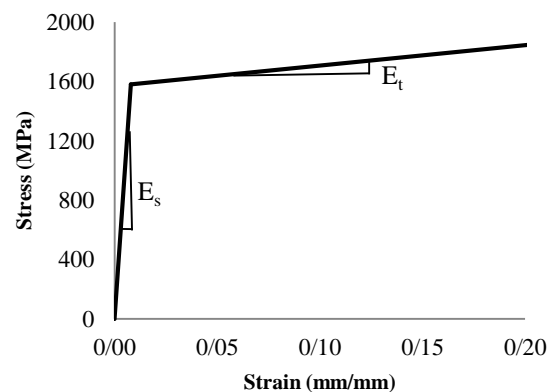
در خط تولید تراورس های بتنی پیش تنیده، قبل از بتن ریزی، هرکدام از استرندهای آماده شده تا 68.5 kN توسط دستگاه جک کشیده می شوند. این نیرو به عنوان حداقل تعیین می گردد و نیروی اعمالی نباید از این مقدار کمتر باشد. پس از عملیات رهاسازی استرندها، نیروی اعمال شده به صورت فشاری در مقطع باقی مانده و موجب افزایش ظرفیت خمشی آن می گردد. بدین ترتیب افزایش طول استرندها در اثر نیروی اولیه،  $P_F$ ، به صورت رابطه (۶) تعریف می شود.



شکل ۴- نمودار کرنش- پارامتر خرابی بتن تحت تنش کششی

## ۲-۱-۴- مشخصات فولاد استرندهای طولی

از استاندارد DIN-4227 آلمان و استانداردهای ASTM-A421، ASTM-A416 و ASTM-A722 می توان برای استرندهای با مقاومت زیاد برای پیش تنیدگی استفاده نمود. استرند مصرفی طولی برای ساختن تراورس های بتنی پیش تنیده از نوع Gr.270 به قطر ۹/۵۳mm است. برای این استرند مقدار تنش تسلیم،  $f_y$  برابر با ۱۵۸۰ MPa و حد کشش مجاز ۱۸۵۵ MPa می باشد. برای سهولت در محاسبات، نمودار واقعی تنش-کرنش فولاد را می توان به صورت دوخطی، همانند شکل ۵ فرض کرد. نمودار تنش-کرنش فولاد در کشش و فشار یکسان در نظر گرفته می شود. دیگر مشخصات مکانیکی فولاد استرندهای طولی در جدول ۱ آمده است [۲۱].

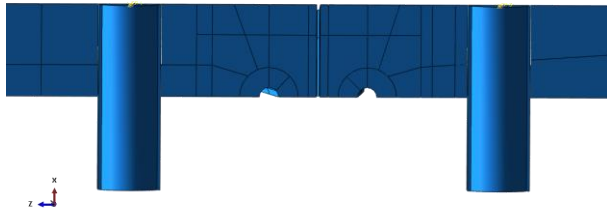


شکل ۵- نمودار تنش-کرنش فولاد همراه با سخت شوندگی خطی

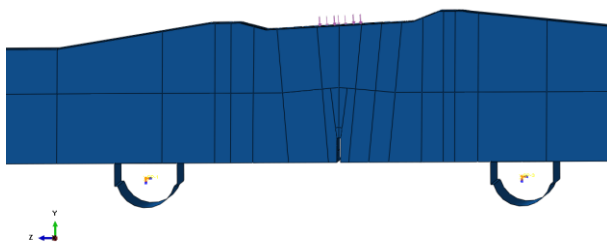
جدول ۱- مشخصات مکانیکی فولاد استرندهای طولی

چگالی	$\nu$	$f_y$	$E_t$	$E_s$
۷۸۵۰	۰/۳	۱۶۳۹	۲۰۰۰	۲۰۰۰۰۰
		MPa	MPa	MPa

نشیمن گاه ریل، با ایجاد یک ترک اولیه در وسط دهانه‌ی آزمایش تراورس، مدل عددی نمونه آماده می‌شود. در شکل ۷، ترک اولیه به طول ۴۰ mm نشان داده شده‌است.



الف. نمای XZ.



ب. نمای YZ.

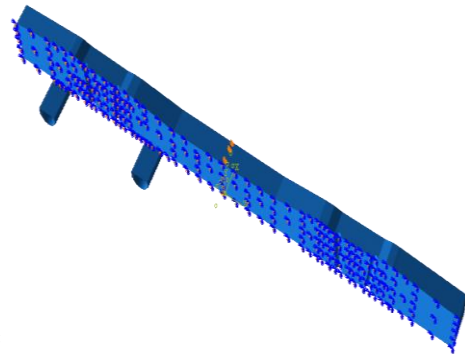
شکل ۷- مدل بارگذاری سه‌بعدی تراورس بتنی پیش‌تنیده با ترک اولیه ۴۰ mm در نماهای مختلف

جدول ۲- مشخصات نیروی پیش‌تنیدگی استرندها

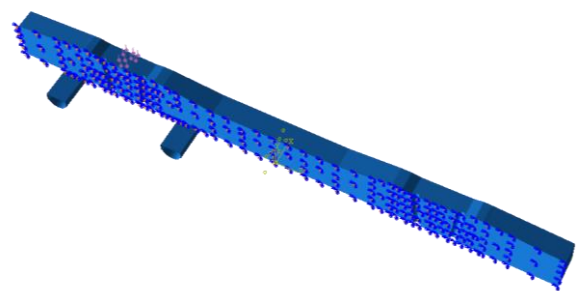
تغییر شکل معادل	کرنش معادل	تنش معادل
پیش‌تنیدگی	پیش‌تنیدگی	پیش‌تنیدگی
۹/۳۶ mm	۰/۰۰۳۶	۷۲۰ MPa

#### ۲-۴- شبکه‌بندی<sup>۱</sup> مدل

شبکه‌بندی مدل اصلی‌ترین قسمت هر روش اجزای محدود است که عمده‌ی هزینه، زمان و حجم کار را به‌خود اختصاص می‌دهد. شبکه‌بندی مناسب به‌نوعی تضمین‌کننده دقت جواب و نه صحت آن است، به این معنی که اگر شبکه‌بندی به‌صورت اصولی و با رعایت نکات ضروری انجام شود، دقت کار، تضمین شده خواهد بود. برای شبکه‌بندی مدل از اجزای مکعبی و مربعی که از لحاظ شکل مناسب هستند، استفاده شده‌است. اجزا علاوه بر شکل باید از لحاظ اندازه نیز بررسی شوند. برای این منظور مطالعه‌ی شبکه‌بندی<sup>۲</sup>



الف. شرایط تکیه‌گاهی مرحله‌ی پیش‌تنیدگی



ب. شرایط تکیه‌گاهی مرحله‌ی بار خمشی سه‌نقطه‌ای شکل ۶- پنجره‌هایی ویرایش شرایط مرزی

$$\Delta L_{sf} = \Delta L_c + \Delta L_s \quad (6)$$

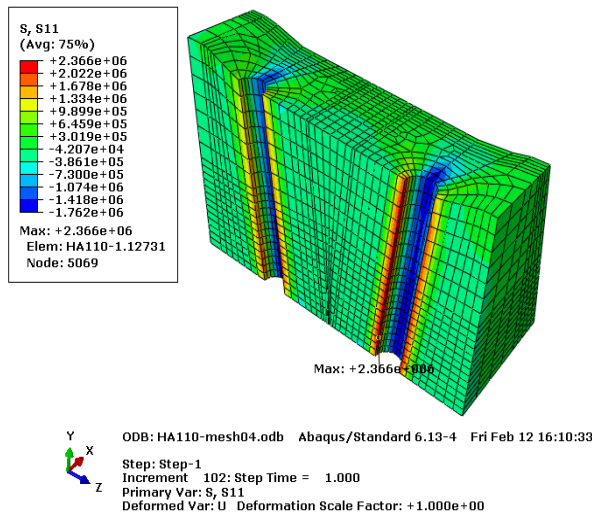
جایی که  $\Delta L_{sf}$ ، افزایش طول استرندها در اثر نیروی اولیه،  $P_F$ ، که در ابتدا باید وارد شود،  $\Delta L_c$ ، کاهش طول عضو بتنی در اثر نیروی اولیه،  $P_F$ ،  $\Delta L_s$ ، کاهش طول استرندها در اثر نیروی اولیه،  $P_F$ ، با توجه به روابط فوق و محاسبات انجام شده کافی است در استرندهای پیش‌تنیدگی مشخصات جدول ۲ اعمال شود تا نیروی پیش‌تنیدگی مطلوب حاصل آید.

#### ۲-۳- اعمال بار خمشی سه‌نقطه‌ای مثبت در محل نشیمن گاه ریل

شرایط بارگذاری برای اندازه‌گیری پارامترهای مکانیک شکست در سازه‌هایی که رفتار تیر دارند به‌صورت بارگذاری سه‌نقطه‌ای خمشی است. در این مرحله و با بارگذاری سه‌نقطه‌ای خمشی مثبت نشیمن گاه ریل، مشابه با آزمایش لنگر مثبت تراورس در محل

<sup>2</sup> Mesh Study

<sup>1</sup> Meshing



شکل ۹- کانتور تنش اصلی حداکثر ناشی از اعمال پیش تنیدگی در محل شکاف تراورس برای عضو بتنی متشکل از ۶۰۴۰ جزء

## ۲-۵- مدل بتن آسیب دیده پلاستیک

در این تحلیل، به علت بارگذاری ثابت در حالت پیش تنیدگی و نوع بارگذاری سه نقطه ای خمشی تحلیل استاتیکی استفاده است. همچنین تحلیل مکانیک شکست است با مدل خرابی پلاستیک به صورت رفتار غیرخطی در این پژوهش انجام شده است. تحلیل مکانیک شکست در این پژوهش با استفاده از تئوری غیرخطی مکانیک شکست (NLFM)<sup>۱</sup> انجام شده است.

این مدل در محیط های آباکوس صریح<sup>۲</sup> و آباکوس استاندارد<sup>۳</sup> برای مدل کردن بتن و دیگر مواد شبه شکننده در انواع سازه ها (تیر، خرپا، پوسته و اجسام توپر) تعبیه شده است. این مدل از مفهوم آسیب دیدگی همسانگرد در محدوده ی خطی و با ترکیب کشش ایزوتروپ و فشار پلاستیک جهت نمایش رفتار غیرخطی بتن استفاده می شود. همچنین این مدل قادر به مدل سازی شرایط بارگذاری دلخواه، مانند بارگذاری چرخه ای، بوده و کاهش سختی الاستیک با در نظر گرفتن کرنش پلاستیک هم در کشش و هم در فشار قابل استفاده است. مدل معرفی شده برای بتن در حالت آسیب دیده یک مدل پیوسته بر اساس رفتار پلاستیک بوده و دو مکانیزم اصلی خرابی در این مدل ترک های ناشی از کشش و خردشدگی در قسمت فشاری می باشد.

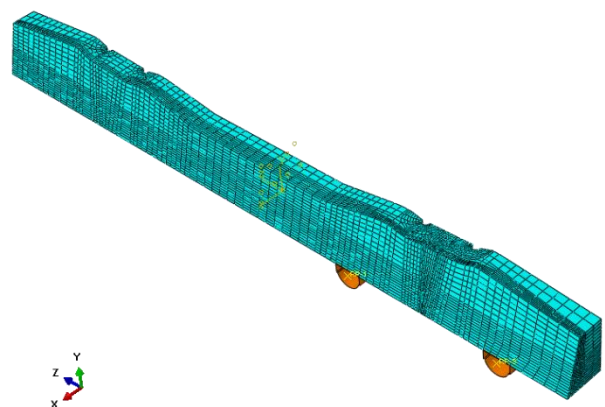
یا بررسی همگرایی جواب ها برای مدل تراورس بتنی پیش تنیده صورت پذیرفته است، که یک مسئله ی حیاتی در تضمین دقت جواب ها می باشد.

مطابق این روش برای مدل بدون ترک با تعداد اجزای ۶۹۱۶، ۹۱۱۴، ۱۴۰۲۶، ۱۹۶۰۴ و ۲۲۱۱۰ جواب های تنش کششی در محل نشیمن گاه ریل بررسی شده اند و نتایج آن در جدول ۳ آمده است. همانطور که مشاهده می شود برای مدل با نام Mesh04 نتایج همگرا گردیده است، لذا تعداد اجزای مناسب برای تحلیل مدل ۱۹۶۰۴ می باشد، چرا که در این حالت زمان حل مسئله کمتر از حالتی است که تعداد اجزا بیشتر باشد. در شکل ۸، مدل شبکه بندی شده ۱۹۶۰۴ جز نشان داده شده است و در شکل ۹ کانتور توزیع تنش اصلی حداکثر در محل شکاف تراورس برای مدل نشان داده شده است، در این شکل تنها قسمت مربوط به شکاف تراورس استخراج شده است.

جدول ۳- روند همگرایی تنش اصلی حداکثر ناشی از اعمال

پیش تنیدگی در محل نشیمن گاه ریل

نام مدل	تعداد اجزا	پارامتر سنجش (MPa)	ملاحظات
Mesh01	۶۹۱۶	۱/۷۶۷	-
Mesh02	۹۱۱۴	۲/۰۷۵	-
Mesh03	۱۴۰۲۶	۲/۲۹۵	-
Mesh04	۱۹۶۰۴	۲/۳۶۶	ناحیه همگرایی
Mesh05	۲۲۱۱۰	۲/۳۶۷	ناحیه همگرایی



شکل ۸- شبکه بندی مدل تراورس بتنی پیش تنیده با ۱۹۶۰۴ جزء.

<sup>3</sup> ABAQUS/Standard

<sup>1</sup> Non-Linear Fracture Mechanics

<sup>2</sup> ABAQUS/Explicit

## ۳- نتایج

۳-۱- ضریب شدت تنش بحرانی  $K_{IC}$ 

## ۳-۱-۱- روابط پارامترهای تحلیل مکانیک شکست

در طول فرآیند تولید و آماده‌سازی بتن پیش‌تنیده، مثل کشیدن و رها کردن استرندها و عمل‌آوری بتن، شرایط برای ایجاد ترک اولیه در نمونه‌ی بتن پیش‌تنیده فراهم می‌شود، همچنین تنش فشاری که استرندها در ناحیه‌ی کششی بتن پیش‌تنیده ایجاد می‌کنند، تابع سرعت رشد ترک در نمونه را با تأخیر روبرو کرده و شرایط رشد ترک را تغییر می‌دهند و عملاً باعث افزایش ظرفیت قطعه نمونه می‌شوند. همزمان با افزایش بار، ضریب شدت تنش در نوک ترک با توجه به تمرکز تنش به تدریج افزایش می‌یابد و زمانی که  $K_{IC}^{ini}$  مقدار ضریب شدت تنش اولیه در بتن پیش‌تنیده با مقدار ضریب شدت تنش بحرانی تولید شده توسط استرندها و بار در نوک ترک ( $K_{IS}$ ,  $K_{IP}$ ) برابر شود، نمونه‌ی بتن پیش‌تنیده در امتداد ترک اولیه شروع به ترک خوردن می‌کند. علاوه بر این در نمونه‌های بتنی باید اثر ناحیه‌ی صدمه دیده‌ی نوک ترک در نظر گرفته شود. این اثر با استفاده از چسبندگی یا ترک مجازی در مدل گنجانده می‌شود. بنابراین ضریب شدت تنش تولید شده به واسطه‌ی چسبندگی،  $K_I^C$  به ضریب شدت تنش‌های قبلی، یعنی ضریب شدت تنش تولیدی توسط استرندها و بار در نوک ترک، اضافه می‌شود.

زمانی که ضریب شدت تنش شامل اثرات: استرندها، بارگذاری و چسبندگی در نوک ترک باشد، به‌عنوان ضریب شدت تنش ناپایدار ترک،  $K_{IC}^{un}$  شناخته می‌شود که با رسیدن ضریب شدت تنش به این مقدار، ترک در امتداد ترک اولیه شروع به ترک خوردن می‌کند. بنابراین، زمانی که خرابی در بتن مسلح شروع و گسترش می‌یابد، ضریب شدت تنش خالص می‌تواند مطابق روابط ۷ و ۸ باشد [۲۳]:

$$K_I^{ini} = K_{IP}^{ini} + K_{IS}^{ini} \quad (۷)$$

$$K_I^{un} = K_{IP}^{un} + K_{IS}^{un} \quad (۸)$$

با فرض عدم لغزش بین بتن و استرندها، به‌منظور محاسبه ضریب شدت تنش ناشی از بارگذاری در نوک ترک، در زمانی که ترک ناپایدار می‌شود، روابط زیر نتیجه می‌شود:

$$K_{IP}^{ini} = \frac{1.5(p^{ini} + \frac{mg}{2} \times 10^{-2}) \times 10^{-3} s a_0^{1/2}}{t h^2} f(\alpha) \quad (۹)$$

$$f(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}}, \quad \alpha = \frac{a_0}{h} \quad (۱۰)$$

$$K_{IP}^{un} = \frac{1.5(p^{un} + \frac{mg}{2} \times 10^{-2}) \times 10^{-3} s a_c^{1/2}}{t h^2} f(\alpha) \quad (۱۱)$$

$$f(\alpha) = \frac{1.99 - \alpha(1-\alpha)(2.15 - 3.93\alpha + 2.7\alpha^2)}{(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}}, \quad \alpha = \frac{a_c}{h} \quad (۱۲)$$

در روابط بالا،  $m$  کیفیت بتن بین تکیه‌گاه‌های نمونه (که براساس نسبت تعیین  $s/l$  می‌شود)،  $s$  عرض دهانه مابین تکیه‌گاه‌ها و  $l$  طول کل نمونه است. زمانی که ترک در بتن ایجاد می‌شود، مقدار ضریب شدت تنش ناشی از استرندها برابر خواهد بود با:

$$K_{IS}^{ini} = \frac{2F_s^{ini}}{b\sqrt{\pi a_0}} F\left(\frac{c}{a_0}, \frac{a_0}{h}\right), F_s^{ini} = E_s \varepsilon_s^{ini} A_0 \quad (۱۳)$$

در روابط بالا،  $A_0$  سطح مقطع استرندها است.  $\xi = \frac{a_0}{h}$ ،  $\eta = \frac{c}{a_0}$  و  $F_s^{ini}$  پاسخ نیروی پیش‌تیدگی است در زمانی که ترک در بتن شروع می‌شود،  $c$  فاصله‌ی مرکز استرندها تا انتهای نمونه و  $a_0$  طول ترک اولیه است. همچنین با فرض عدم لغزش بتن و استرندها برای ضریب شدت تنش ناشی از استرندها در نوک ترک برای بتن در زمانی که ترک ناپایدار می‌شود، خواهیم داشت:

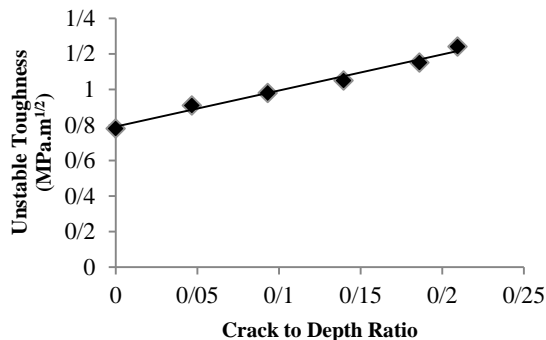
$$F(\eta, \xi) = \frac{3.52(1-\eta)}{(1-\xi)^{3/2}} - \frac{4.35 - 5.28\eta}{(1-\xi)^{1/2}} + \left[ \frac{1.30 - 0.30\eta^{3/2}}{(1-\eta^2)^{1/2}} + 0.83 - 1.76\eta \right] \times [1 - (1-\eta)\xi] \quad (۱۴)$$

$$K_{IS}^{un} = -\frac{2F_s^{un}}{b\sqrt{\pi a_c}} F_1\left(\frac{c}{a_c}, \frac{a_c}{h}\right) \quad (۱۵)$$

$$F_1(\eta_1, \xi_1) = \frac{3.52(1-\eta_1)}{(1-\xi_1)^{3/2}} - \frac{4.35 - 5.28\eta_1}{(1-\xi_1)^{1/2}} + \left[ \frac{1.30 - 0.30\eta_1^{3/2}}{(1-\eta_1^2)^{1/2}} + 0.83 - 1.76\eta_1 \right] \times [1 - (1-\eta_1)\xi_1] \quad (۱۶)$$



که از شکل کاملاً مشخص است با افزایش نسبت طول ترک به ارتفاع مقطع، هر دو مقدار ضریب شدت تنش به صورت خطی افزایش می یابند، برخلاف بتن ساده که مقدار ضریب شدت تنش به طول ترک وابسته نیست.



شکل ۱۱- تغییرات ضریب شدت تنش نهایی با نسبت پیش ترک به ارتفاع کل مقطع

### ۲-۳- نمودار بار - تغییر مکان

از دیگر پارامترهای مهم در تحلیل مکانیک شکست قطعات، بار خرابی و انرژی شکست است که می توان آن ها را از نمودار بار- تغییر مکان برداشت کرد. در این تحقیق نمودار بار-تغییر مکان برای ۶ مدل تراورس بتنی پیش تنیده شکاف دار در نقطه شکاف محاسبه شده و در شکل ۱۲ نمایش داده شده است.

با توجه به اینکه نمودار بار-تغییر مکان از خروجی های بسیار مهم در علم مقاومت مصالح و علم مکانیک شکست است، محدوده ی رفتار خطی و غیرخطی اجزا، همچنین بار خرابی و رفتارهای دیگر در این تحقیق به خوبی نشان داده شده است. با افزایش طول شکاف اولیه تراورس از مقاومت قطعه کاسته می شود، همان طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در شکل ۱۳ نمودار تغییرات بار نهایی مدل ها به نسبت پیش ترک های اولیه به ارتفاع کل تراورس نشان داده شده است. یکی از پارامترهای مهم در تحلیل قطعات باربر و مواد تشکیل دهنده ی آن ها بار نهایی است. منظور از بار نهایی، باری است که قطعه تا لحظه ی شکست تحمل می کند. این پارامتر در طراحی قطعات و تعیین ضریب اطمینان مورد استفاده قرار می گیرد.

در روابط بالا،  $\eta_1 = \frac{c}{a_c}$ ،  $\xi_1 = \frac{a_c}{h}$  و  $F_s^{um}$  پاسخ نیروی مسلح شده زمانی که ترک در بتن ناپایدار شده و  $a_c$  طول ترک بحرانی است. همچنین برای ناحیه ی پلاستیک خواهیم داشت:

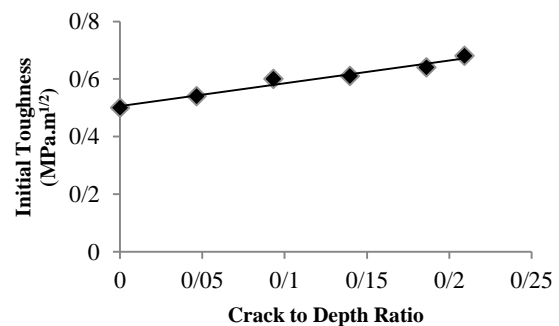
$$F_s^{um} = \sigma_s^{um} A_0 = f_y A_0 \quad (17)$$

و برای ناحیه ی الاستیک:

$$F_s^{um} = \sigma_s^{um} A_0 = E_s \varepsilon_s^{um} A_0 \quad (18)$$

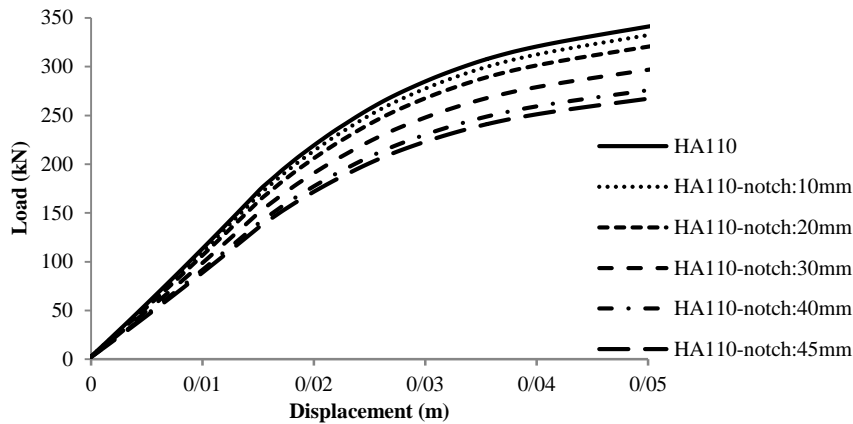
### ۳-۱-۲- تعیین ضریب شدت تنش

در اندازه گیری ضریب شدت تنش از ۶ مدل تراورس بتنی پیش تنیده با مشخصات نشان داده شده در شکل ۱، که تحت بارگذاری سه نقطه ای خمشی قرار گرفتند، استفاده شده است. نمونه ها تمامی مشخصاتشان یکسان، شبکه بندی یکسان و تنها طول پیش ترک در آن ها متفاوت است. طول پیش ترک در نمونه ها از ۰/۰ mm تا ۴۰ mm با گام افزایش ۱۰ mm و طول شکاف ۴۵ mm است. براساس روابط بیان شده در بخش قبلی، ضریب شدت تنش اولیه  $K_I^{ini}$  و ضریب شدت تنش ناپایداری  $K_I^{um}$  برای نسبت پیش ترک های اولیه به ارتفاع کل تراورس اندازه گیری و به ترتیب در شکل های ۱۰ و ۱۱ دیده می شوند.



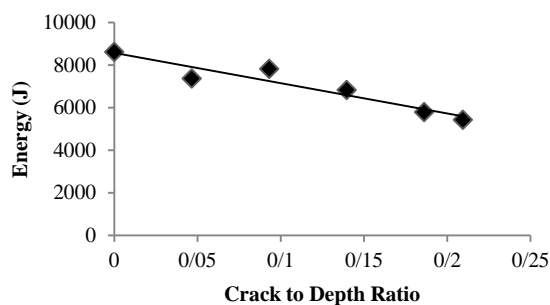
شکل ۱۰- تغییرات ضریب شدت تنش اولیه با نسبت پیش ترک به ارتفاع کل مقطع

در شکل های ۱۰ و ۱۱ ضریب شدت تنش اولیه و ضریب شدت تنش ناپایداری در تراورس بتنی پیش تنیده با ۶ مقدار مختلف نسبت طول ترک اولیه به ارتفاع کل مقطع محاسبه شده است. همان طور



شکل ۱۲- نمودار بار-تغییر مکان مدل‌های عددی تراورس بتنی پیش‌تنیده با طول شکاف‌های متفاوت

سازه یا قطعه در برابر بارهای خارجی است. با افزایش انرژی شکست، سازه‌ها شرایط بهتری با باربری یکسان از خود نشان می‌دهند.



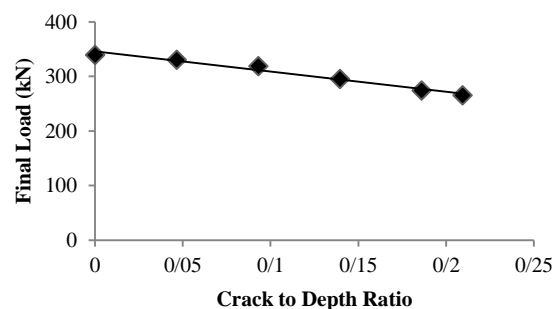
شکل ۱۴- تغییرات انرژی قطعه با نسبت پیش‌ترک به ارتفاع کل مقطع

بدیهی است که با افزایش نسبت طول پیش‌ترک به ارتفاع کل مقطع انرژی یا سطح زیر نمودار کاهش می‌یابد. در مورد تابع این تغییرات نیز با توجه به نمودار شکل ۱۴، می‌توان گفت که تقریباً به صورت خطی است. با ۲۵ درصد رشد ترک نسبت به ارتفاع کل مقطع در محل نشیمن‌گاه مساحت زیر نمودار به اندازه‌ی ۳۷ درصد کاهش می‌یابد. این تغییر به علت تابع غیرخطی نمودار نیرو-تغییر مکان است.

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

اندازه‌گیری پارامترهای مکانیک شکست در مواد و قطعات مختلف از بحث‌های بسیار مهم در طراحی‌های مهندسی روز دنیا به‌شمار می‌آید، در این پژوهش بر اساس مبانی موجود در علم مکانیک شکست تلاش شده تا پارامترهای اصلی مکانیک شکست

در شکل ۱۳ تغییرات بار نهایی قطعه تا لحظه‌ی خرابی نهایی در مقابل نسبت طول پیش‌ترک به ارتفاع کل مقطع در محل نشیمن‌گاه ریل نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل نیز مشخص است، با افزایش طول پیش‌ترک و به‌نوبه‌ی آن نسبت طول پیش‌ترک به ارتفاع کل مقطع بار نهایی که قطعه تحمل می‌کند کاهش می‌یابد. نکات مهمی که در این نمودار به چشم می‌خورد تغییرات کاهشی این نمودار به صورت تقریباً خطی است و با نرخ کمی افتاد. در واقع تغییرات بار نهایی به مقدار کمی وابسته به نسبت طول پیش‌ترک به ارتفاع کل مقطع است. با ۲۵ درصد رشد ترک نسبت به ارتفاع کل مقطع در محل نشیمن‌گاه بار نهایی شکست به اندازه‌ی ۲۲ درصد کاهش می‌یابد.



شکل ۱۳- تغییرات بار نهایی با نسبت پیش‌ترک به ارتفاع کل مقطع

در شکل ۱۴ نمودار انرژی تراورس‌های شکاف‌دار به نسبت پیش‌ترک‌های اولیه به ارتفاع کل تراورس نشان داده شده است. انرژی شکست نیز پارامتر مهم دیگری است که در تحلیل مکانیک شکست قطعات و سازه‌ها کاربرد زیادی دارد. در واقع انرژی یک قطعه نشان‌گر میزان باربری و میرایی و مقاومت آن

Engineering, Chalmers University of Technology, Licentiate of Engineering, Sweden.

[6] Anthony, J. and Wolanski, B. S. 2004. "Flexural Behavior of Reinforced and Pre-stressed 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.

[7] Kaewunruen, S. and Remennikov, A. M. 2006. "Nonlinear Finite Element Modeling of Railway Pre-stressed Concrete Sleeper". Proceedings of the 10th East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction (EASEC-10), Bangkok, Thailand, August, pp. 3-5.

[8] Kaewunruen, S. and Remennikov, A. M. 2007. "Experimental and Numerical Studies of Railway Pre-stressed Concrete Sleepers under Static and Impact Loads". Asian Institute of Technology, Civ. Comput. 3, 25-28.

[9] Rezaei, F., Shiri, M. R. and Farnam, S. M. 2012. "Experimental and Numerical Studies of Longitudinal Crack Control for Pre-stressed Concrete Sleepers". Engineering Failure Analysis. 26, 21-30.

[10] Tung, N. D. and Tue, N. V. 2016. "A Fracture Mechanics-Based Approach to Modeling the Confinement Effect in Reinforced Concrete Columns". [11] Eftekhari, M. and Mohammadi, S. 2016. "Multiscale Dynamic Fracture Behavior of the Carbon Nanotube Reinforced Concrete under Impact Loading". International Journal of Impact Engineering, Volume 87, Pages 55-64.

[12] Yu, K., Yu, J. and Lu, Z. 2014. "Determination of Residual Fracture Parameters of Post-Fire Normal Strength Concrete Up to 600 °C Using an Energy Approach". Construction and Building Materials, Volume 73, Pages 610-617.

[13] Azad, A., Mirza, M. and Chan, P. 1989. "Fracture Energy of Weakly Reinforced Concrete Beams". Fatigue Fracture Engineering Materials Structures. 12, 9-18.

[14] Ruiz, G., Elices, M. and Planas, J. 1998. "Experimental Study of Fracture of Lightly Reinforced Concrete Beams". Materials and Structures. 31, 683-691.

[15] Ferro, G., Carpinteri, A. and Ventura, G. 2007. "Minimum Reinforcement in Concrete Structures and Material Structural Instability". International Journal Fracture, 146, 213-231.

[16] 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.

تراورس بتنی پیش تنیده تعیین شود. نتایج در ارتباط با ضریب شدت تنش ناپایداری  $K_{IC}^{III}$  و ضریب شدت تنش اولیه  $K_{IC}^{ini}$  بیانگر افزایش ضریب شدت تنش با افزایش نسبت طول ترک به ارتفاع کل مقطع است، که این موضوع برخلاف بتن ساده است. در بتن ساده، ضریب شدت تنش وابسته به مقدار طول ترک نیست. در بخش دوم این تحلیل عددی نتایج و خروجی‌های نمودار بار-تغییر مکان اندازه‌گیری شده است. علاوه بر نمودار تغییر مکان که تغییراتی مشابه با توابع چند جمله‌ای دارد، بار نهایی شکست و انرژی شکست محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات این دو تابع، یعنی بار حداکثر و انرژی شکست تقریباً خطی است. تغییرات انرژی شکست در مقایسه با بار شکست نسبت به طول پیش ترک بیشتر است. در واقع انرژی شکست با نرخ سریع‌تری نسبت به بار نهایی شکست با طول ترک افت می‌کند.

## ۵- سپاس‌گذاری

نویسندگان این مقاله از "کارخانه بتون صنعت بریس" برای حمایت از این پژوهش تشکر می‌کنند.

## ۶- مراجع

[1] Li, S. 2012. "Railway Sleeper Modelling with Deterministic and Non-deterministic Support Conditions". A thesis submitted to the Department of Transport Science, School of Architecture and the Built Environment, Royal Institute of Technology, Stockholm.

[2] Kumar, V. and Rastogi, V. 2009. "Investigation of Vertical Dynamic Behavior and Modelling of a Typical Indian Rail Road Vehicle through Bond Graph". World Journal of Modelling and Simulation. Vol. 5, No. 2, pp. 130-138. Construction and Building Materials, Volume 102, Part 1, 15, Pages 893-903.

[۳] اسماعیلی، مرتضی؛ معماری، مینا و خطیب، فاطمه (۱۳۹۴).

مطالعه ارتباط مدول استاتیک و دینامیک خاکریز راه آهن سریع السیر. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، سال اول، شماره سوم.

[۴] عربانی، مهیار و مقدس نژاد، فریدون (۱۳۸۹). مهندسی راه

آهن. رشت: انتشارات دانشگاه گیلان.

[5] Gustavson, R. 2000. "Static and Dynamic Finite Element Analysis of Concrete Sleepers". A thesis submitted to the Faculty of the Structural

[۱۷] مستوفی نژاد، داوود (۱۳۹۱). سازه‌های بتن آرمه. ویرایش چهارم، ایران: انتشارات ارکان دانش.

[18] Thorenfeldt, E., Tamszemicz, A, Jenson, J .J. 1729. "Mechanical Properties of High Strength Concrete and Application in Design", Proceeding of the Symposium on Utilization of High Strength Concrete.

[19] Clayir, Y. and Karaton, M. 2005. "A Continuum Damage Concrete Model for Earthquake Analysis of Concrete Gravity Dam-Reservoir Systems". Soil Dynamic Earthquake Engineering, 11, 857-869.

[20] Hillerborg, A., Modeer, M. and Peterson, P. E. 1976. "Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Element". Cement and Concrete Research, 6, 773-782.

[21] Mahmood, M. S. and Meysam, R. 2006. "On the Reinforcement of Concrete Sleepers by Composite Materials". Composite Structures, 76, 326-337.

[22] BS EN 13230-2: 2002. "Railway applications - Track - Concrete sleepers and bearers - Part 2: Prestressed monoblock sleepers". RAE/2 Railway Applications.

[23] SL 352-2006, Test code for hydraulic concrete of china. "Water Conservancy and Electric Power Press", 2006.

## Fracture Mechanics Analysis of Pre-stressed Concrete Sleepers by Investigating Effects of Notch Size

S. M. Farnam \*

PhD, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran

F. Rezaie

Associate Professor, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Bu Ali Sina University, Hamadan, Iran

M. Bayat. A

MSc of Civil Engineering-Structurey, Mana Concrete Investigations, Chairman of the board, Hamadan, Iran

### Abstract

By development of the railway networks in Iran, the usage of high speed and also high axle load lines has become more essential than ever. High-speed heavy-haul pre-stressed concrete sleepers are used in railway lines with bearing capacity up to 30 tons and with an allowable speed up to 200 km/hr due to their high performance capability. In this study, it is tried to analyze the fractural behavior of pre-stressed concrete sleepers based on fracture mechanics of concrete. To determine the parameters, a positive three-point bending load is applied to the rail seat of a sleeper with 6 different initial crack (notch) lengths, starting from 0 to 40 mm, with an increasing increment of 10 mm, and also 45 mm. The modelling of high-speed heavy-haul sleeper is done by ABAQUS finite element software. In this paper, some paramount parameters of fracture mechanics for concrete are considered for analyzing and designing e.g. the initial and final stress intensity, load-displacement diagram, final load and the sleeper energy. The results indicate that the fracture parameters of pre-stressed concrete sleeper are different from plain concrete. Unlike plain concrete which the stress intensity factor does not depend on the initial length of the notch, in pre-stressed concrete by increasing the crack length, both of the initial and final stress intensity factors are increased. Also, the results of the time-displacement diagram show that by increasing the crack length, the final load and energy of the pre-stressed concrete sleeper decreases almost linearly. Results represent that by increasing the notch length up to 25%, the area under load-displacement curve decreases up to 37%; while the final load decreases up to 22%.

**Keywords:** Fracture Mechanics, Pre-stressed Concrete Sleeper, Stress Intensity Factor, Crack to Depth Ratio.

---

\* Corresponding Author: Seyed.farnam@yahoo.com

