مدل‌سازی مکانیک شکست گسترش ترک تراورس بتنی پیش‌تنیده در خطوط سنگین پرسرعت

سید محمد فرنام، دانش آموخته دکتری، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

فریدون رضایی، دانشیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان، ایران

مهدی بیات آورزمانی، دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد، واحد ملایر، ایران

E-mail: Seyed.farnam@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۱۵ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۲۰

چکیده

تراورس‌های بتنی پیش‌تنیدهٔ منو بلوک از جمله پرکاربردترین نوع تراورس‌های بتنی در خطوط سنگین پرسرعت هستند. این تراورس‌ها همزمان ظرفیت تحمل بارهای محوری سنگین چرخ و سرعت‌های بالا را دارند. تراورس‌های خطوط سنگین پر سرعت ظرفیت تحمل بار محوری چرخ تا ۳۰ تن دارند و برای سرعت قطار تا ۲۰۰ km/hr قابل استفاده هستند. تراورس خطوط سنگین پرسرعت از جنس بتن پیش‌تنیده است. در این مقاله گسترش ترک مد I در تراورس بتنی پیش‌تنیدهٔ خطوط سنگین پرسرعت به‌وسیلهٔ مکانیک شکست شبیه‌سازی شده‌است. در این پژوهش، از مدل خرابی پلاستیک به‌منظور تحلیل پارامترهای مکانیک شکست در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده شده است. این مدل به بررسی رشد خرابی به صورت غیرخطی در بتن (NLFM) می‌پردازد. مدل عددی تراورس بتنی پیش‌تنیدهٔ شکاف‌دار با ۶ طول شکاف اولیه صفر و ۵ میلی‌متر تا ۴۵ میلی‌متر با گام افزایشی ۱۰ میلی‌متر و عرض شکاف ۸ میلی‌متر تحت لنگر خمشی سه نقطه‌ای مثبت شبیه‌سازی شده است. رشد خرابی، طول ترک و بازشدگی دهانهٔ ترک (CMOD) در این پژوهش محاسبه شده‌است. نتایج شکل خرابی نشان می‌دهند، خرابی از محل شکاف شروع و به‌صورت خرابی خمشی در راستای شکاف اولیه ادامه و سپس دوشاخگی ترک و در نهایت خرابی نهایی رخ می‌دهد. این تحلیل نشان می‌دهد که رفتار سازه‌ای تراورس بتنی پیش‌تنیده به‌وسیلهٔ مدل مکانیک شکست، به‌سادگی با استفاده از رشد خرابی، طول ترک و CMOD قابل پیش‌بینی است.

واژه‌های کلیدی: بازشدگی دهانهٔ ترک، تراورس بتنی پیش‌تنیدهٔ خطوط سنگین پرسرعت، طول ترک، گسترش ترک، مکانیک خرابی

۱. مقدمه

تراورس‌ها از مهم‌ترین اجزای خطوط راه‌آهن هستند که وظیفهٔ آن‌ها دریافت نیروی چرخ‌ها از ریل و انتقال آن به بالاست است. در سازهٔ راه‌آهن، تراورس‌ها نقش مهمی در انتقال نیروهای چرخ به لایهٔ بالاست و در نهایت به زیرسازی مسیر دارند[Manalo et al. 2012; Koh et al. 2016]. مواد و مصالح مختلفی مانند: چوب، فولاد و بتن در تولید تراورس استفاده می‌شود که به ترتیب عمر بهره‌برداری ۲۰، ۵۰ و ۵۰ سال دارند [Ferdous and Manalo, 2014]. امروزه استفاده از تراورس‌های چوبی به‌علت کمبود چوب و بالا رفتن قیمت آن و خورده‌شدن توسط حشرات و قارچ‌ها محدود شده‌است. استفاده از تراورس‌های فولادی نیز به‌علت قیمت بالا محدود شده‌است. استفاده از مصالح بتنی در تراورس‌ها از جنبه‌های مختلف مفید است، مصالح بتنی به‌علت در دسترس بودن، بسیار ارزان‌تر از مصالح فولادی و چوبی هستند. همچنین با بالا رفتن کیفیت تولید بتن، این مصالح در برابر بار و دوام مقاوم می‌شوند. در نتیجه استفاده از تراورس بتنی به‌سرعت در خطوط راه‌آهن در حال افزایش است. در سال‌های اخیر، افزایش نیازهای انتقال کالاها و مسافر در مقایسه با محدودیت ظرفیت ناوگان هوایی و آسیب‌های زیست‌محیطی ناشی از سوخت هواپیما، قطارهای پرسرعت باری را به مطلوب‌ترین سیستم حمل و نقل خطوط سنگین پرسرعت تبدیل نموده است [Esmaeili, Memari and Khatibi, 2015]. تراورس بتنی پیش‌تنیده از جمله تراورس‌های مورد استفاده در خطوط سنگین پرسرعت است که در کارخانه های ایران نیز تولید می‌شود. تراورس های بتنی پیش‌تنیده محبوب‌ترین نوع تراورس در خطوط ریلی ایران به‌شمار می‌آیند [Rezaie, Shiri and Farnam. 2012]. این نوع تراورس ها در خطوط ریلی دنیا نیز بسیار معمول هستند که این موضوع به‌علت مقاومت و کیفیت بالا در عین ارزانی آن‌ها است [Remennikov, Murray and Kaewunruen, 2008]. با توجه به کاربرد جدید بتن پیش‌تنیده به‌خصوص در صنعت راه‌آهن، مطالعات و تحقیقات در این زمینه به دهه‌های اخیر برمی‌گردد. رمینیکوف و کاونرون، مطالعات آزمایشگاهی بر روی رفتار استاتیکی تراورس بتنی پیش‌تنیده انجام دادند [Kaewunruen and Remennikov, 2006]. گونزالس و همکاران شکست در تراورس و بالاست تحت بار قطار را تحلیل کردند. هدف از این مطالعه توصیف و گسترش روش جدیدی در خرابی و شکست در تراورس‌بتنی بود [González et al. 2008]. در سال ۲۰۱۲، زی و همکاران تحقیقاتی روی خرابی بتن تراورس تحت انبساط ناشی از یخ‌زدگی در محل رولپلاک‌های تراورس انجام دادند [Zi et al. 2012]. رضایی و همکاران، مطالعات آزمایشگاهی و عددی بر روی کنترل ترک طولی در تراورس بتنی پیش‌تنیده B70 انجام دادند. در این مطالعه تأثیر عوامل به‌وجود آورندهٔ ترک‌های طولی حاصل از فشار اضافی درون رولپلاک‌ها توسط فشار سیلندری در محل سوراخ‌ها توسط مادهٔ کتراک تقریب و مدل‌سازی شده‌است [Rezaie, Shiri and Farnam, 2012].

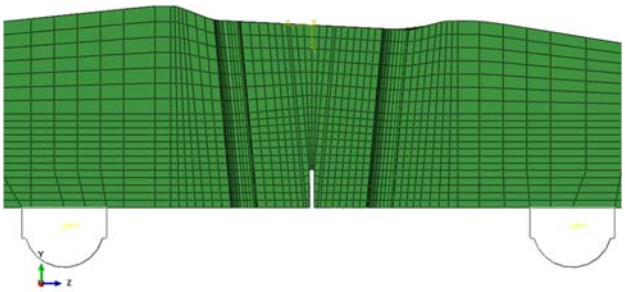
علم مکانیک شکست برای اولین بار توسط گریفیس روی ایجاد و گسترش ترک در شیشه که مصالح تردی به‌حساب می‌آید، استفاده شد [Griffith, 1921]. گریفیس، تئوری مکانیک شکست خطی (LEFM) را برای رشد خرابی در شیشه معرفی‌کرد. با توجه به رفتار شبه‌ترد بتن به‌نظر می‌رسید که احتمالاً می‌توان از تئوری خطی برای توصیف پارامترهای مکانیک شکست بتن، مانند: چقرمگی شکست، رشد ترک، ظرفیت باربری و غیره استفاده کرد. تئوری LEFM برای تحقیق روی بتن اولین بار توسط کاپلن مورد استفاده قرار گرفت [Kaplan, 1961]. شاه و مک‌گری روی معیار گریفیس تحقیق کردند و نشان دادند که تئوری LEFM توصیف درستی برای پارامترهای بتن به‌وجود نمی‌آورد [Shah and Mac-Garry, 1971]. تعداد زیادی مطالعات عددی و آزمایشگاهی روی قطعات بتنی با ابعاد مختلف، با در نظر گرفتن اثر اندازه، همچنین تحت بارگذاری‌های مختلف استاتیکی یا دینامیکی، به‌منظور محاسبهٔ پارامترهای مکانیک شکست صورت گرفته است [Al-Masoodi et al. 2016; Ožbolt and Sharma, 2012; Arruda and Castro, 2013]. در سال ۲۰۰۷، فرور و همکاران از مکانیک شکست خطی برای محاسبه در بتن مسلح و با مدل چسبندگی در نوک ترک استفاده کردند [Ferro and Carpinteri and Ventura, 2007]. شاووی و همکاران در سال ۲۰۱۱ از تکنیک انتشار آکوستیک برای محاسبهٔ پارامترهای مکانیک شکست بتن ساده استفاده کردند [Shaowei, Jun and Xiaoqing, 2011]. در سال ۲۰۱۱،

یحیایی-مؤید و طاهری مدل اجزای محدود را به‌منظور شبیه‌سازی فرآیند پیش‌تنیدگی و پیش‌بینی پاسخ خزش در نمونهٔ بتن پیش‌تنیده تحت بار خارجی و شرایط محیطی گسترش دادند [Yahyaei-Moayyed and Taheri, 2011]. ژاوو و همکاران به‌منظور تخمین خرابی در بتن، نمونهٔ سیلندری شکاف‌دار بتن مسلح‌شده با الیاف را تحت خزش غیرمحوری مطالعه کردند. هدف از این تحقیق آزمایشگاهی اندازه‌گیری بازشدگی دهانهٔ ترک (COD) بود [Zhao, Prisco and Vandewalle, 2015]. پانفیلوف و پیسکلوف تحلیل عددی و آزمایشگاهی روی ترک‌های مجزا از هم بر روی خیز تیر بتنی مسلح در سال ۲۰۱۵ انجام دادند [Panfilov and Pischulev, 2015]. در سال‌های اخیر مطالعات و تحقیقاتی روی تحلیل مکانیک شکست بتن مسلح انجام شده، هرچند هدف تعداد کمی از آن‌ها قطعات بتنی پیش‌تنیده بوده است. تخمین پارامترهای مکانیک شکست مصالح و قطعات از جمله ورودی‌های مهم طراحی مدرن سازه‌ها به شمار می‌آیند. در شرایط بهره‌برداری سازه موضوع مهم تعیین مقاومت اولیه و پیش‌بینی مقاومت نهایی در عمر سازه است. علم مکانیک شکست بیان می‌کند که پیش‌بینی مقاومت سازه در سال‌های مختلف باربری آن بدون در دست داشتن پارامترهای شکست مانند: رشد ترک و چقرمگی امکان‌پذیر نیست. در طراحی مدرن با در نظر گرفتن پارامترهای مکانیک شکست به‌عنوان ورودی طراحی، می‌توان پیش‌بینی دقیق‌تری از عمر سازه و کیفیت آن داشت. بنابراین در این مقاله، گسترش ترک مد I در تراورس بتنی پیش‌تنیده در خطوط سنگین پرسرعت با مدل خرابی پلاستیک شبیه‌سازی شده‌است. پارامترهای مهم مکانیک شکست تراورس بتنی پیش‌تنیده شکاف‌دار با طول ترک‌های اولیهٔ متفاوت اندازه‌گیری شده‌اند. در این پژوهش، رشد خرابی، طول ترک و بازشدگی دهانهٔ ترک (CMOD) در محل شکاف با ٦ طول ترک اولیهٔ متفاوت اندازه‌گیری و با هم مقایسه شده‌اند.

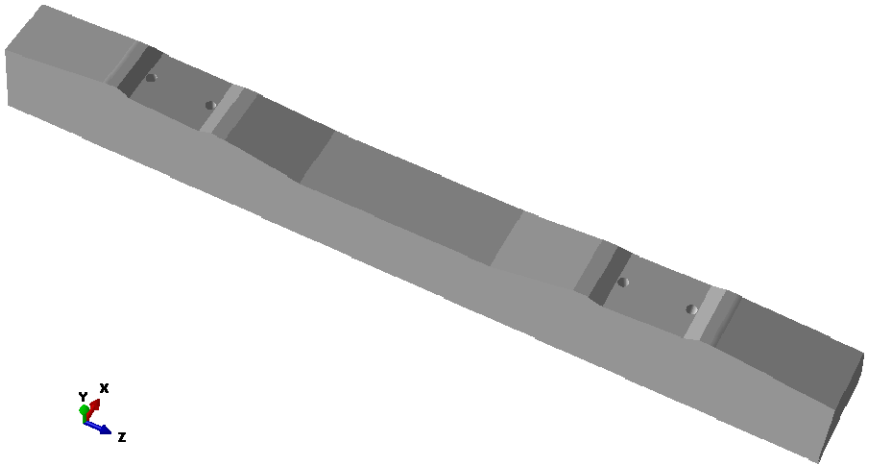
۲. مدل عددی تراورس بتنی پیش‌تنیده

۲-۱ مدل‌سازی

مدل عددی تراورس بتنی پیش‌تنیده شکاف‌دار با ٦ طول شکاف اولیه صفر میلی‌متر و ۵ تا ٤۵ میلی‌متر با گام افزایشی ۱۰ میلی‌متر و عرض شکاف ۸ میلی‌متر، تحت لنگر خمشی سه نقطه‌ای مثبت نشیمن‌گاه قرار گرفته است، همان‌طور که در شکل ۱ دیده می‌شود. در این مدل‌سازی به‌منظور کاهش زمان، تحلیل تراورس بتنی پیش‌تنیده در راستای طولی به دو نیم تقسیم می‌شود. در این مقاله، مدل استاندارد لنگر مثبت سه نقطه‌ای نشیمن‌گاه روی تراورس بتنی پیش‌تنیده در خطوط سنگین پرسرعت اعمال شده‌است. در اکثر استانداردهای راه‌آهن آزمایش لنگر مثبت سه نقطه‌ای نشیمن‌گاه به‌منظور کنترل کیفی تراورس استفاده می‌شود. درحقیقت رفتار تراورس بتنی پیش‌تنیده بسیار شبیه به رفتار تیر است و در نتیجه به مانند تیر، می‌توان از آزمایش لنگر خمشی تیر شکاف‌دار برای تعیین پارامترهای مکانیک شکست آن استفاده کرد. استفاده از لنگر خمشی مثبت نشیمن‌گاه به‌عنوان روشی برای کنترل کیفی در اکثر استانداردهای راه‌آهن دنیا نیز دلیل دیگری بر این موضوع است. آزمایش ذکر شده در بسیاری از قطعات و سازه‌های دیگر نیز استفاده می‌شود [Malvar and Warren, 1987; Karihaloo and Nallathambi, 1989]. شرایط بارگذاری در این مدل‌سازی بر اساس آزمایش سه‌نقطهٔ لنگر خمشی است که در استانداردهای معتبر دنیا "AREMA Chapter 30", "Australian Standard, AS 1085-14" بیان شده‌است.



شکل ۲. تراورس بتنی پیش‌تنیده در خطوط سنگین پرسرعت



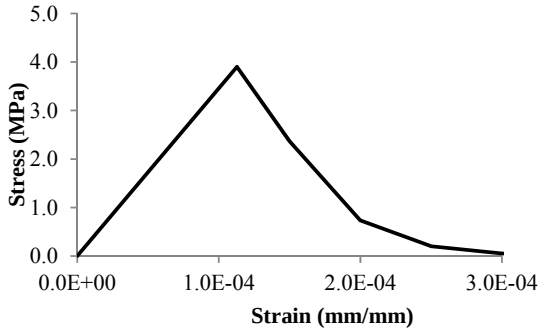
شکل ۲. تراورس بتنی پیش‌تنیده در خطوط سنگین پرسرعت

ابعاد هندسی تراورس بتنی پیش‌تنیده در خطوط سنگین پرسرعت که براساس خط تولید کارخانه‌های ایران است، در شکل ۲ نشان داده شده است. برای مدل‌سازی عددی و تحلیلی از نرم‌افزار ABAQUS/CAE 6.13-4 استفاده شده است. در ایجاد هندسهٔ مدل سعی شده تا حد امکان مدل با حداقل تغییرات نسبت به واقعیت ساخته شود. ابعاد و اندازه‌ها بر اساس نمونه‌های ساخته شده در کارخانه‌های تراورس سازی ایران، به نرم‌افزار معرفی شده‌اند. مدل معرفی‌شده برای بتن تراورس این مدل‌سازی عددی، مدل خرابی پلاستیک است. مدل به‌صورت پیوسته رفتار پلاستیک مصالح و ایجاد و گسترش ترک را به‌وسیلهٔ تنش کششی نشان می‌دهد. مدل خرابی پلاستیک به‌منظور مشخص کردن رفتار غیرخطی بتن از خرابی ایزوتروپیک در ناحیهٔ خطی استفاده می‌کند. این مدل، مقاومت کششی ایزوتروپیک را با فشار پلاستیک ترکیب می‌کند تا ایجاد خرابی و گسترش آن مشخص شود.

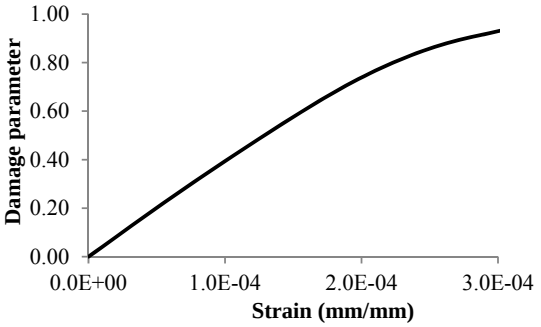
۲-۲ مشخصات مصالح

بتن مادهٔ اصلی تشکیل‌دهندهٔ تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده است که باید حداقل دارای مقاومت ۲۸ روزه ۵۹ مگاپاسکال روی نمونه‌های مکعبی ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر باشد. مصالح بتنی که در مدل استفاده شده دارای رفتار غیرخطی در حوزهٔ کشش و پارامتر خرابی است که در اشکال ۳.آ و ۳.ب به‌ترتیب نشان داده شده است. مصالح دیگری که در تراورس وجود دارد، کابل‌ها هستند که رفتار آن‌ها در شکل ۳.ج نمایش داده شده‌است. به‌منظور تعریف رفتار خرابی در تراورس، پارامترهای مختلفی

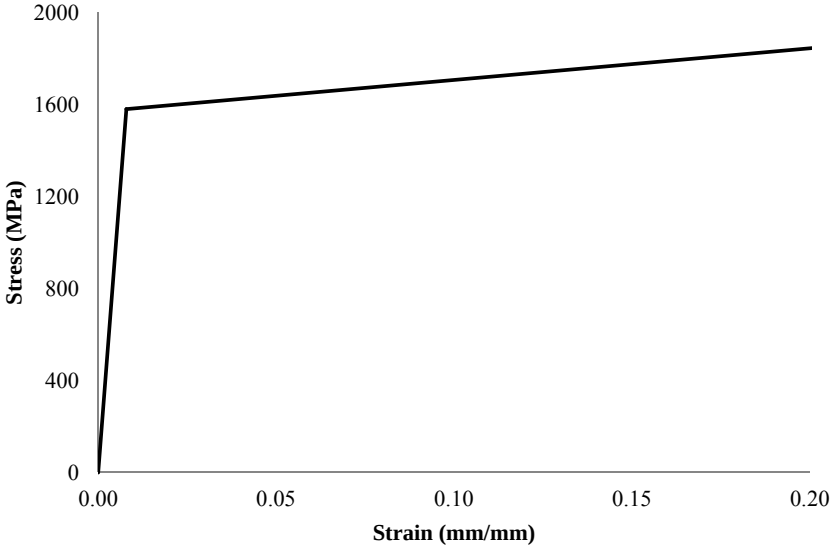
باید برای رفتار بتن و کابل ها برای نرم‌افزار اجزای محدود تعریف شـــود. این مقادیر برای بتن و کابل ها به‌ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است.



آ. نمودار تنش-کرنش بتن در کشش



ب. نمودار پارامتر خرابی-کرنش



ج. نمودار تنش-کرنش کابل

شکل ۳. نمودارهای مشخصات رفتار مصالح

جدول ۱.پارامترهای ورودی نرم‌افزار ABAQUS برای تعریف رفتار و مشخصات مصالح بتنی

ویسکوزیته، μ	پارامتر شکل، K	خروج از مرکزیت، ε	زاویهٔ اتساع، ψ^o	وزن مخصوص، $\gamma_c(kg/m^3)$	مدول الاستیسیته، E_c (MPa)	ضریب پواسون، ν
۰/۰۰۵	۰/٦٦٧	۰/۱	۳٦°	۲۵۰۰	۳٤٥٥۱	۰/۱۵

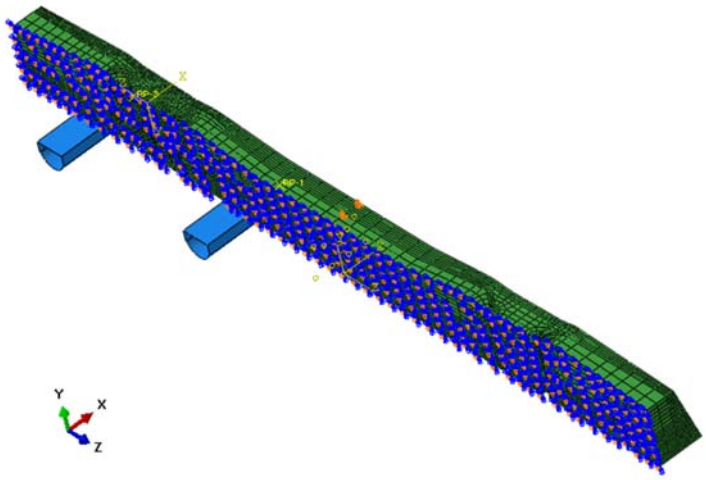
جدول ۲. مشخصات مکانیکی کابل‌ها

E_s	E_t	f_y	υ	چگالی
۲۰۰۰۰۰ MPa	۲۰۰۰ MPa	۱٦۳۹ MPa	۰/۳	۷۸۵۰ kg/m3

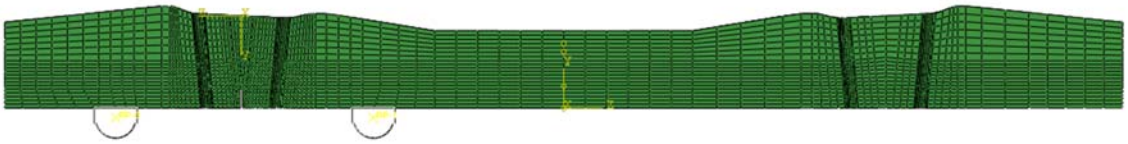
جنس کابل‌های مورد استفاده برای ساختن تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده از نوع Gr.270 به قطر ۹/۵۳ میلی‌متر است. برای این کابل‌ها مقدار تنش تسلیم، f_y ، برابر با kg/cm^2 ۱٦۱۰۰ و حد کشش مجاز kg/cm^2 ۱۸۹۰۰ است. دیگر مشخصات مکانیکی این کابل‌های فولادی در جدول ۲ نشان داده شده است. در خط تولید تراورس‌های بتنی پیش‌تنیدهٔ سنگین پرسرعت برای فراهم‌کردن نیروی پیش‌تنیدگی از جک‌هایی استفاده می‌شود که نیرویی برابر با ۷/۵ تن به هر کابل وارد می‌کنند. این مقدار بر اساس ۷۵ درصد نیروی نهایی است که کابل‌ها می‌توانند تحمل کنند. مهم‌ترین داده‌های محاسباتی در این پژوهش شامل: شکل خرابی، نمودار بار- طول ترک و نمودار بار- CMOD در تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده با طول ترک‌های اولیهٔ متفاوت است. به‌منظور تحلیل فرآیندهای بارگذاری و گسترش ترک از مدل خرابی پلاستیک استفاده شده‌است.

۲-۳ بارگذاری و شرایط مرزی

شرایط بارگذاری و مشخصات تکیه‌گاهی در مدل باید به‌نحوی باشد که شرایط واقعی را برای مدل فراهم نماید. در این مقاله، برای مدل تراورس بتنی پیش‌تنیدهٔ خطوط سنگین پرسرعت باید شرایط تکیه‌گاهی، اعمال نیروی پیش‌تنیدگی و همچنین لنگر خمشی سه‌نقطهٔ مثبت نشیمن‌گاه در نظر گرفته شود، همان‌طورکه در شکل ٤ دیده می‌شود.



آ. شرایط تکیه‌گاهی در مرحلهٔ اعمال نیروی پیش‌تنیدگی



ب. شرایط تکیه‌گاهی در مرحلهٔ بارگذاری لنگر خمشی سه‌نقطهٔ مثبت نشیمن‌گاه

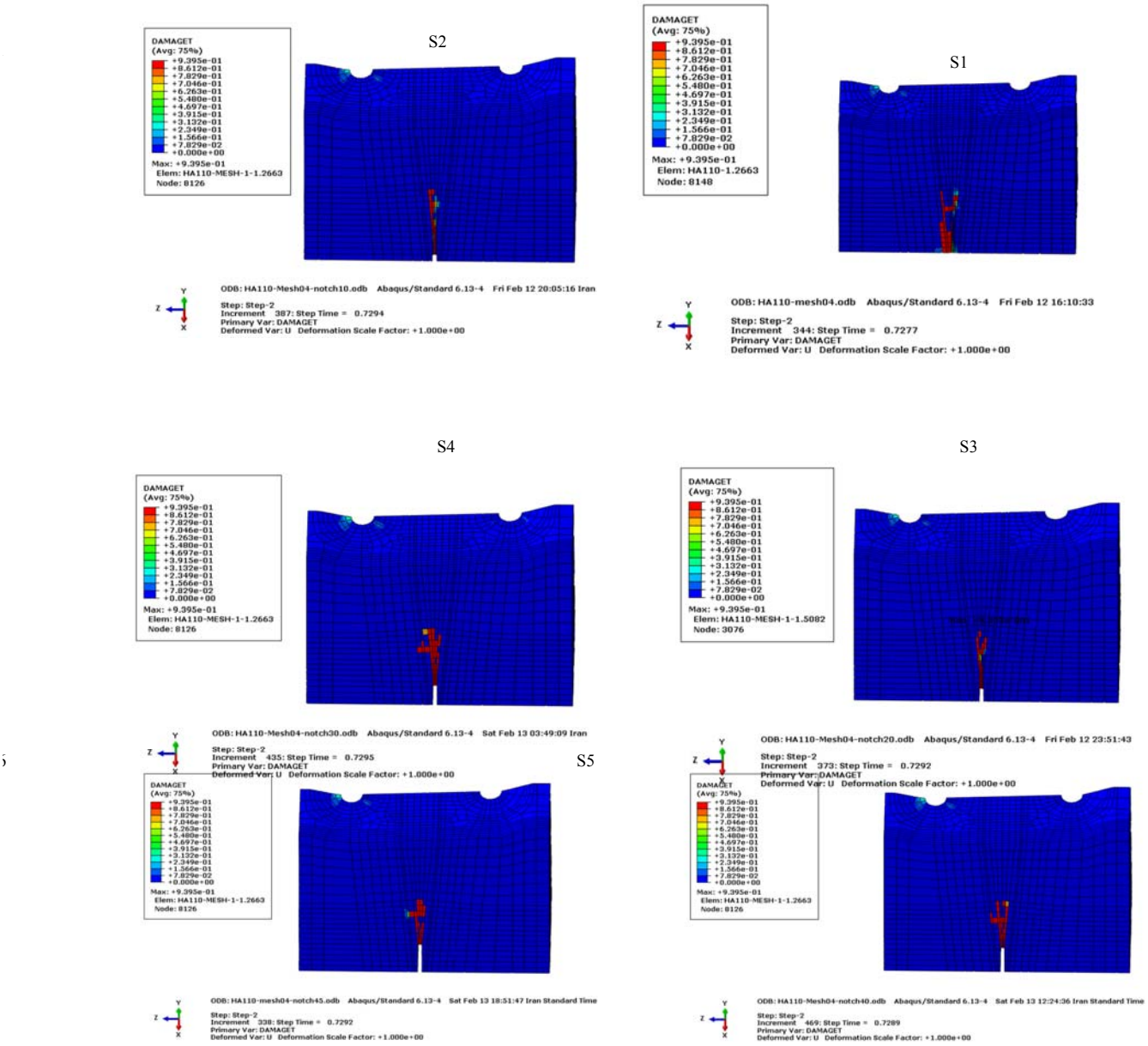
شکل ٤. شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری مدل

۳. نتایج

در این مقاله، شکل گسترش خرابی در محل شکاف تراورس بتنی پیش‌تنیده و نمودارهای مکانیک شکست، مانند: بار–طول ترک و بار–CMOD رسم شده است. این پارامترها و خروجی‌ها برای مهندس طراح تراورس بتنی پیش‌تنیده بسیار جذاب هستند. در این مقاله، گسترش ترک تراورس بتنی پیش‌تنیده در خطوط سنگین پرسرعت تحت بارگذاری لنگر خمشی سه‌نقطهٔ مثبت نشیمن‌گاه با مدل خرابی پلاستیک شبیه‌سازی می‌شود. تراورس‌ها با طول شکاف اولیه صفر میلی‌متر و ۵ تا ٤٥ میلی‌متر با گام افزایشی ۱۰ میلی‌متر و عرض شکاف ۸ میلی‌متر تحت تحلیل مکانیک شکست قرار می‌گیرند.

۳-۱ مدل خرابی تراورس

در این مدل‌سازی عددی، ٦ مدل تراورس بتنی پیش‌تنیده به صورت شکل ٤ تحت بارگذاری سه‌نقطهٔ لنگر خمشی قرار می‌گیرند. در این مدل‌ها تمامی مشخصات و شبکه‌بندی یکسان و تنها طول پیش ترک در آن‌ها متفاوت است. طول شکاف اولیه صفر میلی‌متر و ۵ تا ٤٥ میلی‌متر با گام افزایشی ۱۰ میلی‌متر و عرض شکاف ۸ میلی‌متر است. علت حداکثر ٤٥ میلی‌متر این است که در مقطع نشیمن‌گاه ریل تراورس که پیش‌ترک‌ها در آن ایجاد شده‌اند، ضخامت پوشش بتن ٤٥ میلی‌متر است. مدل خرابی نهایی همهٔ ٦ تراورس از پیش‌ترک صفر تا ٤٥ میلی‌متر به‌ترتیب در S1، S2، S3، S4، S5 و S6 نشان داده شده است (شکل ۵).



شکل ۵. مدل خرابی ٦ تراورس شکاف‌دار

در شـــکل ۵ خرابی نهایی در تراورس‌ها با طول شـــکاف اولیهٔ مختلف نـشان داده شده‌ا ست. این ت صاویر خرابی در ق سمت نشـیمن‌گاه ریل تراورس‌ها را نشـان می‌دهند. در همهٔ خرابی‌ها، ترک از محل و سط ن شیمن‌گاه ریل تراورس آغاز و به صورت تک شاخه ر شد می‌کند. در مراحل بعدی ترک دو شاخه شده و در نهایت قطعه به مرحلهٔ شـکسـت نهایی می‌رسـد. در همهٔ ٦ مدل خرابی، شکست تنها در بخش پیش‌ترک ایجاد می‌شود. در نتیجه پیش‌بینی و در نهایت طراحی مکانیک شکست خرابی در محل نشیمن‌گاه ریل آسان‌تر می شود. با اندازه‌گیری پارامترهای مکانیک شـــکســـت، مانند طول ترک و بازشـــدگی دهانهٔ ترک می‌توان طراحی مکانیک شکست را برای این قطعات انجام داد.

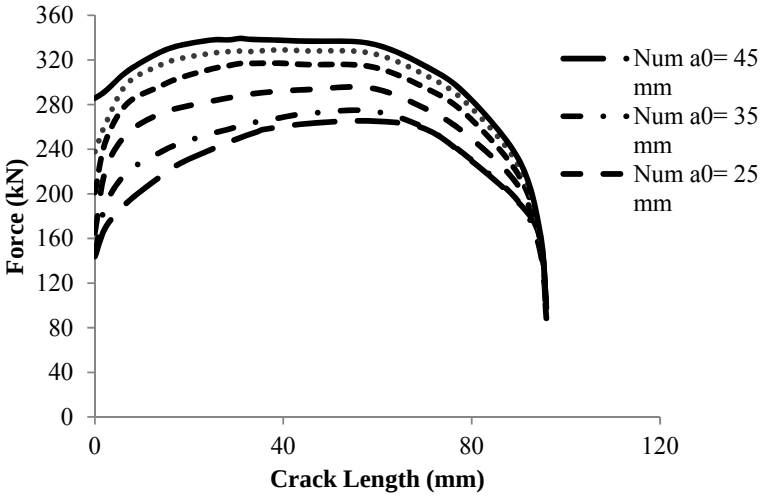
۳-۲ نمودار بار-طول ترک

گسترش ترک مهم‌ترین پارامتر تحلیل و طراحی مکانیک شکست یک قطعه به‌شمار می‌آید. هر چه 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، تحمل می‌کند. در بخش قبل گسترش خرابی در محل شکاف تراورس‌های مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد که خرابی از محل شکاف شروع و بعد از دوشاخگی به‌صورت نامتقارن ادامه پیدا می‌کند تا به مرحلهٔ شکست نهایی برسد. در این بخش از مقاله، گسترش ترک براساس نمودار بار-طول ترک در محل شکاف بررسی می‌شود. طول ترک تراورس بتنی پیش‌تنیده در محل شکاف و در یکی از شاخه‌های دو شاخگی ترک در مدل عددی مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

در شکل ٦ تأثیر طول ترک اولیه بر رفتار خمشی تراورس بتنی پیش‌تنیدهٔ خطوط سنگین پرسرعت با استفاده از نمودار بار-طول ترک نشان داده شده‌است. نتایج با ٦ طول ترک اولیه در کنار هم ترسیم و با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، با افزایش a_0، بار سه نقطه‌ای خمشی و مقاومت ترک اولیه کاهش می‌یابد. با توجه به شکل نمودارهای بار-طول ترک، می‌توان نمودار را به سه بخش تقسیم کرد. در مرحلهٔ اول، مقاومت قطعه در برابر رشد ترک در همهٔ نمودارها بالاست. این موضوع به‌خاطر شیب تند اولیه نمودارهاست (مثلاً ۲۱۱ درصد در a_0=0 mm). در مرحلهٔ دوم، مقاومت در برابر رشد ترک به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد. این موضوع به‌خاطر شیب نسبتاً ملایم در این مرحلهٔ بارگذاری در نمودارها ست (مثلاً ۱۹در صد در a_0=0 mm). در مرحلهٔ سوم و پایانی، مقاومت تراورس در برابر رشد ترک بسیار کاهش می‌یابد به‌طوری‌که در این مرحله ترک ناپایدار می‌شود، یعنی بدون اعمال بار بیشتر، ترک به مسیر رشد خود ادامه می‌دهد.

با تغییر طول ترک اولیه شکل نمودار تغییر چندانی نکرده است، اما ظرفیت‌ها و همچنین پارامترهای رشد ترک تغییر کرده‌اند. همان‌طور که در شکل ٦ دیده می‌شود، با افزایش طول ترک اولیه، مقاومت در برابر رشد ترک کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش طول ترک اولیه، در ابتدای بارگذاری ترک با سرعت بیشتری رشد می‌کند.



شکل ٦. تأثیر طول ترک اولیه (a_0) در نمودار بار-طول ترک در محل شکاف تراورس

۳-۳ نمودار بار-CMOD

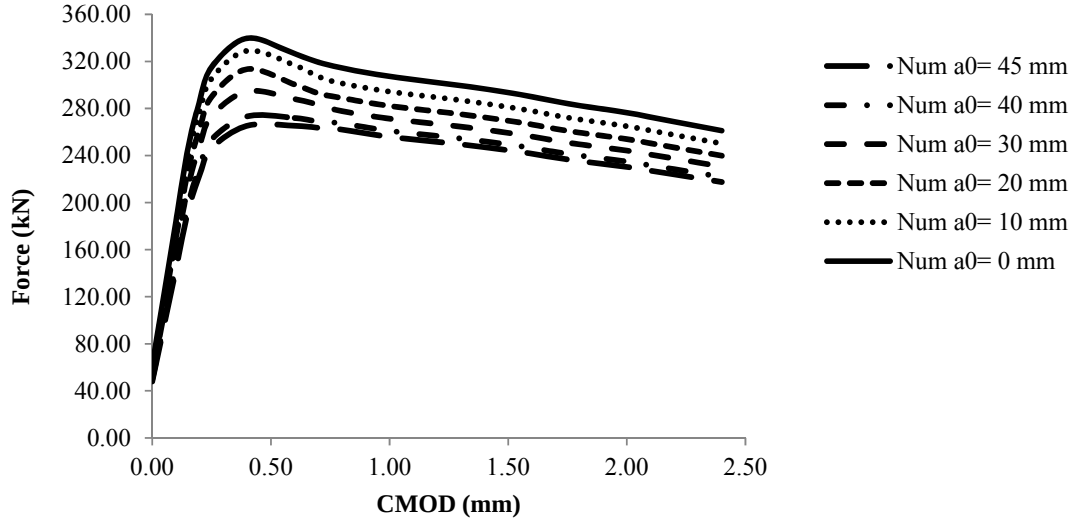
بازشـدگی دهانهٔ ترک (CMOD) یکی دیگر از پارامترهای مهم تحلیل و طراحی مکانیک شـکسـت قطعات اسـت. پارامتر CMOD برای محاسبهٔ طول ترک به صورت مستقیم و K_{Ic} به صورت غیرمستقیم قابل استفاده است. همچنین به صورت مسـتقیم این پارامتر برای طراحی قطعات قابل اسـتفاده اسـت. نمودار بار-CMOD برای تراورس بتنی پیش‌تنیده مورد استفاده در خطوط سنگین پرسرعت در شکل ۷ نشان داده شده است. در شکل ۷، نمودار بار-CMOD برای محل شکاف نمایش داده شده است. در این شکل هدف مقایسهٔ نتایج طول ترک اولیه و بازشدگی دهانهٔ ترک است.

ترک در محل شکاف با نیروهای مختلفی در آزمایش سه نقطه‌ای لنگر خمشی مثبت نشیمن‌گاه تراورس شروع می‌شوند، همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود. ابتدا ترک در مرکز نشیمن‌گاه تراورس به‌صورت خمشی ایجاد می‌شود و در ادامه به‌صورت دوشاخه درمی‌آید. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، طول و بازشدگی دهانهٔ ترک‌ها با رشد خرابی با نرخ‌های متفاوتی رشد می‌کنند. در همهٔ نمودارها رشد بازشدگی دهانهٔ ترک را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. قسمت اول نمودار، رفتار خطی نمودار است که تقریباً تا حداکثر باری که قطعه تحمل می‌کند، ادامه دارد. در قسمت دوم نمودار، رفتار رشد CMOD تغییر می‌کند، در واقع در این حالت قطعه بار بیشتری تحمل نمی‌کند. در این قسمت مقدار CMOD به‌صورت ناپایدار رشد می‌کند. رفتار رشد CMOD در کل غیرخطی است اما می‌توان دو قسمت نمودار را با دو خط با تقریب خوبی معادل نمود. در مقایسهٔ شکل‌های ٦ و ۷ موردی که بیشتر نمود دارد، حساسیت کمتر پارامتر CMOD در مقایسه با طول ترک نسبت به طول ترک اولیه است. در واقع در نمودار، پارامتر رشد طول ترک با نرخ بیشتری نسبت به طول ترک رشد می‌کند.

٤. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل سازی عددی روی رفتار مکانیک شکست و خرابی تراورس بتنی پیش‌تنیده به‌منظور اسـتفاده در خطوط سـنگین پرسـرعت راه‌آهن انجام شـده اسـت. در این پژوهش، پارامترهای اصلی مکانیک شکست براساس اصول بنیادین علم مکانیک شکست برای تراورس مذکور محاسبه شده است. این داده‌ها شامل: شکل رشد خرابی، طول ترک و CMOD است. در فرآیند مدل‌سـازی، مدل سـه‌بعدی کاملاً دقیق تراورس بتنی پیش‌تنیده مطابق با تمام جزئیات تولید این تراورس در کارخانه‌های ایران ساخته شده‌است. در بخش اول این پژوهش، رشـد ترک و خرابی در هر ٦ مقدار پیش‌ترک به‌صـورت کیفی نشان داده شده‌است. نتایج در لحظهٔ شکست همگی نشان‌دهندهٔ رشـد ترک، خرابی و شـکسـت تنها در محل پیش‌ترک اسـت. خرابی در تراورس به صورت خمشی از محل پیش‌ترک آغاز و با دو شاخه شدن ترک، خرابی به سوی شکست نهایی نزدیک می‌شود. در بخش بعد پارامترهای گسترش ترک به‌صورت کمی با محاسبهٔ طول ترک و CMOD بررسی شده‌است. با استفاده از این پارامترها، رفتار شـکسـت تراورس بتنی پیش‌تنیده قابل پیش‌بینی خواهد بود. نمودار بار-طول ترک و بار-CMOD برای ترک در محل شکاف مورد بررسی قرار گرفته‌است. باید توجه داشت که پارامترهای اصلی مکانیک شکست با استفاده از این نتایج یعنی، چقرمگی، بار نهایی، تغییر شکل‌های خمشی و غیره قابل محاسبه هستند. نتایج نشان می‌دهند که رفتار خمشی به شدت وابسته به طول ترک اولیه است. همچنین ترک ابتدا از محل شـکاف شـروع و در ادامه با ناپایداری ترک، مقطع دچار شـکسـت نهایی می‌شـود. نتایج نمودار بار-طول ترک نشـان می‌دهد که به‌علت شیب تند اولیهٔ نمودارها، در ابتدای بارگذاری مقاومت در برابر رشد ترک در همهٔ نمودارها بالاست. در مرحلهٔ بعد، مقاومت در برابر رشـد ترک به مقدار قابل توجهی کاهش می‌یابد، این موضـوع به‌علت شـیب نسـبتاً ملایم در این مرحلهٔ بارگذاری در نمودارها ست. در مرحلهٔ پایانی، مقاومت تراورس

در برابر رشـــد ترک بســـیار کاهش می‌یابد به‌طوری‌که در این مرحله ترک ناپایدار شـده اسـت، یعنی بدون اعمال بار بیشـتر، ترک به مسـیر رشـد خود ادامه می‌دهد. نتایج نمودارهای بار- CMOD نیز نشـــان دهنده رفتار خطی نمودار در بخش اول نمودار اســت که تقریبا تا حداکثر باری که قطعه تحمل می‌کند، ادامه می‌یابد. در قسمت دوم نمودار، رفتار رشد CMOD تغییر می‌کند، در واقع در این حالت قطعه بار بیشتری تحمل نمی‌کند. در این قسمت مقدار CMOD به صورت ناپایدار رشد می‌کند. رفتار رشـــد CMOD در کل غیرخطی اســـت، اما می‌توان دو قســـمت نمودار را با دو خط با تقریب خوبی معادل نمود. در مقایســهٔ نتایج موردی که بیشـتر نمود دارد، حسـاسـیت کمتر پارامتر CMOD در مقایسه با رشد ترک نسبت به طول ترک اولیه اســت. در واقع، در نمودار رشــد ترک، این پارامتر با نرخ بیشـــتری نســـبت به CMOD با طول ترک‌های مختلف رشـــد می‌یابد. نتایج این مقاله نشـان می‌دهد که می‌توان با اسـتفاده از مدل خرابی پلاســـتیک، تراورس بتنی پیش‌تنیده در خطوط سـنگین پرسـرعت را تحلیل و برای طراحی مکانیک شـکسـتی بکار برد



شکل ۷. نمودار بار-CMOD در محل شکاف

۵. پی نوشت‌ها

1. Katrak
2. Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)
3. Crack Opening Displacement (COD)
4. Crack Mouth Opening Displacement (CMOD)
5. Plastic Damage Model
6. Isotropic

٦. سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از شرکت "بتون صنعت بریس" و "گروه مهندسی و طراحی راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران"، برای حمایت از این پژوهش سپاسگزاری می‌کنند.

۷. مراجع

-Al-Masoodi, A. H. H., Kawan, A., Mudiono, K., Hamid, R. and Khan M. N. N. (2016) " Static and dynamic properties of concrete with different types and shapes of fibrous reinforcement", Construction and Building Materials, Vol. 104, pp. 247-262

-AREMA. (2014) "Evaluation tests for tie systems. Chapter 30, Part 4, Concrete Ties", American Railway Engineering and Maintenance of Way Association.

-Arruda, M. R. T. and Castro, L. M. S. (2013) "Static and dynamic physically non-linear analysis of concrete structures using a hybrid mixed finite element model", Advances in Engineering Software, Vol. 65, pp. 112-131.

-AS-1085.14. (2014) "Railway track material part 14: Pre-stressed Concrete Sleepers", Standard Australia.

-Esmaeili, M., Memari, M. and Khatibi, F. (2015) "The Correlation between static and dynamic moduli in embankment of high speed railway", Journal of Transportation Infrastructure Engineering, Vol. 1, No. 3, pp. 33-45.

-Ferdous, W. and Manalo A. (2014) "Failures of mainline railway sleepers and suggested remedies – review of current practice", Engineering Failure Analysis, Vol. 44, pp. 17–35.

-Ferro, G., Carpinteri, A. and Ventura, G. (2007) "Minimum reinforcement in concrete structures and material structural instability", International Journal Fracture, Vol. 146, No. 213–231.

-González-Nicieza, C., Álvarez-Fernández, M. I., Menéndez-Díaz, A., Álvarez-Vigil, A. E. and Ariznavarreta-Fernández, F. (2008) "Failure analysis of concrete sleepers in heavy haul railway tracks", Engineering Failure Analysis, Vol. 15, No. 1-2, pp.90-117.

-Griffith, A. A. (1921) "The phenomena of ruptures and flow in solids", Philosophical Transactions of the Royal Society London A. Vol. 221, Issue 582–593.

-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 and Construction (EASEC-10), Bangkok, Thailand, August, pp. 3–5.

-Kaplan, M. E. (1961) "Crack propagation and the fracture concrete", ACI Journal. Vol. 58, pp. 596-610.

-Karihaloo, B. L. and Nallathambi, P. (1989) "Fracture toughness of plain concrete from three-point bend specimens", Materials and Structures. Vol. 22, pp. 185-193.

-Koh, T., Shin, M., Bae, Y. and Hwang, S. (2016) "Structural performances of an eco-friendly pre-stressed concrete sleeper", Construction and Building Materials, Vol. 102, No. 1, pp. 445-454.

-Malvar, L. J. and Warren, G. E. (1987) "Fracture energy for three point bend tests on single edge notched beams: proposed evaluation", Materials and Structures. Vol. 28, Issue 3, pp. 266-272.

-Manalo, A., Aravinthan, T., Karunasena, W. and Stevens, N. (2012) "Analysis of a typical railway turnout sleeper system using grillage beam analogy". Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 48, No. 1, pp. 1376-1391.

Journal of Engineering Mechanical Division. Vol. 97, pp. 1663-1676.

-Shaowei, H. u., Jun, L. u. and Xiaoqing, Z. (2011) "Study on characteristics of acoustic emission property in the normal concrete fracture test", Advanced Materials Research, Vol. 189-193, pp. 1117–1121.

-Yahyaei-Moayyed, M., and Taheri F. (2011) "Creep response of glued-laminated beam reinforced with pre-stressed sub-laminated composite", Construction and Building Materials, Vol. 25, Issue 5, pp. 2495–2506.

-Zhao, G., Prisco, M. D. and Vandewalle, L. (2015) "Experimental investigation on uniaxial tensile creep behavior of cracked steel fiber reinforced concrete", Materials and Structures, Vol. 48, pp. 3173-3185.

-Zi, G., Moon, D. Y., Lee, S. J., Jang, S. Y., Yang, S.C. and Kim, S. S. (2012) "Investigation of a concrete railway sleeper failed by ice expansion", Engineering Failure Analysis. Vol. 26, pp. 151-163.

-Ožbolt, J. and Sharma, A. (2012) "Numerical simulation of dynamic fracture of concrete through uniaxial tension and L-specimen", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 85, pp. 88-102.

-Panfilov, D. A. and Pischulev, A. A. (2015) "The analysis of deflections of pre-stressed reinforced concrete beams exposed to short duration uniform loading", Procedia Engineering, Vol. 111, pp. 619–625.

-Remennikov, A. M., Murray, M. H. and Kaewunruen S. (2008) "Dynamic design guidelines for pre-stressed concrete sleepers", Proceedings of the 20th Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, University of Southern Queensland.

-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. Vol. 26, pp. 21–30.

-Shah, S. P. and Mac-Garry, F. J. (1971) "Griffith fracture criterion and concrete",

سید محمد فرنام، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران–عمران را در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه بوعلی سینا و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران–سازه در سال ۱۳۹۰ را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی اخذ نمود. در سال ۱۳۹۶ موفق به کسب درجه دکتری در رشته مهندسی عمران–سازه از دانشگاه بوعلی سینا گردید. زمینه های پژوهشی مورد علاقه ایشان بتن پیش‌تنیده، ابنیه‌ی راه‌آهن (تراورس)، تکنولوژی بتن و دینامیک سازه است..

مهدی بیات آورزمانی، درجه کارشناسی در رشته مهندسی عمران–عمران را در سال ۱۳۸۸ از دانشگاه بوعلی سینا و درجه کار شنا سی ار شد در ر شته مهند سی عمران– سازه در سال ۱۳۹۲ را از دان شگاه آزاد اسلامی واحد ملایر اخذ نمود. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان بتن مسلح، تکنولوزی بتن، ملات پرمقاومت، افزودنی‌های بتن و تحلیل و طراحی سازه‌های بتنی می‌باشد.

فریدون ر ضایی، درجه کار شنا سی در ر شته مهند سی عمران–عمران را در سال ۱۳٦۷ از دان شگاه علم و صنعت ایران و درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی عمران–سازه در سال ۱۳۷۰ را از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نمود. در سال ۱۳۷۸ موفق به کسب درجه دکتری در ر شته مهند سی عمران–سازه از دانشگاه علوم و تکنولوژی لیلیک ـ فرانسه گردید. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه ایشان تحلیل و طراحی سازه‌های بتن‌آرمه، بهسازی و مقاوم‌سازی، تعمیر و مرمت سازه‌ها، سازه‌های پیش‌تنیده، تحلیل لرزه‌ای، تحلیل و طراحی پل‌ها، مدیریت نگهداری پل‌ها، تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده، تحلیل ترک و خوردگی در سازه‌های بتن‌آرمه و برر سی دوام و طول عمر سازه‌های بتن‌آرمه بوده و در حال حا ضر ع ضو هیات علمی دان شگاه بوعلی سیناست.