رویکردهای نوین در مهندسی عمران، دوره هشتم، شماره دوم ۱۴۰۳، صفحه: ۴۵-۶۱

بررسی ظرفیت باربری تراورس بتنی پیش‌تنیده با در نظر گرفتن آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر میزان درگیری بین فولاد و بتن به صورت عددی

محمد فرج شوشتری پور [۱*]، محمد فرنام [۲]

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-سازه، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی، همدان، ایران*

[۲] استادیار، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی، همدان، ایران

(faraj3238403@gmail.com)

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۵، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱)

چکیده

هدف اصلی در پژوهش حاضر، بررسی ظرفیت باربری تراورس بتنی پیش تنیده با در نظر گرفتن آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر میزان درگیری بین فولاد و بتن به صورت عددی می باشد، لذا پس از صحت سنجی و مدل سازی یک نمونه عددی تراورس بتنی با کابل پیش تنیده در محیط نرم افزار آباکوس، تاثیر هشت متغییر مختلف شامل قطر آرماتورهای طولی(کابل ها)، فاصله استقرار عمودی آرماتورها، مقاومت فشاری بتن، مقاومت کششی فولاد، مدول الاستیسیته بتن، مدول الاستیسیته فولاد، ضریب پواسون بتن و ضریب پواسون فولاد بر روی چهار پاسخ مختلف شامل تنش فشاری ایجاد شده در بتن، تغییرمکان قائم ایجاد شده در تراورس، ترک خوردگی کششی در بتن و ظرفیت باربری تراورس مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. به منظور انجام آنالیز حساسیت، تاثیر هر یک از متغییرهای معرفی شده به ازای ۴ مقدار مختلف عددی(بازه ۵٪- تا ۵٪ و ۱۰٪- تا ۱۰٪) بررسی شده است. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان می دهد، با تغییر مقادیر عددی مربوط به مشخصات هندسی نظیر قطر کابل ها، فاصله استقرار کابل ها و مشخصات مکانیکی نظیر مقاومت فشاری بتن، مقاومت کششی فولاد، مدول الاستیسیته بتن و فولاد و ضریب پواسون فولاد و بتن، شاهد تغییرات قابل توجهی در بیشینه تنش فشاری بتن، ترک خوردگی کششی بتن، تغییرمکان قائم و ظرفیت باربری تراورس های بتنی خواهیم بود. به عنوان نمونه، تغییرات ۱۰درصدی هر یک از متغیرهای مطرح شده به ترتیب ظرفیت باربری تراورس را حداکثر ۶,۶٪، ۰,۴۷٪، ۰,۹۴٪، ۰,۴۷٪، ۰,۹۴٪، ۰,۶۶٪ ، ۰,۳۳٪ و ۰,۹۴٪ دستخوش کرده است.

کلمات کلیدی

ظرفیت باربری، تراورس بتنی پیش تنیده، آنالیز حساسیت، مشخصات هندسی، مشخصات مکانیکی.

Numerical Investigation of the Pre-Stressed Concrete Sleepers Bearing Capacity by Considering the Sensitivity Analysis of the Effective Parameters on the Bonding between Steel and Concrete

Mohammad Faraj Shoushtari Pour [1]*, Mohammad Farnam [2]

*[*1] M.Sc. of Structural Engineering, Jihad Institute of Higher Education, Hamedan, Iran*

[2] Assistant Professor, Jihad Institute of Higher Education, Hamedan, Iran

(faraj3238403@gmail.com)

(Date of received: 24/04/2024, Date of accepted: 11/09/2024)

ABSTRACT

The main goal of the current research is to investigate the bearing capacity of the pre-cast concrete traverse by considering the analysis of the amount of removal of steel and concrete in numerical construction, after verification and the model of a sample of concrete traverse with pre-cast cable. In the Abaqus software environment, the effect of eight different variables including the diameter of longitudinal reinforcements (cables), the vertical distance of reinforcements, compressive strength of concrete, tensile strength of steel, modulus of elasticity of concrete, modulus of elasticity of steel, Poisson's coefficient of concrete and Poisson's coefficient of steel on Roy Four different responses, including compressive stress created in concrete, vertical displacement created in the traverse, tensile cracking in concrete and load bearing of the traverse, have been investigated and evaluated. In order to carry out analysis 5, the effect of each of the introduced variables has been investigated for 4 different numerical values (range -5% to 5% and -10% to 10%). The results obtained from this study show that by changing the numerical changes related to the geometrical characteristics such as the diameter of the cables, the distance between the cables and the mechanical characteristics of the compressive strength of concrete, the tensile strength of steel, the modulus of elasticity of concrete and steel, and Poisson's ratio of steel and concrete. Witn essed significant changes in the maximum compressive stress of concrete, tensile cracking of concrete, vertical displacement and bearing capacity of concrete traverses. As an example, 10% changes in each of the presented changes have undergone 6.6%, 0.47%, 0.94%, 0.47%, 0.94%, 0.66%, 0.33%, and 0.94% traverse load, respectively.

Keywords:

Prestressed concrete, Pre-analysis, Geometric specifications, Mechanical specification

۱- مقدمه

راه آهن یکی از مهم‌ترین سیستم‌های حمل و نقل است که امکان حمل و نقل کالا و مسافر در نقاط مختلف کشور و یا بین کشورهای مختلف را فراهم می‌کند. صنعت حمل و نقل ریلی به عنوان یکی از صنایع زیر بنایی، نقش ویژه‌ای در شاخص‌های توسعه یافتگی و اقتصاد کشورها دارد. به دلیل تأمین حرکت سریع، یکنواخت و ایمن قطارها بر روی خط‌های آهن، مسیرها باید دارای مشخصه‌های مطلوبی مطابق با ضوابط فنی و استانداردها باشند. مسیر یک خط آهن از لایه‌های زیرسازی، زیربالاست و بالاست تشکیل شده است که بر روی آن‌ها تراورس و ریل‌ها به کمک وسیله‌های تثبیت به یکدیگر متصل شده‌اند. 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 جمهوری اسلامی ایران، تراورس بتنی پیش‌تنیده منوبلوک B70 به علت مقاومت بالا و سایر مزایای آن بیشتر مورد توجه است. خرابی‌های مربوط به تراورس به انواع مختلفی قابل دسته‌بندی هستند. از آنجا که جنس تراورس‌ها از بتن می‌باشد، لذا عیوبی که برای بتن اتفاق می‌افتد برای تراورس هم می‌تواند رخ دهد. یکی از این عیوب عدم درگیری مناسب فولاد و بتن است که معمولاً باعث افت نیروی پیش‌تنیدگی و کاهش ظرفیت تراورس می‌شود و می‌تواند باعث انهدام آن در شرایط بهره‌برداری شود. اساس عملکرد مرکب بتن و فولاد و تشکیل یک عضو بتن مسلح، بر پیوستگی(درگیری) کامل بین میلگرد مسلح کننده و بتن استوار است. ایفای نقش عنصر کششی توسط میلگردهای فولادی و جبران ضعف مقاومت بتن تحت کشش، فقط در صورتی امکان پذیر است که پیوستگی کامل بین بتن و فولاد وجود داشته باشد و امکان انتقال تنش‌های کششی بین دو ترک متوالی از بتن به فولاد برقرار باشد[۱]. روابط موجود در آیین‌نامه‌ها بیشتر برای میلگردهای آجدار مطرح است و کمتر اشاره‌ای به میلگردهای فولادی صاف و یا کابل‌های فولادی شده است. قابل ذکر است که فولاد مصرفی در تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده از نوع کابل‌های فولادی می‌باشد و رفتار مهاری آن‌ها در بتن با میلگردهای آجدار قدری متفاوت است. با توجه به اینکه تحقیقات انجام شده درباره‌ی کاهش نیروی پیش‌تنیدگی در اثر درگیری نامناسب فولاد و بتن بسیار کم بوده و دید کامل و جامعی به دست نمی‌دهند، بنابراین به منظور افزایش بازدهی و طول عمر تراورس در خطوط راه‌آهن نیاز به تحقیقات بیشتر و جامع‌تری می‌باشد. در این پژوهش تلاش شده است تا اثر کاهش درگیری بین بتن و فولاد با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر آن، روی ظرفیت باربری تراورس بتنی پیش‌تنیده به صورت عددی در محیط نرم افزار آباکوس بررسی شود. از جمله پارامترهای مؤثر می‌توان به مقاومت فشاری بتن، مقاومت کششی بتن، قطر کابل‌های فولادی، چیدمان کابل‌های فولادی، دانه‌بندی مصالح سنگی، عیار سیمان مصرفی، مدول الاستیسیته بتن و فولاد، و ضریب پواسون فولاد و بتن اشاره کرد. در ادامه، کنترل خرابی‌ها به صورت تحلیلی با استفاده از آنالیز حساسیت بررسی شده و میزان تأثیر آن در کاهش یا افزایش ظرفیت تراورس بتنی پیش‌تنیده مشخص می‌شود. با توجه به جایگاه ویژه و ممتاز راه آهن به عنوان یکی از مهم ترین شریان های حیاتی سیستم حمل و نقل در کشور، بررسی و ارزیابی رفتار تراورس بتنی به عنوان زیرسازه اساسی در این نوع سیستم حمل و نقل، می تواند منجر به درک صحیح از عملکرد تراورس در حین دوره بارگذاری گردد. حاصل این درک صحیح، دستیابی به یک طراحی ایده آل، ایمن و پایدار خواهد بود. در شرایطی که بتوان در محیط نرم افزار، تاثیر متغییرهای موثر بر ظرفیت باربری تراورس های بتنی پیش ساخته را با در نظر گرفتن آنالیز حساسیت، بررسی نمود، می توان در عمل با دقت بالایی اقدام به طراحی و استفاده از این قطعات بتنی در ریل های راه آهن نمود.

۲- مبانی نظری و معرفی تراورس های بتنی

تراورس های بتنی ساده برای نخستین بار در سال ۱۹۰۶ میلادی به منظور استفاده بین دو شهر در کشور آلمان ساخته شد. به علت کمبود چوب و قیمت بالای آن و همچنین عدم خرده شدن بتن توسط حشرات و مقاومت بالای آن، کاربرد تراورس های بتنی بعد از جنگ جهانی دوم افزایش یافت. با افزایش سرعت خطوط و وزن محور چرخ ها، تراورس های بتنی ساده پاسخگوی نیاز این صنعت نبوده و ایجاد تغییراتی در ساختار تراورس به منظور بهبود عملکرد آن، ضروری بوده است. از زمان تولد علم مکانیک شکست در اوایل

قرن بیستم به علت کاربرد زیاد ماده ی بتنی از یکسو و رفتار شبه ترد آن از سوی دیگر، در حوزه ی بتن تعداد زیادی مطالعات عددی و تئوری بر روی ویژگی های شکست یک قطعه ی بتنی با در نظر گرفتن شرایط مختلف قطعه یا با در نظر گرفتن اندازه های مختلف انجام شده است. بتن، سنگی مصنوعی است که مقاومت فشاری 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 قطعه ی کامل برای باربری های مختلف دست پیدا کرد. ایده ی بتن مسلح و به طبع آن بتن پیش تنیده با فلسفه ی ارتقا دادن به این موضوع، ترکیبی را در بتن ایجاد کردند که نتایج مختلف نشانگر بهبود مشخصات و مکانیک شکستی در بتن شده است. وجود آرماتور باعث افزایش مقاومت کششی ماده کامپوزیت بتن و فولاد شده و پیش تنیدگی در فولاد باعث جلوگیری از ایجاد ترک و رشد ترک شده است[۲].

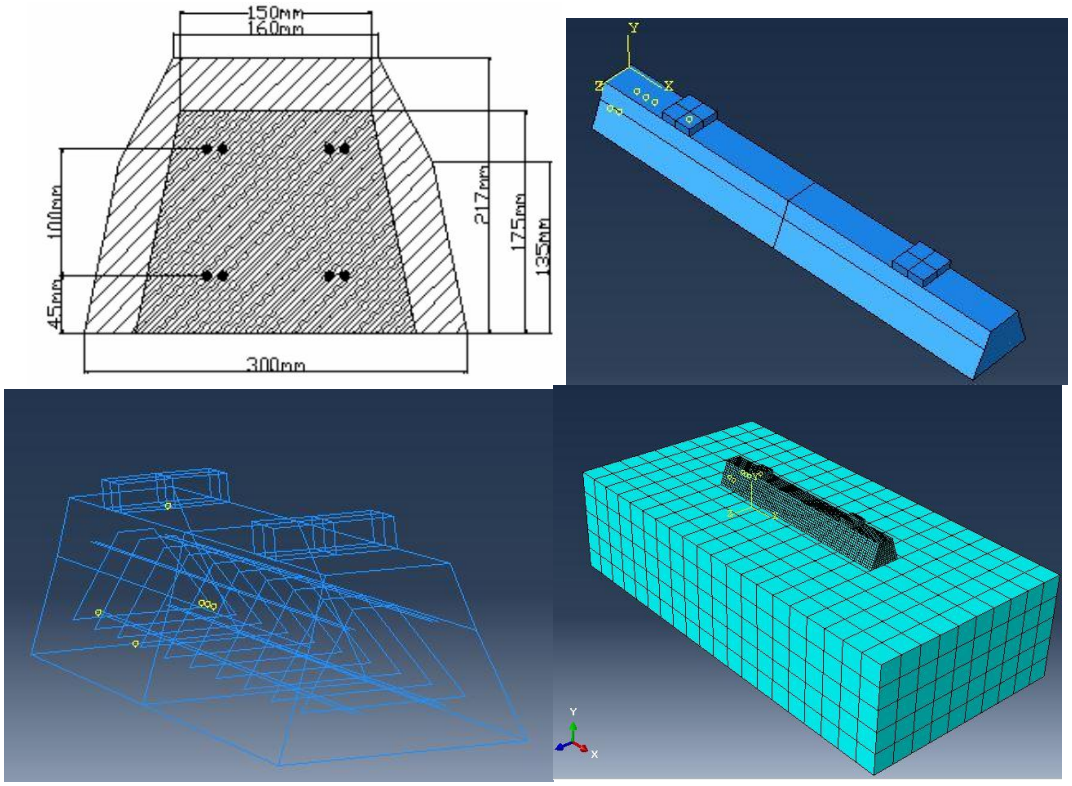
۳- پیشینه تحقیق

در سال ۲۰۱۲، رابرت پیترمن و همکاران، گزارشی تحت عنوان تعیین طول ناحیه‌ی انتقال در تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده ساخت ایالات متحده منتشر کردند. در این گزارش شش کارخانه‌ی تولید تراورسهای بتنی پیش تنیده توسط تیم محقق مورد بازدید قرار گرفتند و ۹ طرح اختلاط مختلف با ۱۰ نوع فولاد مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. در این مطالعه، مجموعا تعداد ۲۲۰ ناحیه انتقالی برای تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده اندازه‌گیری شد که در این مقیاس بی‌نظیر بود. خروجی نتایج این بررسی به صورت کرنش موجود در بتن گزارش شده است[۳]. در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹، نیکولا فابریس و همکاران، در مقالات جداگانه‌ای پارامترهای مؤثر بر طول ناحیه‌ی انتقال در بتن پیش‌تنیده را مورد بررسی قرار دادند. محققین در این مطالعه دریافتند که شناسایی صحیح نواحی انتهایی قطعه برای تعیین ناحیه‌ی انتقالی از اهمیت زیادی برخوردار است. به گونه‌ای که این ناحیه قادر به انتقال نیروی پیش‌تنیدگی از کابل‌های به بتن باشد[۴]. در سال ۲۰۱۹ ژئون و همکاران، مقاله‌ای تحت عنوان اندازه‌گیری ناحیه‌ی انتقال در بتن پیش‌تنیده با استفاده از تکنولوژی‌های اندازه‌گیری مختلف را منتشر کردند. در این مطالعه، محققین بر لزوم بررسی بیشتر ناحیه‌ی انتقالی در قطعات بتنی پیش‌تنیده تاکید کرده‌اند. آن‌ها در آزمایشات خود از کابل‌های هوشمندی استفاده کردند که در آن‌ها فیبرهای سنسوری چشمی تعبیه شده بود.کرنش‌های توزیع شده در طول ناحیه‌ی انتقالی در جاهای مختلف با استفاده از سنسورهای مخصوص اندازه‌گیری شدند[۵]. در سال ۲۰۲۰، نیکولا فابریس و همکاران، مقاله‌ای را تحت عنوان مدل‌سازی پیوستگی برای بررسی طول ناحیه انتقال در قطعات بتنی پیش‌تنیده منتشر کردند. آن‌ها دریافتند که برای مدل‌سازی پیوستگی نیاز به بررسی و شناخت کافی از اندرکنش بین فولاد و بتن پس از اعمال نیروی پیش‌تنیدگی می‌باشد. همچنین ناحیه‌ی انتقال که معرف فاصله‌ای است که نیروی پیش‌تنیدگی به صورت کاملا مؤثر از فولاد به بتن احاطه شده دور کابل می‌باشد، تاثیر زیادی در محاسبات مربوط به تیرهای بتنی پیش‌تنیده دارد. بدین منظورمحققین ناحیه‌ی انتقالی را بصورت استوانه‌ای توپر به دور کابل مدل‌سازی کرده و مورد بررسی قرار دادند[۶]. فرنام و همکاران در پژوهشی به تحلیل مکانیک شکست تراورس بتنی پیش تنیده با بررسی اثر اندازه پیش ترک پرداختند[۷]. در این مقاله، پارامترهای مهم تحلیل و طراحی مکانیک شکست از جمله سختی اولیه و سختی نهایی، نمودار بار-تغییرمکان، بار نهایی و انرژی قطعه محاسبه شده اند. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان می دهد که ویژگی های شکست بتن پیش تنیده ی تراورس با بتن معمولی متفاوت است به طوریکه 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 می یابند. همچنین نتایج نمودار بار-تغییرمکان نشان می دهد، بار نهایی و انرژی قطعه تراورس بتنی پیش تنیده با افزایش این نسبت به صورت تقریباً خطی کاهش می یابند. نتایج نشان می دهد با افزایش ۲۵ درصدی طول پیش ترک، سطح زیر نمودار بار-تغییرمکان ۳۷ درصد کاهش می یابد، در حالی که بار نهایی ۲۲ درصد کاهش می یابد. فرنام و رضایی در پژوهشی در سال ۱۳۹۷، به بررسی اثر ترک بر باربری تراورس بتنی پیش تنیده B70 با استفاده از تحلیل مکانیک شکست پرداختند[۸]. در این پژوهش، در بخش نرم افزاری مدل غیرخطی خرابی پلاستیک با استفاده از نرم افزار آباکوس و در برخش آزمایشگاهی، روش های رپلیکاگیری و تحلیل عکس مورد استفاده قرار گرفته است. تراورس ها با طول پیش ترک از صفر تا ۴۵ میلی متر و عرض پیش ترک از صفر تا ۸

میلی متر تحت بار سه نقطه ای لنگر خمشی منفی وسط دهانه قرار گرفته اند. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان داد، وجود پیش ترک، آن هم با عرض های بسیار کوچک، باعث کاهش بسیار زیاد نتایج آزمایش های ۲۸ روزه تراورس می شوند که در طراحی به روش مقاومت مصالح در نظر گرفته نشده است. به نظر می رسد به منظور تحلیل و طراحی تراوس نیاز به بازرسی های دقیق در مورد وجود عیب در قطعه وجود دارد تا در صورت نیاز با تحلیل مکانیک شکست به همراه تحلیل مقاومت مصالح، ظرفیت قطعه و به طبع آن عمر قطعه، تخمین زده شود. منیر عباسی و همکاران در پژوهشی به بررسی میدانی تاثیر صفحات لاستیکی زیر تراورس در مقاومت جانبی خطوط راه آهن پرداختند[۹]. در این پژوهش مقاومت جانبی خط به کمک روش تراورس منفرد و تجهیزات مربوط به آن به صورت میدانی اندازه گیری و ارائه شده است. نتایج به دست آمده از این مطالعه، نشان می دهد استفاده از پدهای الاستیک سخت در زیر تراورس موجب افزایش ۹,۶ درصدی مقاومت جانبی خط می گردند و استفاده از نوع نرم این پدها زیر تراورس، سبب کاهش ۲,۵۴ درصدی مقاومت جانبی خط می شوند و این در حالی است که با کاهش سختی پدها، نرخ کاهش مقاومت جانبی خط افزایش می یابد. اسماعیلی و قهاری در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر رفتار بتن تراورس پرداختند[۱۰]. در این مقاله تلاش شده است تا میزان افزایش مقدار مقاومت های کششی و خمشی و هم چنین کاهش مقاومت فشاری بتن مسلح شده به الیاف پلی پروپیلن با نظر به کاربرد آن در تراورس بتنی بررسی شود. به همین منظور با اضافه کردن مقادیر مختلفی از الیاف پلی پروپیلن به بتن تراورس و بررسی تأثیر آن بر رفتار ۷۲ نمونه ساخته شده، درنهایت مقدار بهینه ای برابر۰,۷ کیلوگرم بر مترمکعب شناسایی شد که این مقدار با مقادیر اعلام شده به وسیله سایر محققان همخوانی دارد. بررسی و تحلیل نتایج به دست آمده از آزمایش ها نظیر مقدار بهینه الیاف، نشان دهنده کاهش مقدار مقاومت فشاری، افزایش مقادیر مقاومت کششی، مقاومت خمشی و افزایشVB به ترتیب به میزان ۸,۷ ، ۳۳ ، ۱۰ و ۵۱ درصد می باشد. با توجه به آزمایش های انجام شده روی بتن الیافی و مشاهده تأثیر الیاف پلی پروپیلن روی رفتار بتن تراورس، مشخص شد که استفاده از مقدار الیاف بیش از ۲ کیلوگرم بر مترمکعب موجب کرموشدگی بتن و افت شدید مقاومت آن می شود. اما مقاومت کششی و مقاومت خمشی در این حالت به طور جزئی بهبود پیدا کرده است. توفیق و همکاران در پژوهشی به بررسی اثر خستگی تراورس های بحرانی سوزن با رویکرد تغییر در جنس بتن پرداختند[۱۱]. نتایج به دست آمده از این مطالعه حاکی از آن است که تراورس های بتن پلیمری نسبت به بتن معمولی، تعداد سیکل بیشتری دوام یافته اند، به نحوی که تراورس های بتن پلیمری در هر دو مسیر مستقیم و قوسی سوزن تا سه میلیون سیکل دوام یافتند. همچنین میزان آسیب کششی و فشاری بتن پلیمری کم تر از بتن معمولی بوده که خود نشان از طول عمر بهره برداری بیش تر از این نوع نسبت به بتن معمولی دارد. تاکنون مطالعات گسترده ای پیرامون رفتار دینامیکی انواع مختلف تراورس های بتنی انجام شده است. اما تاکنون شاهد انجام پژوهشی جامع در خصوص پارامترهای موثر بر ظرفیت باربری تراورس های بتنی پیش ساخته نبوده ایم. لذا در پژوهش حاضر، بررسی ظرفیت باربری تراورس بتنی پیش تنیده با در نظر گرفتن آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر میزان درگیری بین فولاد و بتن به صورت عددی، هدف اصلی در پژوهش حاضر است که مورد توجه قرار گرفته است.

۴- روش تحقیق

در پژوهش حاضر، بر روی تراورس بتنی پیش‌تنیده مطالعه می‌شود و بدین منظور از شبیه سازی رایانه‌ای توسط نرم افزار Abaquse، مبتنی بر روش‌های عددی برای آنالیز و کنترل جابجایی‌ها و تنش‌ها در تراورس بتنی استفاده می‌شود. پس از ساخت مدل مد نظر برای تراورس بتنی پیش‌تنیده، مدل مذکور مورد صحت‌سنجی قرار خواهد گرفت. پس از اطمینان از عملکرد صحیح مدل اجزاء محدود، از آن برای بررسی تأثیر پارامترهای مؤثر بر درگیری بتن و فولاد بر رفتار تراورس‌های بتنی پیش‌تنیده بهره گیری خواهد شد. توجه به این نکته ضروری است که در مدل های مورد مطالعه، به منظور بررسی تاثیر هر یک از متغییرهای مورد مطالعه بر روی ظرفیت باربری تراورس، تنها یک متغییر مورد مطالعه قرار گرفته و سایر متغییرها ثابت در نظر گرفته شده است.



شکل۱: ابعاد تراورس مدل شده در پژوهش حاضر در محیط نرم افزار آباکوس

جدول۱: مقادیر عددی متغییرهای مورد مطالعه به ازای سناریوهای مختلف در پژوهش حاضر

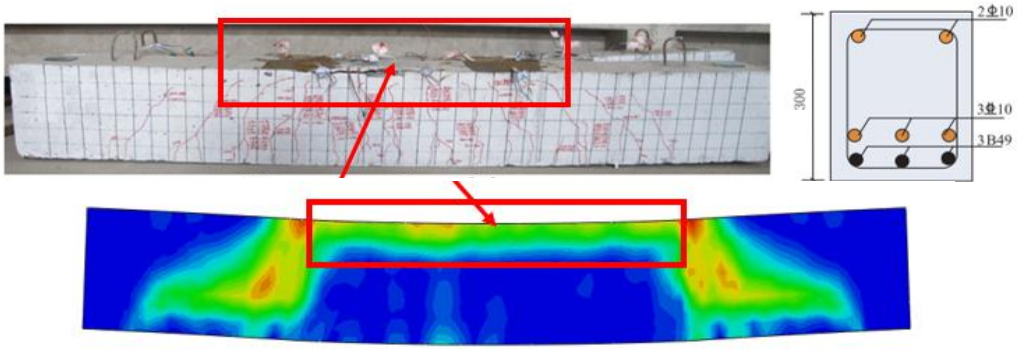
نام متغییر	مدل شاهد	سناریو ۱(۵٪)	سناریو۲(۵٪-)	سناریو۳(۱۰٪)	سناریو۴(۱۰٪-)
مقاومت فشاری(MPa)	۲۶,۴	۲۷,۷	۲۵,۰۸	۲۹,۰۴	۲۳,۷۶
مقاومت کششی(MPa)	۳,۳۱	۳,۴۷	۳,۱۴	۳,۶۴	۲,۹۸
مدول الاستیسیته بتن(MPa)	۲۵۴۹۵	۲۶۷۶۹,۷۵	۲۴۲۲۰,۲۵	۲۸۰۴۴,۵	۲۲۹۴۵,۵
مدول الاستیسیته فولاد(MPa)	۲۰۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰	۱۹۰۰۰۰	۲۲۰۰۰۰	۱۸۰۰۰۰
ضریب پواسون بتن	۰,۲	۰,۲۱	۰,۱۹	۰,۲۲	۰,۱۸
ضریب پواسون فولاد	۰,۳	۰,۳۱۵	۰,۲۸۵	۰,۳۳	۰,۲۷
قطر کابل (mm)	۷	۷,۳۵	۶,۶۵	۷,۷	۶,۳
فاصله کابل فولادی(mm)	۱۰۰	۱۰۵	۹۵	۱۱۰	۹۰

لازم به ذکر است، برای مدل سازی تراورس از مشخصات تراورس B70 به عنوان نمونه شاهد استفاده خواهد شدو در ادامه با در نظر گرفتن متغییرهای پژوهش، حالت های مختلف مدل سازی مورد بررسی قرار خواهد گرفت و نتایج به دست آمده در حالت های مختلف مدل سازی با نتایج مربوط به مدل شاهد مقایسه و ارزیابی خواهد شد. لازم به ذکر است، مدل شاهد به حالتی اطلاق می شود که در آن مقاومت فشاری بتن برابر با ۲۶,۴ مگاپاسکال، مقاومت کششی بتن برابر با ۳,۳۱ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته بتن۲۵۴۹۵۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع و مدول الاستیسیته فولاد برابر با ۲۰۰۰۰۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع، ضریب پواسون

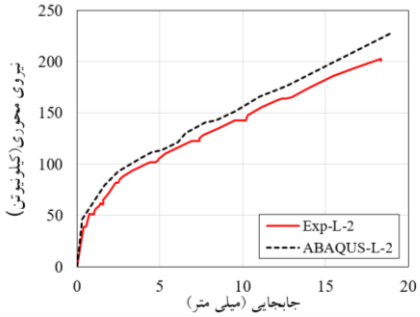
بتن ۰,۲ و ضریب پواسون فولاد برابر با ۰,۳، قطر کابل های فولادی برابر با ۷میلی مترو فاصله کابل ها از یکدیگر برابر با ۱۰۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. در تمام مدل ها، از ۸ کابل فولادی استفاده شده است. در شکل(۱) مقطع تراورس مربوط به مدل B70 نمایش داده شده است.

۵- صحت سنجی

با توجه به تشابه عملکرد تراورس و تیر بتنی، به منظور اطمینان از روش مدل سازی عددی در نرم افزار آباکوس، نمونه آزمایشگاهی با استفاده از نرم افزار شبیه سازی می شود و با نتایج آن مقایسه می گردد. نمونه تیر بتنی با مقطع ۲۲۰ در ۳۰۰ میلی متر با طول ۲۲۰۰ میلی متر با تکیه گاه ساده می باشد. میلگردهای عرضی از قطر ۸ با فاصله ۸۰ میلی متر و قلاب ۱۳۵ درجه ساخته شدند. مقاومت فشاری نمونه مکعبی ۱۵ سانتی متر دارای مقاومت ۴۳ مگاپاسکال می باشد. در این آزمایش از میلگردهای HRB400 فولادی با قطر ۱۰ میلی متر و میلگردهای BFRP با قطر ۱۰ میلی متر استفاده شده است. مقاومت تسلیم میلگردهای طولی ۴۰۰ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته فولاد برابر ۲۰۰ گیگاپاسکال و مقاومت نهایی آن ۵۸۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. مدول الاستیسیته میلگرد BFRP برابر ۴۹ گیگاپاسکال و مقاومت نهایی آن ۱۱۴۵ مگاپاسکال بود. در شکل(۲) نمونه تیر بعد از آزمایش و مقطع تیر و میلگردهای آن نشان داده شده است. بعد از مدل سازی تیر مد نظر در نرم افزار، خرابی ها در تیر در شکل (۲) نمایش داده شده است. همان طور که دیده می شود، ناحیه آسیب که همان خردشدگی بتن می باشد، در هر دو حالت آزمایشگاهی و عددی مطابقت خوبی دارد. در شکل (۳) منحنی بار-تغییرمکان آزمایشگاهی و عددی در یک گراف ترسیم شده است. همان طور که دیده می شود، تطابق خوبی در مقادیر سختی اولیه، نیروی ترک خوردگی، سختی ثانویه و همچنین روند کلی نمودار مربوط به نمونه عددی و نمونه آزمایشگاهی دیده می شود که بیانگر دقت بالای مدل سازی در پژوهش حاضر می باشد. لازم به ذکر است، نمونه مدل شده مربوط به یک مدل آزمایشگاهی ساخته شده در موسسه شهید رجایی تهران (قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء) می باشد.



شکل۲: مدل آزمایشگاهی و نرم افزاری مربوط به تیر بتنی به منظور صحت سنجی



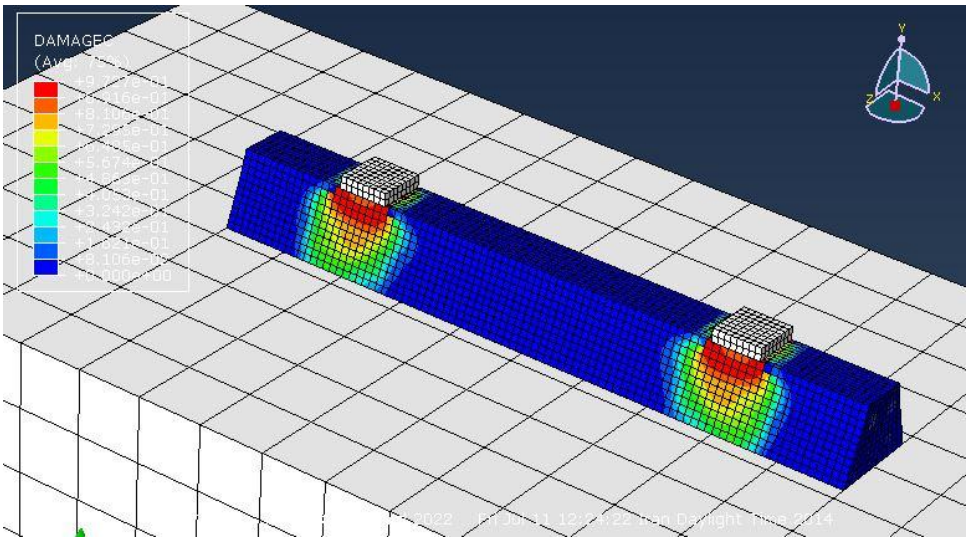
شکل۳: مقایسه بین نتایج منحنی بار-تغییرمکان تیر بتنی در آزمایشگاه و نمونه مدل سازی شده عددی به منظور صحت سنجی

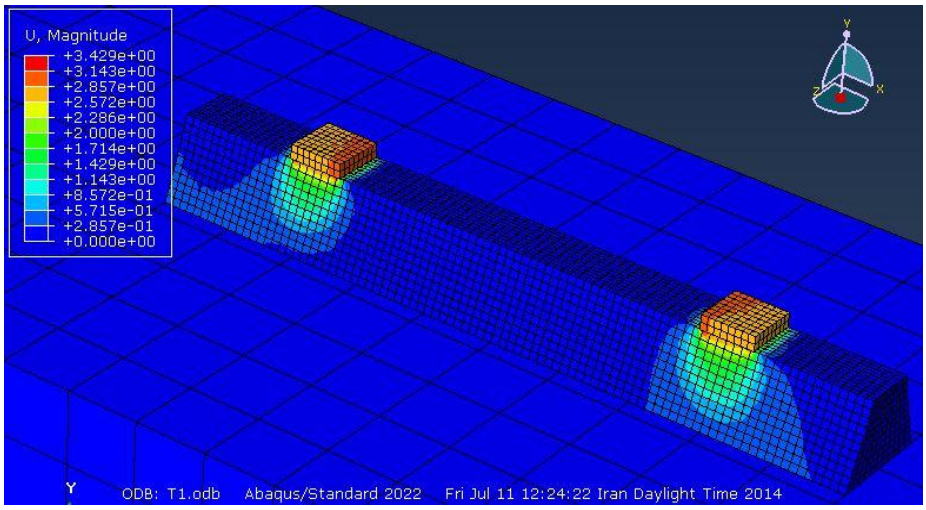
۶- نتایج تحلیل

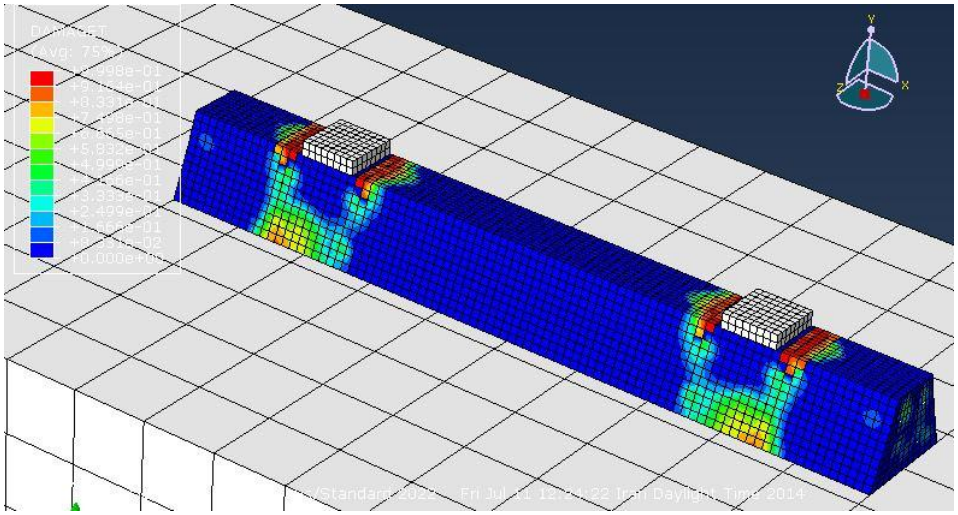
مهم ترین متغییرهای مد نظر در پژوهش حاضر، شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول الاستیسینه بتن و فولاد، ضریب پواسون بتن و فولاد، قطر کابل ها و فاصله قائم میان آرماتور ها می باشد. تعداد مدل های بررسی شده در پژوهش حاضر شامل ۳۳ مدل مختلف خواهد بود.(۸ متغییر مختلف، هر متغییر به ازای ۴ مقدار مختلف عددی=۳۲ حالت + ۱ حالت مدل شاهد). به منظور بررسی تاثیر هر یک از متغییرها، نتایج به دست از تحلیل مدل ها با نتایج مربوط به مدل شاهد مقایسه شده است. لازم به ذکر است، با توجه به تعداد بالای نمونه های مورد بررسی، تصاویر گرافیکی از نرم افزار برای تمام مدل ها ارائه نشده و با توجه به تشابه گرافیک ایجاد شده برای مدل های مشترک، نتایج به صورت عددی برای تمام مدل ها ارائه و ارزیابی شده است. با توجه به این که هر یک از متغییرهای بررسی شده دارای ۴ مقدار عددی است، لذا آنالیز حساسیت پارامترها و متغییرهای مختلف بررسی شده در پژوهش حاضر، با در نظر گرفتن نتایج مربوط به هر ۴ مقدار مختلف عددی برای هر یک از متغییرها لحاظ شده و نتایج با نتایج مدل شاهد، مقایسه شده است. نتایج بررسی شده در پژوهش حاضر شامل تنش فشاری، تغییرمکان ایجاد شده، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری تراورس در حالت های مختلف مدل سازی می باشد.

۶-۱- نتایج مدل شاهد

مدل شاهد در پژوهش حاضر، با نماد T1 معرفی شده است. در این مدل، مقاومت فشاری بتن ۲۶,۴ مگاپاسکال، مقاومت کششی بتن، ۳,۳۱ مگاپاسکال، مدول الاستیسیته بتن و فولاد به ترتیب برابر با ۲۵۴۹۵ و ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال، ضریب پواسون بتن و فولاد به ترتیب برابر با ۰,۲ و ۰,۳ در نظر گرفته شده است. همچنین در مدل شاهد از ۸ آرماتور طولی به قطر ۷ میلی متر استفاده شده است و فاصله قائم استقرار آرماتورها برابر با ۱۰۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. در شکل(۴) تنش فشاری ایجاد شده در تراورس بتنی شاهد، نمایش داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می شود، بیشینه تنش فشاری ایجاد شده در تراورس در محل اعمال بار متمرکز و برابر با ۰,۹۷ مگاپاسکال حاصل شده است. همچنین در شکل(۴) بیشینه جابجایی قائم ایجاد شده در تراورس بتنی مدل شاهد، نمایش داده شده است. بیشینه جابجایی قائم مدل شاهد برابر با ۲,۸۵ میلی متر به دست آمده است. در شکل(۴) ترک خوردگی کششی در تراورس بتنی مدل شاهد و برابر با ۰,۹۹ مگاپاسکال به دست آمده است. در شکل(۵) منحنی ظرفیت مربوط به مدل شاهد نمایش داده شده است. با توجه به ابعاد پد بتنی استقرار یافته بر روی وجه فوقانی تراورس، ظرفیت باربری تراورس بتنی در حالت شاهد، برابر با ۲,۱۲ مگاپاسکال حاصل شده است.

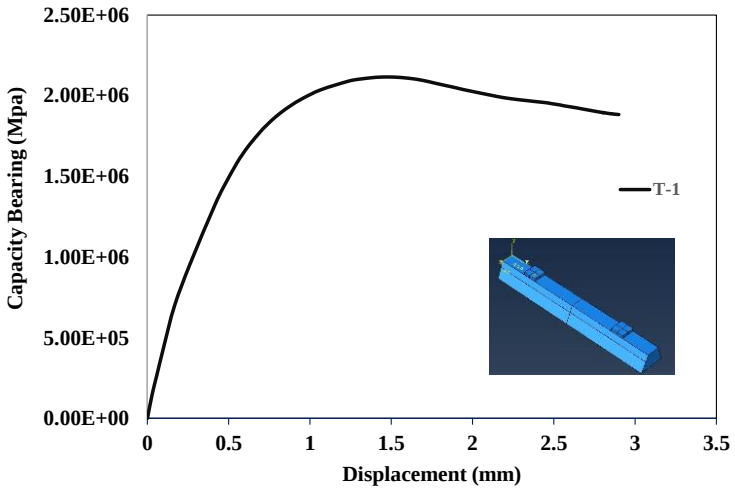






شکل۴: تنش فشاری، تغییرمکان و ترک خوردگی ایجاد شده در تراورس بتنی مدل شاهد

منحنی ظرفیت تراورس بتنی نمونه شاهد



شکل۵: منحنی ظرفیت تراورس بتنی مدل T1

۶-۲- بررسی تاثیر قطر آرماتور بر پاسخ های تراورس

نتایج به دست آمده در جدول(۲) نشان می دهد، با افزایش قطر آرماتور، شاهد کاهش پارامترهای تنش فشاری، جابجایی قائم و افزایش ظرفیت باربری تراورس بتنی خواهیم بود. در نقطه مقابل با کاهش قطر آرماتور طولی، پارامترهای تنش فشاری و جابجایی قائم روند صعودی داشته و ظرفیت باربری تراورس کاهش یافته است. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، به ازای افزایش ۱۰درصدی قطر آرماتور (تبدیل قطر آرماتور از ۷ به ۷,۷ میلی متر)، به ترتیب پارامترهای تنش فشاری و بیشینه جابجایی قائم، ۷,۸۳٪ و ۲۷٪ کاهش و پارامتر ظرفیت باربری تراورس، ۲,۸۳٪ افزایش یافته است. در حالی که به ازای کاهش ۱۰ درصدی قطر آرماتور(تبدیل قطر آرماتور از ۷ به ۶,۳ میلی متر)، به ترتیب پارامترهای تنش فشاری و بیشینه جابجایی قائم، ۱,۳۴٪ و ۱۰۵٪ افزایش و پارامتر ظرفیت باربری تراورس، ۶,۶٪ کاهش یافته است. لازم به ذکر است، با تغییر قطر آرماتور، تغییری در پارامتر ترک خوردگی کششی تراورس حاصل نشده و می توان نتیجه گرفت، ترک خوردگی کششی تراورس مستقل از پارامتر قطر آرماتور طولی پیش تنیده در تراورس بتنی می باشد.

جدول۲: بررسی تاثیر قطر آرماتورهای تراورس بر پاسخ های مورد بررسی

نام مدل (قطر آرماتور)	T1 (7mm)	T2 (6.3mm)	T3(7.7mm)	T4 (6.65mm)	T5(7.35mm)
بیشینه تنش فشاری(MPa)	۰,۹۷	۰,۹۸۳	۰,۸۹۴	۰,۹۷۸	۰,۹۰۶
بیشینه جابجایی قائم(mm)	۲,۸۵	۵,۸۷	۲,۰۸	۴,۲	۲,۲۸
ترک خوردگی کششی(MPa)	۰,۹۹	۰,۹۹	۰,۹۹	۰,۹۹	۰,۹۹
ظرفیت باربری(MPa)	۲,۱۲	۱,۹۸	۲,۱۸	۲,۰۵	۲,۱۵

۶-۳ - بررسی تاثیر فاصله عمودی آرماتور بر پاسخ های تراورس

نتایج به دست آمده در جدول(۳) نشان می دهد، با افزایش فاصله عمودی آرماتورها، شاهد افزایش پارامترهای تنش فشاری و جابجایی در تراورس بتنی خواهیم بود. در نقطه مقابل با کاهش فاصله عمودی آرماتورهای طولی، پارامترهای تنش فشاری و جابجایی قائم تراورس کاهش یافته است. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، به ازای افزایش ۱۰درصدی فاصله عمودی آرماتور (تبدیل فاصله استقرار آرماتور از ۱۰۰ به ۱۱۰ میلی متر)، به ترتیب پارامترهای تنش فشاری و بیشینه جابجایی قائم، ۱,۳۴٪ و ۱۹,۶٪ افزایش یافته است. در حالی که به ازای کاهش ۱۰ درصدی فاصله عمودی آرماتورها (تبدیل فاصله آرماتورها از ۱۰۰ به ۹۰ میلی متر)، به ترتیب پارامترهای تنش فشاری و بیشینه جابجایی قائم، ۸,۰۵٪ و ۱۰,۵٪ کاهش یافته است. لازم به ذکر است، با تغییر فاصله عمودی بین آرماتورها، تغییر محسوسی در دو پارامتر ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری تراورس حاصل نشده و می توان نتیجه گرفت، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری تراورس مستقل از پارامتر فاصله بین استقرار آرماتورهای طولی پیش تنیده در تراورس بتنی می باشد.

جدول۳: بررسی تاثیر فاصله عمودی آرماتورهای تراورس بر پاسخ های مورد بررسی

نام مدل (فاصله آرماتور)	T1 (100mm)	T6 (90mm)	T7(110mm)	T8 (95mm)	T9(105mm)
بیشینه تنش فشاری(MPa)	۰,۹۷	۰,۸۹۲	۰,۹۸۳	۰,۹۴	۰,۹۷۵
بیشینه جابجایی قائم(mm)	۲,۸۵	۲,۵۵	۳,۴۱	۲,۷۵	۳,۰۷
ترک خوردگی کششی(MPa)	۰,۹۹	۰,۹۹	۰,۹۹	۰,۹۹	۰,۹۹
ظرفیت باربری(MPa)	۲,۱۲	۲,۱۲	۲,۱۳	۲,۱۲	۲,۱۲

۶-۴ - بررسی تاثیر مقاومت فشاری بتن بر پاسخ های تراورس

نتایج به دست آمده درجدول(۴) نشان می دهد، با افزایش مقاومت فشاری بتن، شاهد افزایش پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری در تراورس بتنی خواهیم بود. در نقطه مقابل با کاهش مقاومت فشاری بتن، پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری تراورس کاهش یافته است. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، به ازای افزایش ۱۰درصدی مقاومت فشاری بتن (تبدیل مقاومت فشاری بتن از ۲۶,۴ به ۲۹,۰۴ مگاپاسکال)، به ترتیب پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری بتن ۰,۳۱٪، ۲,۰۲٪ و ۰,۹۴٪ افزایش یافته است. در حالی که به ازای کاهش ۱۰ درصدی مقاومت فشاری بتن (تبدیل مقاومت فشاری از ۲۶,۴ به ۲۳,۷۶ مگاپاسکال) به ترتیب پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی بتن و ظرفیت باربری بتن، ۱,۵۵٪ ، ۰,۵٪ و ۰,۹۴٪ کاهش یافته است. لازم به ذکر است، با افزایش مقاومت فشاری بتن، شاهد کاهش تغییرمکان قائم در تراورس بتنی خواهیم بود. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، به ازای افزایش ۱۰درصدی مقاومت فشاری بتن (تبدیل مقاومت فشاری بتن از ۲۶,۴ به ۲۹,۰۴ مگاپاسکال)، بیشینه تغییرمکان قائم در تراورس بتنی ۱,۴٪ کاهش یافته است. در حالی که کاهش ۱۰درصدی مقاومت فشاری بتن، بیشینه تغییرمکان قائم تراورس را ۲,۱۱٪ افزایش داده است.

جدول۴: بررسی تاثیر مقاومت فشاری بتن تراورس بر پاسخ های مورد بررسی

نام مدل (مقاومت فشاری)	T1 (26.4MPa)	T10 (23.76MPa)	T11 (29.04MPa)	T12 (25.08MPa)	T13(27.7MPa)
بیشینه تنش فشاری(MPa)	۰,۹۷	۰,۹۵۵	۰,۹۷۳	۰,۹۶۳	۰,۹۷۱
بیشینه جابجایی قائم(mm)	۲,۸۵	۲,۹۱	۲,۸۱	۲,۸۸	۲,۸۳
ترک خوردگی کششی(MPa)	۰,۹۹	۰,۹۸۵	۱,۰۱	۰,۹۸۸	۱
ظرفیت باربری(MPa)	۲,۱۲	۲,۱۰	۲,۱۴	۲,۱۱	۲,۱۳

۶-۵- بررسی تاثیر مقاومت کششی فولاد بر پاسخ های تراورس

نتایج به دست آمده درجدول(۵) نشان می دهد، با افزایش مقاومت کششی فولاد، شاهد افزایش پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری در تراورس بتنی خواهیم بود. در حالی که با کاهش مقاومت کششی فولاد، پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری تراورس کاهش یافته است. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، به ازای افزایش ۱۰درصدی مقاومت کششی فولاد (تبدیل مقاومت کششی فولاد از ۳,۳۱ به ۳,۶۴ مگاپاسکال)، به ترتیب پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری بتن ۰,۲۰٪، ۰,۸٪ و ۰,۴۷٪ افزایش یافته است. در حالی که به ازای کاهش ۱۰

درصدی مقاومت فشاری بتن (تبدیل مقاومت کششی فولاد از ۳,۳۱ به ۲,۹۸ مگاپاسکال) به ترتیب پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی بتن و ظرفیت باربری بتن، ۱,۰۳٪ ،۰,۳٪ و ۰,۴۷٪ کاهش یافته است. لازم به ذکر است، با افزایش مقاومت کششی فولاد، شاهد کاهش تغییرمکان قائم در تراورس بتنی خواهیم بود. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، به ازای افزایش۱۰درصدی مقاومت کششی فولاد (تبدیل مقاومت کششی فولاد از ۳,۳۱ به ۳,۶۴ مگاپاسکال)، بیشینه تغییرمکان قائم در تراورس بتنی ۱,۰۵٪ کاهش یافته است. در حالی که کاهش ۱۰درصدی مقاومت کششی فولاد، بیشینه تغییرمکان قائم تراورس را ۱,۴٪ افزایش داده است.

جدول۵: بررسی تاثیر مقاومت فشاری فولاد تراورس بر پاسخ های مورد بررسی

نام مدل (مقاومت کششی)	T1 (3.31MPa)	T14 (2.98MPa)	T15 (3.64MPa)	T16 (3.14MPa)	T17(3.47MPa)
بیشینه تنش فشاری(MPa)	۰,۹۷	۰,۹۶	۰,۹۷۲	۰,۹۶۸	۰,۹۷
بیشینه جابجایی قائم(mm)	۲,۸۵	۲,۸۹	۲,۸۲	۲,۸۶	۲,۸۴
ترک خوردگی کششی(MPa)	۰,۹۹	۰,۹۸۷	۰,۹۹۸	۰,۹۸۹	۰,۹۹۴
ظرفیت باربری(MPa)	۲,۱۲	۲,۱۱	۲,۱۳	۲,۱۱۶	۲,۱۲۳

۶-۶- بررسی تاثیر مدول الاستیسیته بتن بر پاسخ های تراورس

نتایج به دست آمده درجدول(۶) موید آن است که با افزایش مدول الاستیسته بتن، شاهد افزایش پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری در تراورس بتنی خواهیم بود. در حالی که با کاهش مدول الاستیسیته بتن، پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری تراورس روند کاهشی را تجربه کرده است. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، به ازای افزایش ۱۰درصدی مدول الاستیسیته بتن (تبدیل مدول بتن از۲۵۴۹۵ به ۲۸۰۴۴,۵ مگاپاسکال)، به ترتیب پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری بتن ۱,۵۴٪ ،۱,۰۱٪ و ۰,۹۴٪ افزایش یافته است. در حالی که به ازای کاهش ۱۰ درصدی مدول الاستیسیته بتن (تبدیل مدول بتن از۲۵۴۹۵ به ۲۲۹۴۵,۵ مگاپاسکال) به ترتیب پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی بتن و ظرفیت باربری بتن، ۳,۱٪ ،۰,۸۱٪ و ۰,۷۵٪ کاهش یافته است. لازم به ذکر است، با افزایش مدول الاستیسته بتن، شاهد کاهش تغییرمکان قائم در تراورس بتنی خواهیم بود. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، به ازای افزایش۱۰درصدی مدول الاستیسته بتن، بیشینه تغییرمکان قائم در تراورس بتنی ۱,۴٪ کاهش یافته است. در حالی که کاهش ۱۰درصدی مدول الاستیسته بتن، بیشینه تغییرمکان قائم تراورس را ۲,۴۵٪ افزایش داده است.

جدول۶: بررسی تاثیر مدول الاستیسیته بتن بر پاسخ های مورد بررسی

نام مدل (مدول بتن)	T1 (25495MPa)	T18 (22945.5MPa)	T19 (28044.5 MPa)	T20 (24220.25 MPa)	T21(26769.75 MPa)
بیشینه تنش فشاری(MPa)	۰,۹۷	۰,۹۴	۰,۹۸۵	۰,۹۵۵	۰,۹۸
بیشینه جابجایی قائم(mm)	۲,۸۵	۲,۹۲	۲,۸۱	۲,۸۷	۲,۸۳
ترک خوردگی کششی(MPa)	۰,۹۹	۰,۹۸۲	۱	۰,۹۸۵	۰,۹۹۶
ظرفیت باربری(MPa)	۲,۱۲	۲,۱۰۴	۲,۱۴	۲,۱۱۲	۲,۱۳۴

۶-۷- بررسی تاثیر مدول الاستیسیته فولاد بر پاسخ های تراورس

نتایج به دست آمده درجدول(۷) موید آن است که تغییر در پارامتر مدول الاستیسیته فولاد، تاثیر محسوسی بر روی دو پارامتر تنش فشاری و ترک خوردگی کششی بتن نداشته است و به بیان دیگر می توان دو پارامتر تنش فشاری و ترک خوردگی کششی بتن را مستقل از پارامتر مدول الاستیسیته فولاد در نظر گرفت. سایر نتایج به دست آمده از این بررسی نشان داد، با افزایش پارامتر مدول الاستیسیته فولاد، شاهد کاهش بیشینه جابجایی قائم تراورس و افزایش ظرفیت باربری تراورس خواهیم بود. به نحوی که به ازای افزایش۱۰درصدی مدول الاستیسیته فولاد (تبدیل مدول فولاد از۲۰۰۰۰۰ به ۲۲۰۰۰۰ مگاپاسکال)، پارامترهای جابجایی قائم و ظرفیت باربری تراورس به ترتیب ۱,۷۵٪ کاهش و ۰,۵۲٪ افزایش یافته است. در حالی که به ازای کاهش ۱۰ درصدی مدول الاستیسیته فولاد (تبدیل مدول فولاد از۲۰۰۰۰۰ به ۱۸۰۰۰۰ مگاپاسکال) پارامترهای بیشینه جابجایی قائم تراورس و ظرفیت باربری بتن، به ترتیب ۱,۷۵٪ افزایش و ۰,۶۶٪ کاهش یافته است.

جدول۷: بررسی تاثیر مدول الاستیسیته فولاد بر پاسخ های مورد بررسی

نام مدل (مدول فولاد)	T1 (200000MPa)	T22 (180000MPa)	T23 (220000 MPa)	T24 (190000MPa)	T25 (210000 MPa)
بیشینه تنش فشاری(MPa)	۰,۹۷	۰,۹۷	۰,۹۷	۰,۹۷	۰,۹۷
بیشینه جابجایی قائم(mm)	۲,۸۵	۲,۹۰	۲,۸۰	۲,۸۸	۲,۸۲
ترک خوردگی کششی(MPa)	۰,۹۹	۰,۹۹	۰,۹۹	۰,۹۹	۰,۹۹
ظرفیت باربری(MPa)	۲,۱۲	۲,۱۰۶	۲,۱۳۱	۲,۱۱	۲,۱۲۹

۶-۸- بررسی تاثیر ضریب پواسون بتن بر پاسخ های تراورس

نتایج به دست آمده درجدول(۸) موید آن است که با افزایش ضریب پواسون بتن، شاهد افزایش پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری در تراورس بتنی خواهیم بود. در حالی که با کاهش ضریب پواسون بتن، پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری تراورس از یک الگوی تنزلی، پیروی کرده است. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، به ازای افزایش۱۰درصدی ضریب پواسون بتن (تبدیل پواسون بتن از ۰,۲ به ۰,۲۲)، به ترتیب پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری بتن ۱,۰۳٪ ،۰,۵۱٪ و ۰,۵۷٪ افزایش یافته است. در حالی که به ازای کاهش ۱۰ درصدی ضریب پواسون بتن (تبدیل پواسون بتن از ۰,۲ به ۰,۱۸) به ترتیب پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی بتن و ظرفیت باربری بتن، ۲,۰۶٪ ۰,۵۱٪ و ۰,۹۴٪ کاهش یافته است. لازم به ذکر است، با افزایش ضریب پواسون بتن، شاهد کاهش تغییرمکان قائم در تراورس بتنی خواهیم بود. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، به ازای افزایش۱۰درصدی ضریب پواسون بتن، بیشینه تغییرمکان قائم در تراورس بتنی ۱,۰۵٪ کاهش یافته است. در حالی که کاهش ۱۰درصدی ضریب پواسون بتن، بیشینه تغییرمکان قائم تراورس را ۱,۷۵٪ افزایش داده است.

جدول۸: بررسی تاثیر ضریب پواسون بتن بر پاسخ های مورد بررسی

نام مدل (پواسون بتن)	T1 (0.2)	T26(0.18)	T27 (0.22)	T28(0.19)	T29(0.21)
بیشینه تنش فشاری(MPa)	۰,۹۷	۰,۹۵	۰,۹۸	۰,۹۶۱	۰,۹۷۳
بیشینه جابجایی قائم(mm)	۲,۸۵	۲,۹۰	۲,۸۲	۲,۸۶	۲,۸۴
ترک خوردگی کششی(MPa)	۰,۹۹	۰,۹۸۵	۰,۹۹۵	۰,۹۸۸	۰,۹۹۲
ظرفیت باربری(MPa)	۲,۱۲	۲,۱	۲,۱۳۲	۲,۱۱	۲,۱۲۸

۶-۹- بررسی تاثیر ضریب پواسون فولاد بر پاسخ های تراورس

نتایج به دست آمده درجدول(۹) نشان می دهد که تغییر در پارامتر ضریب پواسون فولاد، تاثیری بر روی دو پارامتر تنش فشاری و ترک خوردگی کششی بتن نداشته است و به بیان دیگر می توان دو پارامتر تنش فشاری و ترک خوردگی کششی بتن را مستقل از پارامتر ضریب پواسون فولاد در نظر گرفت. سایر نتایج به دست آمده از این بررسی نشان داد، با افزایش پارامتر ضریب پواسون فولاد، شاهد کاهش بیشینه جابجایی قائم تراورس و افزایش ظرفیت باربری تراورس خواهیم بود. به نحوی که به ازای افزایش۱۰درصدی ضریب پواسون فولاد (تبدیل ضریب پواسون فولاد از۰,۳ به ۰,۳۳)، پارامترهای جابجایی قائم و ظرفیت باربری تراورس به ترتیب ۱,۰۵٪ کاهش و ۰,۱۹٪ افزایش یافته است. در حالی که به ازای کاهش ۱۰ درصدی ضریب پواسون فولاد (تبدیل ضریب پواسون فولاد از۰,۳ به ۰,۲۷) پارامترهای بیشینه جابجایی قائم تراورس و ظرفیت باربری بتن، به ترتیب ۱,۴۱٪ افزایش و ۰,۳۳٪ کاهش یافته است.

جدول۹: بررسی تاثیر ضریب پواسون فولاد بر پاسخ های مورد بررسی

نام مدل (پواسون فولاد)	T1 (0.3)	T30 (0.27)	T31 (0.33)	T32(0.285)	T33(0.315)
بیشینه تنش فشاری(MPa)	۰,۹۷	۰,۹۷	۰,۹۷	۰,۹۷	۰,۹۷
بیشینه جابجایی قائم(mm)	۲,۸۵	۲,۸۹	۲,۸۲	۲,۸۶	۲,۸۴
ترک خوردگی کششی(MPa)	۰,۹۹	۰,۹۹	۰,۹۹	۰,۹۹	۰,۹۹
ظرفیت باربری(MPa)	۲,۱۲	۲,۱۱۳	۲,۱۲۴	۲,۱۱۵	۲,۱۲۲

۷- جمع بندی و نتیجه گیری

مهم ترین نتایج به دست آمده از این مطالعه، به شرح زیر قابل بیان است:

۱) با افزایش قطر آرماتور، شاهد کاهش پارامترهای تنش فشاری، جابجایی قائم و افزایش ظرفیت باربری تراورس بتنی خواهیم بود. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، میزان حساسیت پاسخ های تنش فشاری، تغییرمکان، و ظرفیت باربری تراورس به پارامتر قطر آرماتور طولی(کابل ها) به ترتیب در بازه ی ۷,۸۳٪- تا ۱,۳۴٪، ۲۷٪- تا ۱۰۵٪ و ۲,۸۳٪ تا ۶,۶٪- قرار گرفته است. لازم به ذکر است، با تغییر قطر آرماتور، تغییری در پارامتر ترک خوردگی کششی تراورس حاصل نشده و می توان نتیجه گرفت، ترک خوردگی کششی تراورس مستقل از پارامتر قطر آرماتور طولی پیش تنیده در تراورس بتنی می باشد.

۲) با افزایش فاصله عمودی آرماتورها، شاهد افزایش پارامترهای تنش فشاری و جابجایی در تراورس بتنی خواهیم بود. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، میزان حساسیت پاسخ های تنش فشاری و تغییرمکان تراورس به پارامتر فاصله عمودی استقرار آرماتور طولی(کابل ها) به ترتیب در بازه ی ۱,۳۴٪ تا ۸,۰۵٪- و ۱۹,۶٪ تا ۱۰,۵٪- قرار گرفته است. همچنین با تغییر فاصله عمودی بین آرماتورها، تغییر محسوسی در دو پارامتر ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری تراورس حاصل نشده و می توان نتیجه گرفت، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری تراورس مستقل از پارامتر فاصله بین استقرار آرماتورهای طولی پیش تنیده در تراورس بتنی می باشد.

۳) با افزایش مقاومت فشاری بتن، شاهد افزایش پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری در تراورس بتنی خواهیم بود. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، میزان حساسیت پاسخ های تنش فشاری، تغییرمکان، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری تراورس به پارامتر مقاومت فشاری بتن به ترتیب در بازه ی ۰,۳۱٪ تا ۱,۵۵٪-، ۱,۴٪- تا ۲,۱۱٪، ۲,۰۲٪ تا ۰,۵٪- و ۰,۹۴٪ تا ۰,۹۴٪- قرار گرفته است.

۴) با افزایش مقاومت کششی فولاد، شاهد افزایش پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری و کاهش تغییرمکان قائم ایجاد شده در تراورس بتنی خواهیم بود. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، میزان حساسیت پاسخ های تنش فشاری، تغییرمکان، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری تراورس به پارامتر مقاومت کششی فولاد به ترتیب در بازه ی ۰,۲٪ تا ۱,۰۳٪-، ۱,۰۵٪- تا ۱,۴٪، ۰,۸٪ تا ۰,۳٪- و ۰,۴۷٪ تا ۰,۴۷٪- قرار گرفته است.

۵) نتایج به دست آمده موید آن است که با افزایش مدول الاستیسته بتن، شاهد افزایش پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری و کاهش تغییرمکان قائم در تراورس بتنی خواهیم بود. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، میزان حساسیت پاسخ های تنش فشاری، تغییرمکان، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری تراورس به پارامتر مدول الاستیسیته بتن به ترتیب در بازه ی ۱,۵۴٪ تا ۳,۱٪-، ۱,۴٪- تا ۲,۴۵٪، ۱,۰۱٪ تا ۰,۸۱٪- و ۰,۹۴٪ تا ۰,۷۵٪- قرار گرفته است.

۶) نتایج به دست آمده نشان می دهد که تغییر در پارامتر مدول الاستیسیته فولاد، تاثیر محسوسی بر روی دو پارامتر تنش فشاری و ترک خوردگی کششی بتن نداشته است و به بیان دیگر می توان دو پارامتر تنش فشاری و ترک خوردگی کششی بتن را مستقل از پارامتر مدول الاستیسیته فولاد در نظر گرفت. سایر نتایج به دست آمده از این بررسی نشان داد، با افزایش پارامتر مدول الاستیسیته فولاد، شاهد کاهش بیشینه جابجایی قائم تراورس و افزایش ظرفیت باربری تراورس خواهیم بود. به نحوی که نتایج موبد آن است که میزان حساسیت پاسخ های تغییرمکان و ظرفیت باربری تراورس به پارامتر مدول الاستیسیته فولاد به ترتیب در بازه ی ۱,۷۵٪- تا ۱,۷۵٪ و ۰,۵۲٪ تا ۰,۶۶٪- قرار گرفته است.

۷) نتایج به دست آمده موید آن است که با افزایش ضریب پواسون بتن، شاهد افزایش پارامترهای تنش فشاری، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری و کاهش تغییرمکان قائم در تراورس بتنی خواهیم بود. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، میزان حساسیت پاسخ های تنش فشاری، تغییرمکان، ترک خوردگی کششی و ظرفیت باربری تراورس به پارامتر ضریب پواسون بتن به ترتیب در بازه ی ۱,۰۳٪ تا ۲,۰۶٪-، ۱,۰۵٪- تا ۱,۷۵٪، ۰,۵۱٪ تا ۰,۵۱٪- و ۰,۵۷٪ تا ۰,۹۴٪- قرار گرفته است.

۸) نتایج به دست آمده نشان می دهد که تغییر در پارامتر ضریب پواسون فولاد، تاثیری بر روی دو پارامتر تنش فشاری و ترک خوردگی کششی بتن نداشته است و به بیان دیگر می توان دو پارامتر تنش فشاری و ترک خوردگی کششی بتن را مستقل از پارامتر ضریب پواسون فولاد در نظر گرفت. سایر نتایج به دست آمده از این بررسی نشان داد، با افزایش پارامتر ضریب پواسون فولاد، شاهد کاهش بیشینه جابجایی قائم تراورس و افزایش ظرفیت باربری تراورس خواهیم بود. به نحوی که نتایج به دست آمده نشان می دهد، میزان حساسیت پاسخ های تغییرمکان و ظرفیت باربری تراورس به پارامتر ضریب پواسون فولاد به ترتیب در بازه ی ۱,۰۵٪- تا ۱,۴۱٪ و ۰,۵۲٪ تا ۱,۴۱٪- قرار گرفته است.

۹) با توجه به نتایج به دست آمده از این مطالعه مشاهده شد، موثرترین متغییرهای تاثیر گذار بر پارامتر ظرفیت باربری تراورس به شرح زیر رتبه بندی می شوند:

۱.پارامتر قطر آرماتورهای کششی با نرخ اثرگذاری۲,۸٪ تا ۶,۶٪-

۲.پارامتر فشاری بتن با نرخ اثرگذاری ۰,۹۴٪ تا ۰,۹۴٪-

۳.پارامتر مدول الاستیسته بتن با نرخ اثرگذاری ۰,۹۴٪ تا ۰,۷۵٪-

۴.پارامتر ضریب پواسون بتن با نرخ اثرگذاری ۰,۵۷٪ تا ۰,۹۴٪-

۵.پارامتر مدول الاستیسته فولاد با نرخ اثرگذاری ۰,۵۲٪ تا ۰,۶۶٪-

۶.پارامتر تنش کششی فولاد با نرخ اثرگذاری ۰,۴۷٪ تا ۰,۴۷٪-

۷.پارامتر فاصله استقرار آرماتور با حداکثر نرخ اثرگذاری ۰,۴۷٪ تا ۰٪

۸.پارامتر ضریب پواسون فولاد با حداکثر نرخ اثرگذاری ۰,۱۹٪ تا ۰,۳۳٪-

۸- مراجع

۱- مستوفی‌نژاد، داود، سازه‌های بتن آرمه، انتشارات ارکان دانش، ۱۳۹۹.

2- Farbis, Faleschini, Pellegrini, “Bond Modelling for the Assessment of Transmission Length in Pre-stressed Concrete Members”, Journal of CivilEng, No.1, p75-92, 2020.

3- Peterman, Murphy, “Determining the Transfer Length in Pre-stressed Concrete Railroad Ties Produced in the United States”, Mid-America Transportation Center, Report #MATC-KSU:453, 2012.

4- Farbis, Faleschini, Pellegrini, “Analytical Modelling of the Transmission Length in Pre-stressed Concrete Members”, The New Boundaries of Structural Concrete Conference, 2019.

5- Jeon, Shin, Kim, Park, Yang, “Transfer Lengths in Pretensioned Concrete Measured Using Various Sensing Technologies”, International Journal of Concrete Structures and Materials, 13:43, 2019.

6-Farbis, Faleschini, Pellegrini, “Assessment of influencing parameters on transmission length of pre-stressed concrete”, 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering Conference, 2018.

۷- فرنام، سید محمد، رضایی، فریدون و بیات آورزمانی، مهدی (۱۳۹۶). تحلیل مکانیک شکست تراورس بتنی پیش تنیده با بررسی اثر اندازه پیش ترک، تحقیقات بتن، سال یازدهم، شماره چهارم.

۸- فرنام، سید محمد، رضایی، فریدون (۱۳۹۶). اثر ترک بر باربری تراورس بتنی پیش تنیده B70 با استفاده از تحلیل مکانیک شکست، نشریه علمی و ترویجی مصالح و سازه های بتنی، انجمن علمی بتن ایران، سال دوم، شماره پیاپی ۴.

۹- منیرعباسی، آرمین، شاهرخی نسب، اسماعیل و ذاکری، جبارعلی (۱۳۹۵). بررسی میدانی تاثیر صفحات لاستیکی زیر تراورس در مقاومت جانبی خطوط راه آهن، نشریه علمی پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، سال سوم، شماره۱.

۱۰- اسماعیلی، مرتضی و قهاری، سیدعلی (۱۳۹۱). بررسی آزمایشگاهی تاثیر الیاف پلی پروپیلن بر رفتار بتن تراورس، مجله علمی پژوهشی عمران مدرس، دوره دوازدهم، شماره۳.

۱۱- توفیق، محمد محسن، توفیق، وحید و راویز، فرزانه (۱۳۹۷). بررسی اثر خستگی تراورس های بحرانی سوزن با رویکرد تغییر در جنس بتن، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در ایران، دانشگاه تهران.