یازدهمین کنگره ملی سراسری
فناوریهای نوین در حوزه توسعه پایدار ایران
11th National Congress of
the New Technologies in Sustainable Development of Iran
senaconf.ir

تحلیل عددی تیر بتن مسلح پیش‌تنیده تحت بارگذاری انفجار با تاکید بر نیروی پیش‌تنیدگی کابل

حسین گلشنی[۱]، احمد ملکی[۲]

[۱] کارشناس ارشد عمران-سازه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، مراغه، ایران golshani_info@yahoo.com

[۲] استادیار دانشکده فنی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مراغه، مراغه، ایران Maleki_civil@yahoo.com

چکیده

پیش تنیدگی بطور گسترده در ساخت و سازهای نظامی و غیرنظامی استفاده شده است. اجزای سازه‌ای بتن مسلح پیش تنیده مثل تیرها و ستون‌ها معمولاً برای پاسخ‌های غیر پیش تنیده بتن مسلح به خوبی جواب می‌دهند به خاطر اینکه پیش تنیدگی علاوه بر افزایش در سختی و ظرفیت باربری سازه‌ای، مقاومت ترک بیشتری نیز از اجزای غیرپیش تنیده دارد. به عنوان یک نتیجه معمولاً به یک سازه سبکتری می‌انجامد. بررسی اجزای بتن مسلح غیرپیش تنیده تحت بارگذاری انفجار در مطالعات قبلی آمده است. بنابراین مطالعه بر روی ظرفیت مقاومت-انفجار اجزای بتن مسلح پیش تنیده خیلی محدود است. در این پایان نامه پاسخ دینامیکی تیر بتن مسلح پیش تنیده با تکیه گاه ساده با مقطع مستطیلی تحت بارگذاری انفجار بطور عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود آباکوس بررسی شده است. پیش تنیدگی از قبل بر روی تیر بتن مسلح با یک رویکرد تحلیلی اعمال گردید. قابلیت اعتماد به مدل عددی توسط مقایسه با نتایج آزمایشات موجود در نشریات قبلی بدست آمد. در کل ۶ مدل عددی شامل م نیروی متفاوت پیش‌تنیدگی کابل مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دادند، با افزایش نیروی پیش تنیدگی در کابل، مقدار تنش در میلگردها و کابل‌ها افزایش می‌یابد و ترک‌های کششی تغییری نمی‌کند. با افزایش نیروی پیش‌تنیدگی، مقاومت نهایی و جابجایی ماکزیمم تیر بتن مسلح تغییر محسوسی نمی‌کند در حالیکه با کاهش نیروی پیش تنیدگی مقاومت نهایی و تغییرشکل ماکزیمم به ترتیب ۵/۸ و ۱۰/۷ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین نباید نیروی پیش تنیدگی کابل را از یک مقدار مشخص بیشتر افزایش داد زیرا تاثیری بر رفتار کلی تیر بتن مسلح تحت بار انفجار ندارد.

واژه‌های کلیدی

بتن پیش تنیده، پاسخ دینامیکی، مقاومت بتن، ظرفیت باربری، بار انفجار، تحلیل اجزای محدود.

۱. مقدمه

در جهان کنونی صرفه‌جویی در زمینه‌های گوناگون انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار گردیده است. یکی از مصادیق این موضوع در مهندسی عمران، با توجه به پیشرفت‌های صورت‌گرفته، به شکل طراحی بهینه سازه‌ها، با هدف بکارگیری حداقل مصالح و نیروهای انسانی، و همچنین کاهش زمان اجرایی و... برای دستیابی به حداکثر ظرفیت سازه بروز کرده است. با توجه به این موضوع، در این تحقیق به مبحث پیش‌تنیدگی پرداخته شده است. پیش‌تنیدگی عبارت است از ایجاد یک تنش ثابت و دائمی در یک عضو بتنی به نحو دلخواه و به اندازه لازم، به طوری که در اثر این تنش، مقداری از تنش‌های ناشی از بارهای مرده و زنده در این عضو خنثی شده و در نتیجه مقاومت باربری آن افزایش پیدا می‌کند. در سال‌های گذشته تحقیق بر روی اجزای بتن غیرپیش‌تنیده تحت بارگذاری‌های ضربه و انفجار توجهات زیادی را به خود جلب کرده است. اکثر مطالعات گذشته بر روی پاسخ‌های سازه‌ای دینامیکی نرخ بالا از اجزای بتن مسلح پیش‌تنیده تحت بارگذاری ضربه‌ای می‌باشند. مطالعه خیلی محدودی در رابطه با ظرفیت مقاومت- انفجار اجزای بتن مسلح پیش‌تنیده در نشریات انجام یافته است. استانداردهای مختلف آیین‌نامه‌هایی را بر طراحی تیرهای بتن مسلح پیش‌تنیده برای بارهای استاتیکی ارائه داده‌اند اما اثرات بتن پیش‌تنیده بر ظرفیت مقاومت بارگذاری انفجار سازه‌ها کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. هدف طراح یک سازه بتن پیش‌تنیده ایجاد یک سازه ایمن، قابل استفاده، بادوام، اقتصادی و جذاب می‌باشد. انفجار، آزاد شدن بسیار سریع انرژی به صورت نور، گرما، صدا و موج ضربه‌ای می‌باشد [۱].

۲. پیشینه تحقیق

امروزه با گسترش حملات انفجاری وارده به سازه‌های مختلف، بررسی دقیق رفتار سازه‌ها تحت بارهای انفجاری یک ضرورت محسوب‌می شود [۲]. لذا رفتار سازه‌های بتنی و مقاوم سازی آن تحت بارهای انفجاری در این تحقیق مورد کنکاش قرار گرفته است، تا کنون تحقیقات وسیعی در زمینه‌ی بارگذاری انفجاری بر روی سازه‌های مختلف صورت گرفته است، اما تحقیقات چندانی در راستای به کار گیری انفجار در تیرهای بتنی در داخل کشور انجام نشده است. جیوینو و همکاران (۲۰۱۴) نیز رفتار سازه‌های فولادی و بتنی را با شکل‌ها و شرایط مختلف تحت اثر بارگذاری انفجاری مورد بررسی قرار داده‌اند و شبیه سازی و مقایسه تاثیر شکل و سایر ویژگی‌ها را بر روی عملکرد سازه برای هر دو نوع فولادی و بتنی بوسیله نرم افزار المان محدود Abaqus انجام داده‌اند و عملکرد سازه‌های بتنی را در حالت کلی، مناسب‌تر گزارش کرده‌اند [۳]. ضخامت‌های متفاوت را در مقابل بار انفجار مورد بررسی قرار داده اند همچنین در این پژوهش مقاوم سازی دیوارهای بتنی با انواع ورق‌های FRP مورد بررسی قرار گرفته و تاثیر مقاوسازی با استفاده از این ورق‌ها را بر کاهش تغییرمکان بیشینه، نشانه خسارت و تنش در میلگردهای داخل بتن را در برابر بار انفجاری مناسب ارزیابی کرده که در این میان بکارگیری ورق‌های کربنی در مقایسه با ورق های شیشه و ارامید مناسب‌تر گزارش شده است. به منظور تقویت ساختمان در برابر انفجار باید با استفاده از مصالح ساختمانی باعملکرد بالا مثل الیاف مسلح پلیمری FRP تغییر مکان و مقاومت کافی فراهم شود برای اینکه مصالح ساختمانی اصلاح شده اثربخش باشد لازم است طراحی بطور دقیق مبتنی بر پاسخ‌های دینامیکی مصالح تحت بارهای انفجار مورد ارزیابی قرارگیرد یکی از پرکاربردترین مصالح جهت تقویت سازه‌ها استفاده الیاف‌های پلیمری کربنی معروف به FRP می‌باشد. با انجام مجموعه‌ای از مطالعات پارامتریک با ایجاد مدل‌های اجزا محدود به کمک نرم افزارهای المان محدود و بررسی تاثیر زاویه فیبرهای کربنی به عنوان عنصراصلی باربر در FRP رفتار این اعضا مورد بررسی قرارگرفته است و دیده شد که بهتر است امتداد فیبرها در راستای باربری دال باشد برای مثال در دال‌های یک طرفه فیبرها در راستای کوتاه‌تر یا عمود برتکیه گاه‌ها باشند در واقع در این مقاله هدف دستیابی به یک امتداد بهینه برای فیبرهای تشکیل دهنده FRP است (شکل ۱).

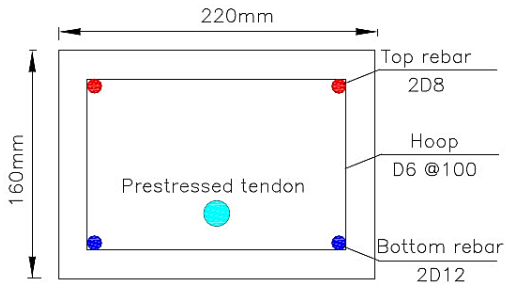
عمرانی و همکاران (۱۳۹۸)، در پژوهشی سعی بر ساخت و ارزیابی تیر، با مواد سبک و تولید تیرهایی مقرون بصرفه در شرایط خاص داشتند [۴]. بدین منظور از ترکیب بتن سبک به دلیل وزن کم و عایق حرارتی بودن آن و میلگرد FRP به دلیل مقاومت در برابر خوردگی، وزن کم، مقامت کششی بالا و مقاومت بالا در برابر خستگی استفاده شده است. هر دو مواد به خاطر مدول الاستیسیته پایین نسبت به (NWC) و میلگرد ساده، خیز و عرض ترک بزرگی را نشان می‌دهند. در این پژوهش شش تیر تحت آزمایش قرار گرفت که دو تیر از آن بتن سبک مسلح به میلگرد FRP که در شرایط کم آرمه و پر آرمه طراحی گردید و چهار تیر دیگر به صورت بتن سبک پیش

تنیده مسلح به میلگرد FRP طراحی گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد اعمال نیروی پیش تنیدگی می‌تواند به نحو موثری افزایش خیز و میزان ترک خوردگی محتمل در تیرهای مسلح به میلگرد FRP را جبران نماید. به طوری که با اعمال تنش پیش تنیدگی ۶ مگاپاسکال، خیز تیر در هنگام گسیختگی به مقدار ٪۲۸ کاهش می‌یابد و همچنین بار ترک خوردگی تیر یک افزایش تقریبا ۳ برابری را نشان می‌دهد.

شکل ۱. خرابی دال‌های تقویت شده با FRP بعد از آزمایش، [۳]

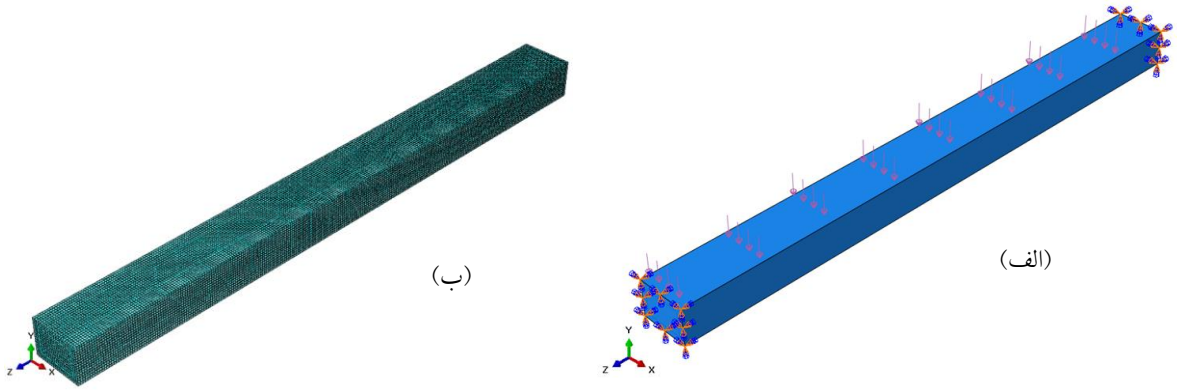
۳. راستی آزمایی روش اجزای محدود

در نشریات مطالعات اصولی که نشانگر ارزیابی اثر سطوح پیش تنیدگی جهت بهبود ظرفیت بار- انفجار تیرهای بتن مسلح باشد وجود ندارد. در این پایان نامه پاسخ دینامیکی تیرهای بتن مسلح پیش تنیده با تکیه‌گاه ساده تحت بارگذاری‌های انفجار با نتایج تحقیق چن و همکاران [۵] در نشریات صحت‌سنجی می‌شود. با مدل صحت‌سنجی شده، شبیه‌سازی‌های عددی از تیرهای بتن مسلح پیش تنیده در بارگذاری‌های انفجار با در نظرگیری سطوح مختلف پیش تنیدگی، مقاومت‌های فشاری بتن مختلف و شدت‌های انفجار انجام می‌شود. مشخصات تیر بتن مسلح پیش تنیده جهت شبیه‌سازی در ادامه آمده است. تیر بتن مسلح پیش تنیده با تکیه‌گاه ساده با عرض ۲۲۰ میلی‌متر و عمق ۱۶۰ میلی‌متر و دهانه ۲۶۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. شماتیک تیر در شکل ۲ نشان داده شده است. قطر فولادهای طولی در وجوه بالا و پایین به ترتیب برابر ۸ میلی‌متر و ۱۲ میلی‌متر می‌باشند. فولادهای عرضی به قطر ۶ میلی‌متر و در فواصل ۱۰۰ میلی‌متری در طول تیر می‌باشند. یک تاندون پیش تنیده به قطر ۱۵/۲ میلی‌متر همانند شکل ۵ مورد استفاده قرار گرفته است. بطور عمومی فرض گردیده است که تیر تحت بار انفجار مثلثی با فشار بازتابیده اوج ۶۱۰۰۰ کیلوپاسکال، ضربه بازتابیده مثبت ۳۰۵۰ کیلوپاسکال و مدت فاز مثبت ۱ میلی ثانیه بصورت یکنواخت توزیع شده قرار می‌گیرد.

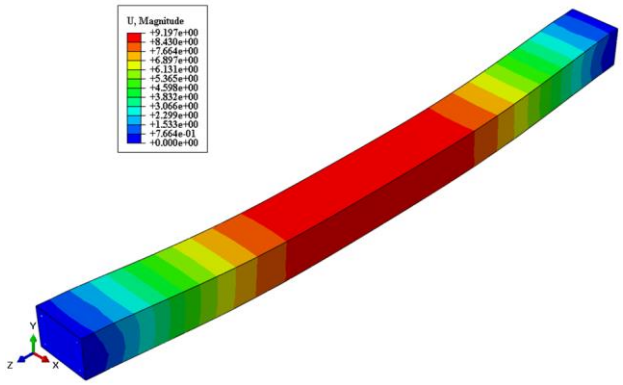


شکل ۲. شماتیک سطح مقطع عرضی تیر بتن‌آرمه‌ی پیش تنیده، [۵]

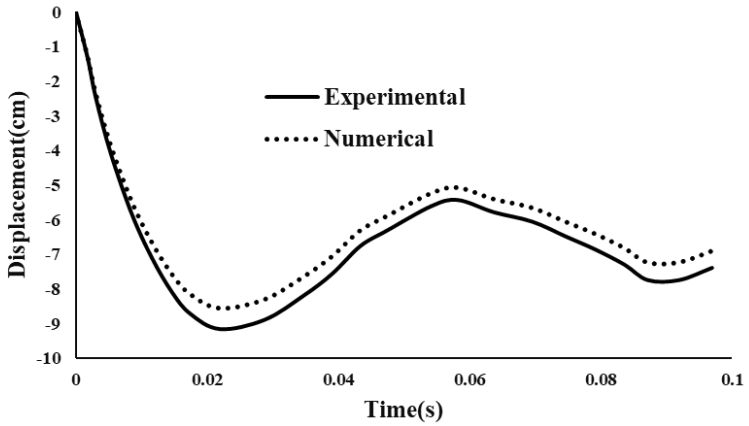
برای صحت سنجی مدل عددی، نمونه آزمایشگاهی شماره 12# چن و همکاران [۵]در نرم افزار آباکوس مطابق شکل ۳ مدلسازی شده است. بعد از تحلیل (شکل ۴ کانتور جابجایی بر روی مدل تغییر شکل یافته را نشان می‌دهد) داده‌های منحنی جابجایی – زمان مرکز تیر مربوط به تحلیل عددی به برنامه‌ی Excel انتقال داده شده و با منحنی جابجایی – زمان نمونه‌ی آزمایشگاهی به صورت شکل ۵ مقایسه شده است.



شکل ۳. مدل عددی: الف) بعد از اعمال شرایط مرزی و ب) بارگذاری مش بندی شده



شکل ۴. کانتور جابجایی بر روی مدل تغییر شکل یافته

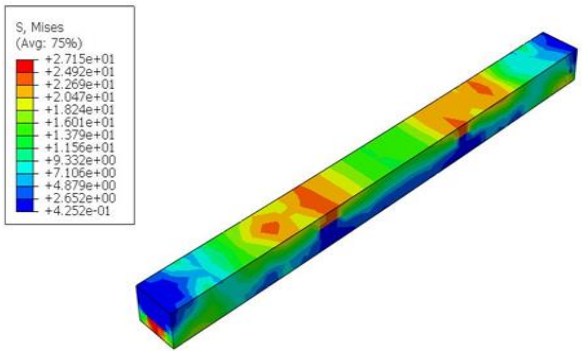


شکل ۵. مقایسه‌ی منحنی جابجایی (وسط دهانه‌ی تیر) - زمان در مدل آزمایشگاهی و عددی

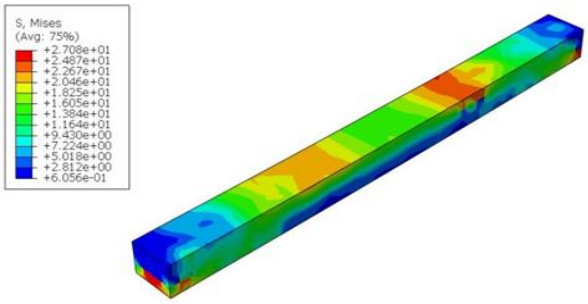
همانطور که از شکل ۵ واضح است، منحنی جابجایی - زمان حاصل از تحلیل عددی آباکوس، جابجایی متفاوتی نسبت به مدل مقاله دارد که این به علت نبود اطلاعات کافی در مورد مصالح در مقاله مورد نظر می‌باشد. در مدل‌های عددی با بارگذاری انفجار، هم پوشانی منحنی‌ها تا این حد قابل قبول بوده و صحت مدل سازی عددی را تامین می‌کند. بنابراین با توجه به صحت و مقایسه‌ی شبیه سازی یاد شده، در بخش بعدی تاثیر مقاومت فشاری بتن مورد ارزیابی قرار گرفته و نتایج حاصل در شرایط گوناگون گزارش شده است.

۴. تاثیر نیروی پیش‌تنیدگی کابل بر رفتار تیر بتن‌مسلح پیش‌تنیده تحت بارگذاری انفجار

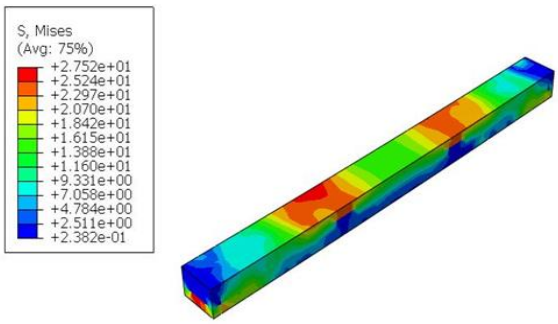
در این بخش به منظور بررسی تاثیر نیروی پیش‌تنیدگی کابل بر رفتار تیر بتن مسلح پیش تنیده تحت بارگذاری انفجار، در شش مدل F115، F215، F315، F415، F515 و F615 به ترتیب نیروی پیش‌تنیدگی کابل برابر با ۱۱۵، ۲۱۵، ۳۱۵، ۴۱۵، ۵۱۵ و ۶۱۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. سپس در ادامه به صورت کانتورهای رنگی مطابق شکل‌های ۶ تا ۱۳ مقایسه شده است. همچنین در شکل ۱۴ نمودار بار-جابجایی تیر بتنی با نیروی‌های مختلف پیش‌تنیدگی کابل و در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ و جدول ۱ تاثیر نیروی پیش‌تنیدگی کابل بر مقدار جابجایی ماکزیمم و ظرفیت باربری تیر مقایسه شده است.



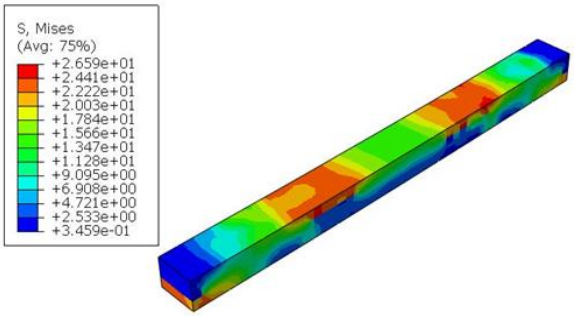
F115



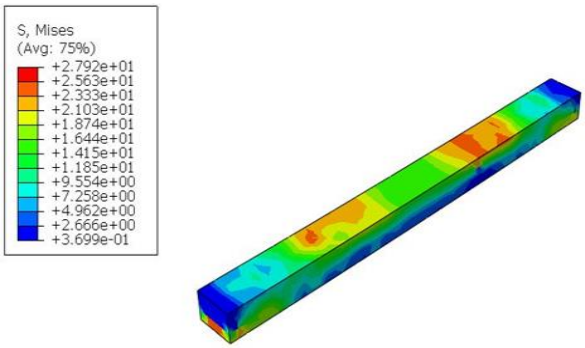
F215



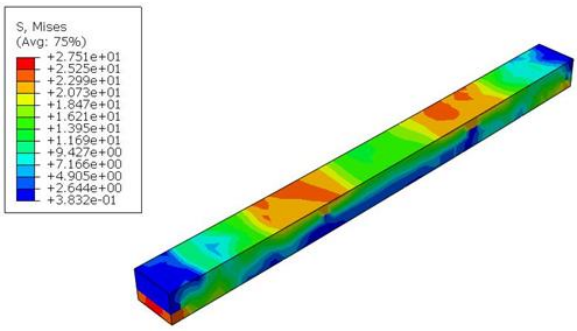
F315



F415

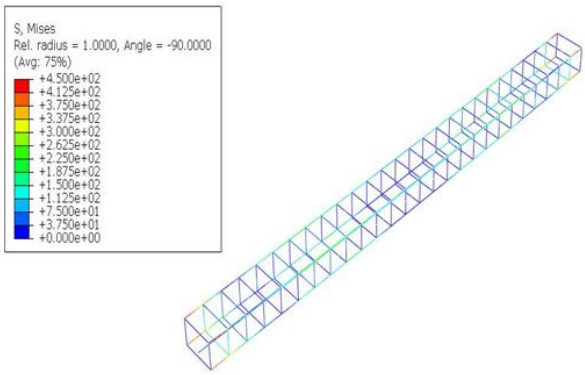


F515

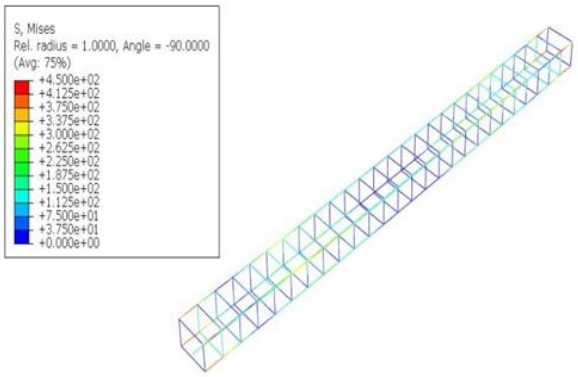


F615

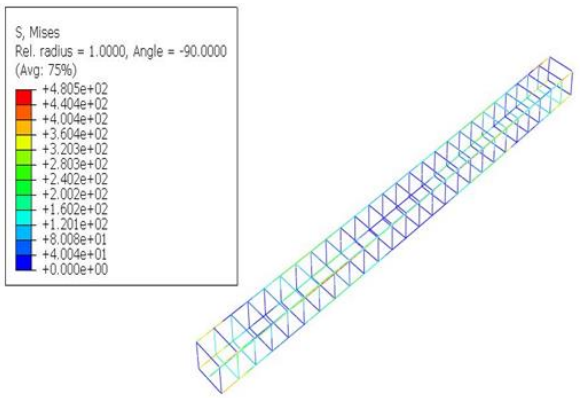
شکل ۶. کانتور تنش تیر بتنی با نیروی پیش‌تنیدگی کابل مختلف



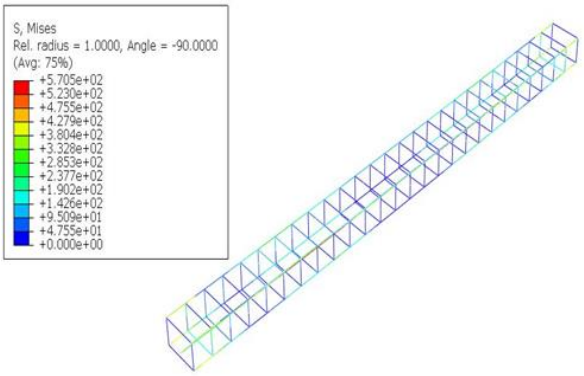
F115



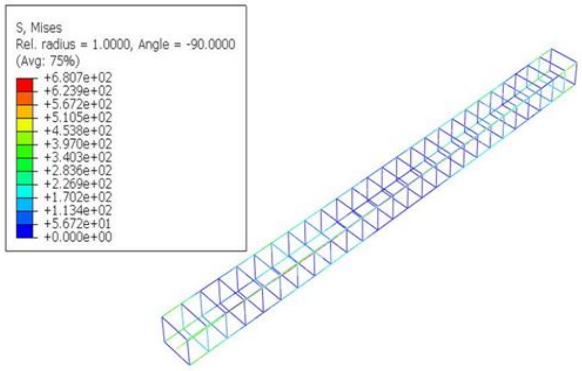
F215



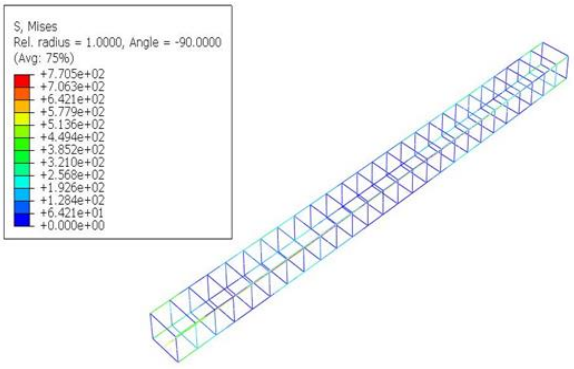
F315



F415



F515

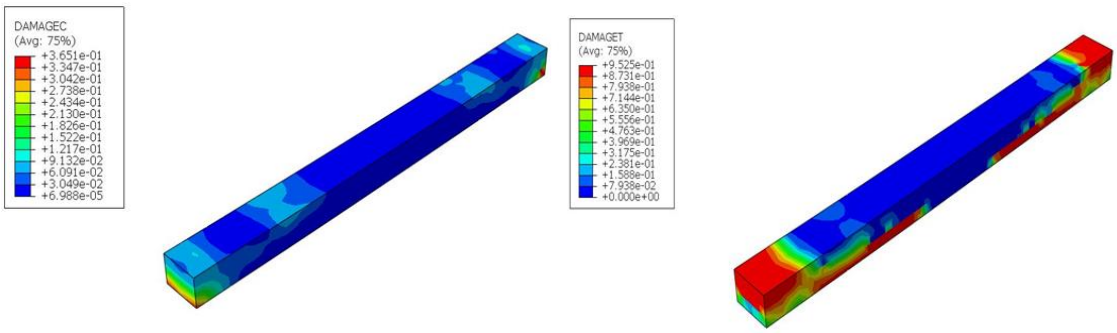


F615

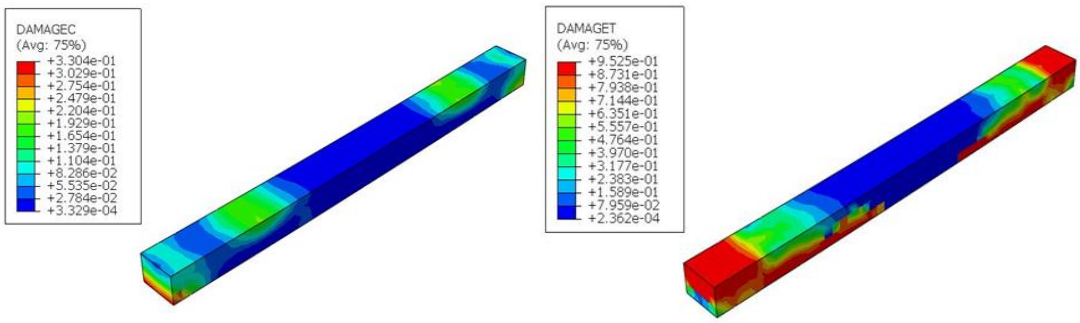
شکل ۷. کانتور تنش آرماتور و کابل پیش تنیده با نیروی پیش تنیدگی کابل مختلف

از شکل‌های ۶ و ۷ می‌توان گفت، با افزایش نیروی پیش تنیدگی از ۱۱۵ مگاپاسکال به ۲۱۵مگاپاسکال تنش ایجاد شده در تیر بتنی پیش تنیده تحت اثر بار انفجار از مقدار ۲۷/۱۵ مگاپاسکال به مقدار ۲۷/۰۸ مگاپاسکال و تنش ایجاد شده در آرماتورها و کابل پیش تنیده در مقدار ۴۵۰ مگاپاسکال ثابت می‌ماند. سپس با افزایش نیروی پیش تنیدگی از ۲۱۵ مگاپاسکال به ۳۱۵ مگاپاسکال تنش ایجاد شده در تیر بتنی پیش تنیده تحت اثر بار انفجار از مقدار ۲۷/۰۸ مگاپاسکال به مقدار ۲۷/۵۲ مگاپاسکال و تنش ایجاد شده در آرماتورها و کابل پیش تنیده از مقدار ۴۵۰ مگاپاسکال به مقدار ۴۸۰ مگاپاسکال افزایش پیدا می‌کند، با افزایش نیروی پیش تنیدگی از ۳۱۵ مگاپاسکال به ۴۱۵

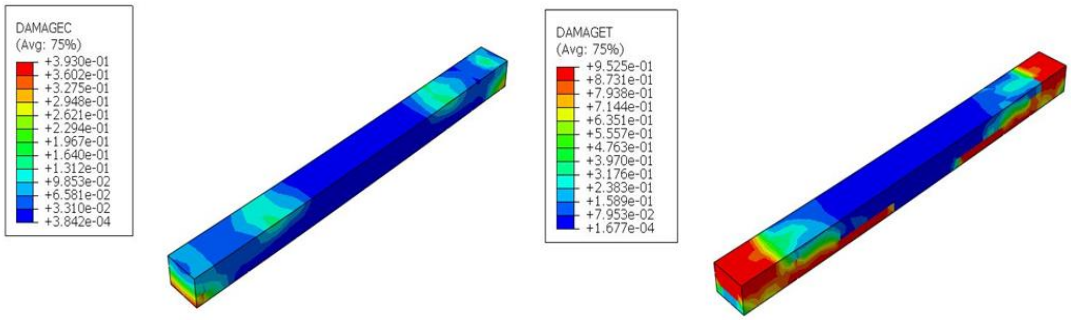
مگاپاسکال تنش ایجاد شده در تیر بتنی پیش تنیده تحت اثر بار انفجار از مقدار ۲۷/۵۲ مگاپاسکال به مقدار ۲۶/۵۹ مگاپاسکال کاهش و تنش ایجاد شده در آرماتورها و کابل پیش تنیده از مقدار ۴۸۰ مگاپاسکال به مقدار ۵۷۰ مگاپاسکال افزایش پیدا می‌کند، با افزایش نیروی پیش تنیدگی از ۴۱۵ مگاپاسکال به ۵۱۵ مگاپاسکال تنش ایجاد شده در تیر بتنی پیش تنیده تحت اثر بار انفجار از مقدار ۲۶/۵۹ مگاپاسکال به مقدار ۲۷/۹۲ مگاپاسکال افزایش و تنش ایجاد شده در آرماتورها و کابل پیش تنیده از مقدار ۵۷۰ مگاپاسکال به مقدار ۶۸۰ مگاپاسکال افزایش پیدا می‌کند با افزایش نیروی پیش تنیدگی از ۵۱۵ مگاپاسکال به ۶۱۵ مگاپاسکال تنش ایجاد شده در تیر بتنی پیش تنیده تحت اثر بار انفجار از مقدار ۲۷/۹۲ مگاپاسکال به مقدار ۲۷/۵۱ مگاپاسکال کاهش و تنش ایجاد شده در آرماتورها و کابل پیش تنیده از مقدار ۶۸۰ مگاپاسکال به مقدار ۷۷۰ مگاپاسکال افزایش پیدا می‌کند.



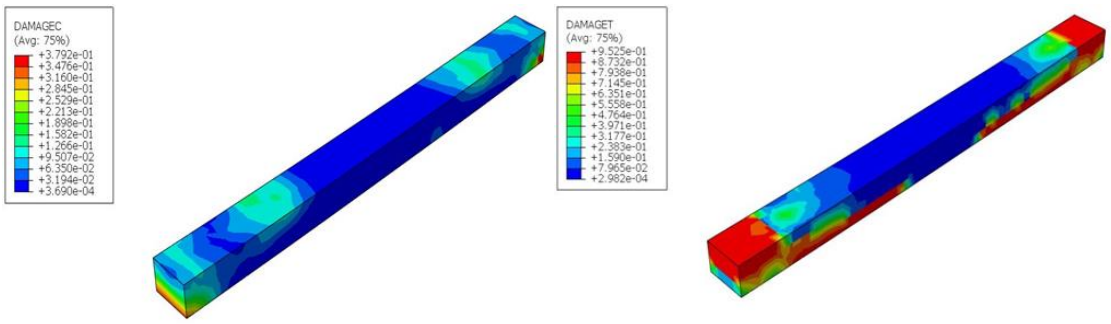
شکل ۸. کانتور ترک کششی و فشاری تیر بتنی با نیروی پیش تنیدگی ۱۱۵ مگاپاسکال



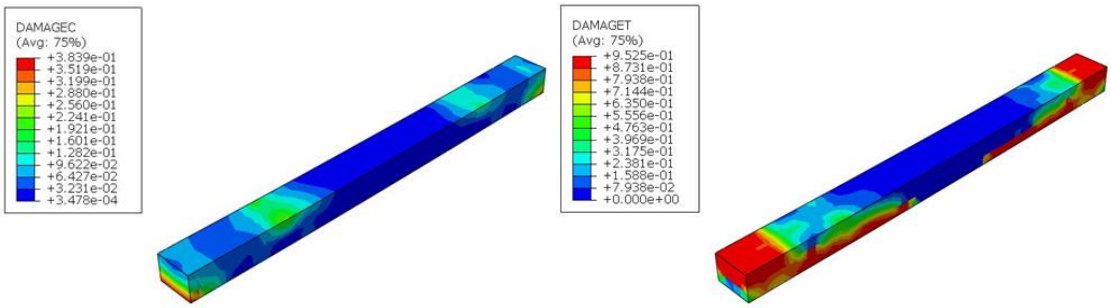
شکل ۹. کانتور ترک کششی و فشاری تیر بتنی با نیروی پیش تنیدگی ۲۱۵ مگاپاسکال



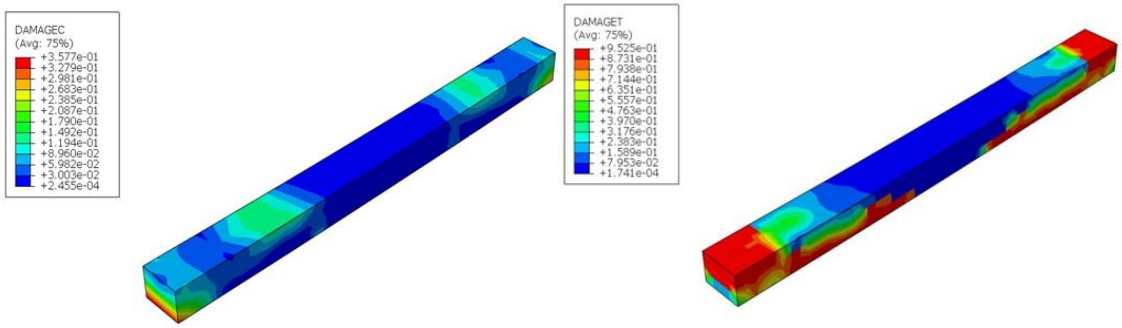
شکل ۱۰. کانتور ترک کششی و فشاری تیر بتنی با نیروی پیش تنیدگی ۳۱۵ مگاپاسکال



شکل ۱۱. کانتور ترک کششی و فشاری تیر بتنی با نیروی پیش تنیدگی ۴۱۵ مگاپاسکال

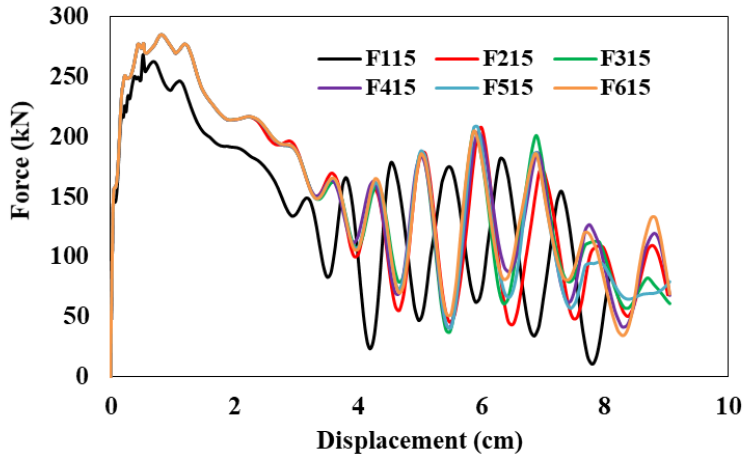


شکل ۱۲. کانتور ترک کششی و فشاری تیر بتنی با نیروی پیش تنیدگی ۵۱۵ مگاپاسکال

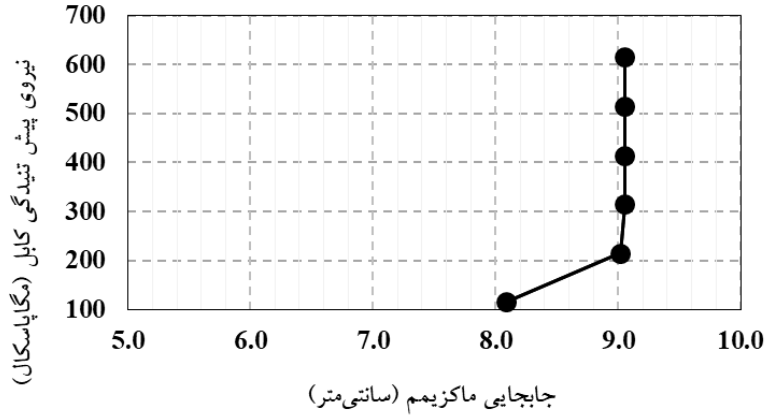


شکل ۱۳. کانتور ترک کششی و فشاری تیر بتنی با نیروی پیش تنیدگی ۶۱۵ مگاپاسکال

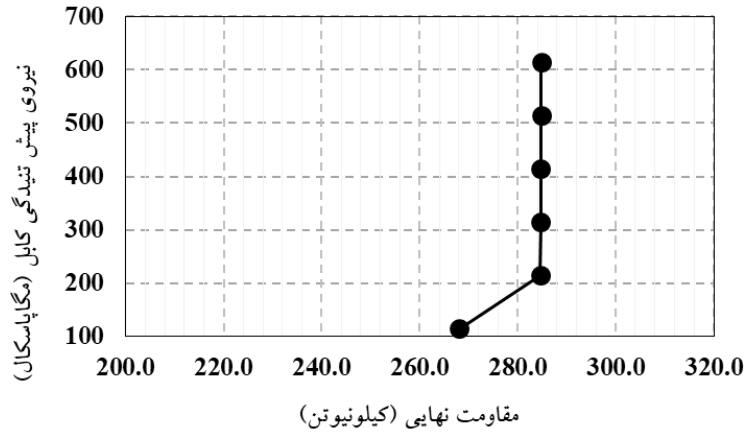
در شکل‌های ۸ الی ۱۳ کانتور ترک کششی و فشاری تیر بتنی با مقاومت فشاری مختلف آورده شده است همانطور که از شکل‌ها مشخص است ترک کششی ایجاد شده در تیر بتنی نسبت به ترک فشاری بیشتر می باشد که علت آن به خاطر ضعیف بودن بتن در کشش می باشد همچنین با افزایش نیروی پیش تنیدگی درصد ترک‌های کششی تغییری نکرده در حالی که درصد ترک‌های فشاری در تیر بتنی با افزایش نیروی پیش تنیدگی از ۱۱۵ مگاپاسکال به ۲۱۵ مگاپاسکال کاهش، با افزایش نیروی پیش تنیدگی از ۲۱۵ مگاپاسکال به ۳۱۵ مگاپاسکال درصد ترک‌های فشاری افزایش، با افزایش نیروی پیش تنیدگی از ۳۱۵ مگاپاسکال به ۴۱۵ مگاپاسکال درصد ترک‌های فشاری بدون تغییر، با افزایش نیروی پیش تنیدگی از ۴۱۵ مگاپاسکال به ۵۱۵ مگاپاسکال درصد ترک‌های فشاری افزایش و با افزایش نیروی پیش تنیدگی از ۵۱۵ مگاپاسکال به ۶۱۵ مگاپاسکال درصد ترک‌های فشاری کاهش پیدا کرده است.



شکل ۱۴. نمودار بار – جابجایی مدل‌های F115، F215، F315، F415، F515 و F615



شکل ۱۵. تاثیر نیروی پیش تنیدگی کابل بر مقدار جابجایی ماکزیمم تیر بتن مسلح پیش تنیده



شکل ۱۶. تاثیر نیروی پیش تنیدگی کابل بر مقدار مقاومت نهایی تیر بتن مسلح پیش تنیده

جدول ۱. مقایسه‌ی نتایج مدل‌های F115، F215، F315، F415، F515 و F615

ردیف	نام مدل	نیروی پیش تنیدگی کابل (مگاپاسکال)	ماکزیمم جابجایی (سانتی‌متر)	درصد افزایش جابجایی نسبت به F315	ماکزیمم مقاومت (کیلونیوتن)	درصد افزایش مقاومت نسبت به F315
1	F115	115	8.1	-10.7	268.1	-5.8
2	F215	215	9.0	-0.4	284.6	0.0
3	F315	315	9.1	0.0	284.7	0.0
4	F415	415	9.1	0.0	284.7	0.0
5	F515	515	9.1	0.0	284.8	0.0
6	F615	615	9.1	0.0	284.8	0.1

همانطور که از شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ و جدول ۱ مشخص است با افزایش نیروی پیش تنیدگی از ۱۱۵ مگاپاسکال به ۲۱۵ مگاپاسکال ظرفیت تحمل تیر بتنی پیش تنیده از مقدار ۲۶۸/۱ کیلونیوتن به مقدار ۲۸۴/۶ کیلونیوتن افزایش پیدا می‌کندولی با افزایش هرچه بیشتر نیروی پیش تنیدگی کابل، مقدار ماکزیمم مقاومت ثابت می‌ماند.

۴. نتایج کلی

تیر بتن مسلح پیش‌تنیده تحت بارگذاری انفجار نیروی پیش تنیدگی کابل در شش مدل عددی مجزا به ترتیب برابر با ۱۱۵، ۲۱۵، ۳۱۵، ۴۱۵، ۵۱۵ و ۶۱۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل مدل‌ها در مقایسه با مدلی که نیروی پیش تنیدگی برابر با ۳۱۵ مگاپاسکال داشت، نشان داد. با افزایش نیروی پیش تنیدگی در کابل، مقدار تنش در میلگردها و کابل‌ها افزایش می‌یابد و ترک‌های کششی تغییری نمی‌کند. با توجه به نتایج منحنی‌های بار- جابجایی، با افزایش نیروی پیش‌تنیدگی، مقاومت نهایی و جابجایی یا تغییرشکل ماکزیمم تیر بتن مسلح نسبت به مدل دارای نیروی پیش تنیدگی ۳۱۵ مگاپاسکال تغییر محسوسی نمی‌کند در حالیکه با کاهش نیروی پیش تنیدگی به ۱۱۵ مگاپاسکال مقاومت نهایی و تغییرشکل ماکزیمم به ترتیب ۵/۸ و ۱۰/۷ درصد کاهش می‌یابد. بنابراین نباید نیروی پیش تنیدگی کابل را از یک مقدار مشخص بیشتر افزایش داد زیرا تاثیری بر رفتار کلی تیر بتن مسلح تحت بار انفجار ندارد.

منابع

[1] Hu, H.T., Lin, F.M., Liu, H.T., Huang, Y.F. and Pan, T.C., (2010). Constitutive modeling of reinforced concrete and prestressed concrete structures strengthened by fiber-reinforced plastics. Composite structures, 92(7), pp.1640-1650.
[2] Marjanishvili, S.M., (2004). Progressive analysis procedure for progressive collapse. Journal of performance of constructed facilities, 18(2), pp.79-85.
[3] Giovino, G., Olmati, P., Garbati, S. and Bontempi, F., (2014). Blast resistance assessment of concrete wall panels: experimental and numerical investigations. International Journal of Protective Structures, 5(3), pp.349-366.
[۴] عمرانی، محمدحسین و دهستانی، مهدی و یوسف پور، حسین، (۱۳۹۸)، رفتارخمشی تیر بتن سبک پیش تنیده مسلح به میلگرد FRP، ششمین کنفرانس ملی فناوری‌های نوین در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی، تهران.
[5] Chen, W., Hao, H. and Chen, S., (2015). Numerical analysis of prestressed reinforced concrete beam subjected to blast loading. Materials & Design (1980-2015), 65, pp.662-674.