فصلنامه آنالیز سازه – زلزله
دوره ۱۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۱
J. Analysis of Structure and Earthquake
Volum 19, Issue 1, Spring 2022

بررسی عددی تأثیر اضافه نمودن لایه تقویت پس‌کشیده بر مقاومت خمشی تیر بتن مسلح

علیرضا میرزائی*
دکترای مهندسی عمران گرایش سازه، اداره طراحی فنی، معاونت فنی عمرانی شهرداری شیراز، ایران
استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی زند، شیراز، ایران
اشکان ترابی
استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران
امیر تابع بردبار
استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد جهرم، دانشگاه آزاد اسلامی، جهرم، ایران

a.mirzaee@miau.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۲۰ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۴۰۰/۱۲/۱۴

چکیده:
مقاوم‌سازی ساختمان‌ها و بهبود عملکرد آن‌ها طی سال‌های اخیر بسیار مورد توجه صنعت گران و مهندسان قرار گرفته است. با پیشرفت تکنولوژی و ارائه مصالح نوین در حوزه ساختمان، کیفیت مقاوم‌سازی و بهسازی سازه‌ها نیز ارتقاء پیدا نموده است. سازه‌های بسیاری در دنیا با استفاده از مصالح بتن‌آرمه ساخته شده‌اند که البته در زلزله‌های گذشته نیز این مصالح عملکرد مناسبی را از خود نشان داده‌اند. مقاوم‌سازی این سازه‌ها و ارائه راهکارهای نوین در بهبود عملکرد آن‌ها نیز توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است و راه کارهای متفاوتی از جمله استفاده از ژاکت بتنی پیشنهاد و مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیق پیش رو با استفاده از بتن پس کشیده به ارائه راهکاری نوین در جهت تقویت خمشی تیر بتن مسلح با استفاده از نرم افزار ABAQUS پرداخته شده است. در این روش با اضافه نمودن لایه بتنی پس‌کشیده به تیر بتن مسلح (نمونه پایه) از طرفین، عملکرد خمشی آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج تحلیل‌های انجام شده بیانگر سازگاری رفتاری مناسب این روش با توجه به ظرفیت کششی بالای کابل فولادی دارد که می‌تواند تأثیر بسزایی بر بهبود عملکرد، افزایش ظرفیت تیر بتن مسلح و انتقال مفصل پلاستیک از دهانه میانی به $\frac{1}{3}$ دهانه انتهایی تیر داشته باشد.
کلید واژگان: مقاوم‌سازی، پس‌کشیدگی، تیر بتن مسلح، نرم افزار ABAQUS، مفصل پلاستیک

۱- مقدمه

طراحی ساختمان‌ها امروزه تنها بر معیار مقاومت انجام نمی‌گیرد، مهندسان، طراحی سازه‌ها را متناسب با سطح عملکردی که از آن‌ها انتظار می‌رود طراحی و اجرا می‌نمایند. در رویکرد نوینی که بیش از یک دهه از آغاز آن در دنیا می‌گذرد؛ سطح عملکردی سازه‌ها متناسب با کاربری و اهمیت آن‌ها در مواقع بحران متفاوت ارزیابی شده و به همین علت میزان بروز خسارت و آسیب به المان‌های سازه‌ای و باربر نیز متناسب با عملکرد مورد انتظار ارزیابی می‌گردد. از این رو بهسازی لرزه‌ای و یا افزایش سطح عملکردی سازه‌ها نیز توسط محققان مورد توجه بسیار قرار گرفته و تحقیقات فراوانی بر روی روش‌های بهسازی و مقاوم‌سازی ساختمان‌ها تحت بار زلزله انجام گرفته است. راه کارهای متفاوت جهت افزایش ظرفیت و بهبود عملکرد المان‌های باربر سازه‌ای ارائه شده است که در این خصوص می‌توان به روش‌های زیر اشاره نمود:

۱) ژاکت فولادی [۱]
۲) ژاکت بتنی [۲]
۳) تزریق اپوکسی [۳]
۴) الیاف‌های پلیمری FRP [۴]
۵) استفاده از لمینت های CFRP [۵-۸]
۶) پس کشیدگی بیرون از سازه

روش‌های ذکر شده به عنوان متداول‌ترین روش‌های بهسازی و افزایش سطح عملکرد سازه‌ها امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ساختمان‌های بتن مسلح با توجه به مکانیزم ساختاری در ایران و جهان بسیار مورد توجه صنعت گران این حوزه قرار دارند، به دلیل استفاده از قاب خمشی به عنوان سیستم باربر لرزه‌ای در این ساختمان‌ها، عملکرد تیرها به عنوان عضو باربر جانبی که تحت خمش و برش قرار دارند بر عملکرد نهایی سازه تأثیر بسیار دارد، لذا مقاوم‌سازی این المان‌ها با استفاده از روش‌های متفاوت از جمله روش‌های ذکرشده در بالا انجام می‌گردد. برخی از روش‌های تقویت دارای محدودیت‌هایی می‌باشند که تنها می‌توان از آن‌ها در تقویت نوعی خاص از اعضا مانند تیرها و یا ستون‌ها استفاده نمود. مزیت و برتری روش‌های تقویت در دامنه کاربرد آن‌ها و تأثیر آن‌ها متناسب با تحقیقات آزمایشگاهی و یا عملکرد آن‌ها در زلزله‌های به وقوع پیوسته پیشین ارزیابی می‌گردد. استفاده از روش ژاکت کردن در دسته روش‌های پر کاربردی قرار دارد که می‌توان از آن در تقویت و بهسازی المان‌های مختلف مانند تیرها و ستون‌ها مورد استفاده قرارداد. با توجه به اینکه مقاومت خمشی اعضا رابطه مستقیم با هندسه مقطع و مقاومت مصالح استفاده شده در مقطع را دارد، از این رو استفاده از ژاکت فولادی و بتنی در بهسازی تیرهای بتن مسلح به عنوان یک روش متداول مورد استفاده قرار می‌گردد. ارائه جزئیات اجرایی جدید و نوآوری در مصالح و روش‌های اجرا در جهت اقتصادی کردن طرح‌ها و هم سهولت در اجرا از پارامترهایی هستند که علاوه بر پارامترهایی مانند شکل‌پذیری و افزایش ظرفیت مقطع توسط محققان مورد بررسی قرار می‌گیرد. از این رو می‌توان به تحقیق آزمایشگاهی که به ارائه روش اجرایی نوین در جهت اقتصادی کردن طرح و افزایش شکل‌پذیری تیر بتن مسلح با استفاده از ژاکت فولادی با اتصالات پیچی پرداخته شده اشاره نمود [۹]. اتصالات مدولار و افزایش سرعت مونتاژ قطعات در محل مقاوم‌سازی به عنوان مزیت اجرایی این طرح و همچنین افزایش ۷ برابری ظرفیت اتلاف انرژی، افزایش ۲/۵ برابری شکل‌پذیری و افزایش ۳ برابری ظرفیت خمشی تیرهای بتن مسلح ساخته شده و مورد تقویت قرار گرفته در این تحقیق به عنوان دستاوردهای این روش مقاوم‌سازی در مقابل تیرهای ساخته شده بدون تقویت مورد آزمایش قرار گرفته اشاره شده است. سرعت اجرایی طرح‌های مبتنی بر استفاده از ژاکت کردن المان و همچنین ظرفیت اتلاف انرژی و شکل‌پذیری و همچنین مشکلات اجرائی از جمله ایراداتی است که در طرح‌های تحقیقاتی با ارائه راهکارهای متفاوت تلاش در رفع آن و بهبود بخشیدن عملکرد این روش‌ها می‌باشد.

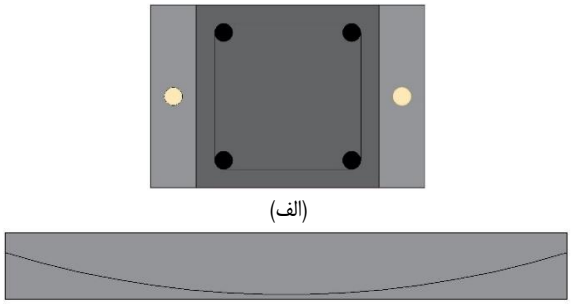
استفاده از این روش نیز دارای ایرادتی مانند وزن زیاد، حساسیت ورق‌های فولادی به خوردگی و نصب دشوار این ورق‌ها که به دلیل اجرای غیراصولی و بدون کیفیت سبب کاهش مقاومت خمشی عضو و عدم عملکرد صحیح به هنگام وقوع زلزله را در پی داشته است. راهکار دیگری که بسیار توسط محققان مورد بررسی قرار گرفت، استفاده از ژاکت بتنی [۱۰] به عنوان یک‌لایه تقویت در ناحیه کششی دارای ضعف، مورد استفاده قرار گرفت و سبب افزایش ظرفیت خمشی تیر بتنی مسلح شد، استفاده از لایه‌ای همگن و دارای ساختاری مشابه مصالح مورد استفاده در عضو مورد تقویت که سبب بهبود عملکرد این المان سازه‌ای (تیر بتنی مسلح)

می‌شود، به عنوان یک مزیت بسیار عالی مورد توجه قرار گرفت [۱۱-۱۳] اما استفاده از این روش همانند روش تقویت تیر بتنی مسلح با استفاده از ورق فولادی دارای معایبی از جمله اضافه نمودن ابعاد عضو (آویز شدن تیر)، وزن بالا، دشواری اجرا و بروز مشکلات در فراهم‌کردن اتصال صحیح بین لایه تقویت و المان می‌توان اشاره نمود که عملاً استفاده از این روش را در تقویت تیرهای بتن مسلح با محدودیت های جدی مواجه می‌کند.

یکی دیگر از راهکارهای نوین که با استفاده از مصالح جدید به عنوان راهکاری جهت بهبود عملکرد تیر بتن مسلح مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از روش ایجاد پس‌کشیدگی بیرون از سازه می‌باشد. وزن کم و همچنین سختی کششی منحصر به فرد این کابل‌ها سبب شده تا بتوانند ضعف های موجود در تیر بتن مسلح را جبران و به عنوان یک روش تقویت در تیرهای بتن مسلح سازه‌ای در ساختمان‌ها و پل ها مورد استفاده قرار گیرد. به دلیل تئوری قوی در روش ایجاد پس‌کشیدگی در کابل‌ها که سبب حذف ترک های کششی می‌شود و همچنین افزایش ظرفیت قابل توجه در این المان‌ها، سبب تمایل انتخاب این روش توسط مهندسان به عنوان یک روش بهسازی کارآمد شده است. علاوه بر مزایای ذکر شده، این روش دارای معایبی نیز می‌باشد که می‌توان از این جمله به‌قرار گیری کابل‌ها بدون محافظ در خارج از سازه (Expose) اشاره نمود، ایجاد خوردگی و روش اجرای تخصصی آن سبب می‌شود تا نتوان در بسیاری از پروژه‌ها از این روش استفاده نمود.

در تحقیق پیش رو تلاش شده تا با استفاده از روش پس‌کشیدگی و حذف ترک‌های کششی در بتن و روش تقویت با استفاده از ژاکت بتنی، راهکاری نوین در تقویت تیرهای بتن مسلح ارائه داد. در این روش با اتصال جانبی یک لایه بتنی مسلح شده با کابل پس‌کشیده به تیر بتن مسلح (شکل شماره ۱)، عملکرد تیر بهبود یافته و همچنین سبب افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت خمشی مقطع می‌شود. از این روش می‌توان به راحتی در تقویت و بهسازی تیرهای بتن مسلح در ساختمان‌ها و پل ها استفاده نمود. به دلیل نحوه اجرا در این روش، قالب‌بندی مناسب و سهولت در اجرا و نگهداری مقطع می‌تواند به عنوان یک روش کاربردی در بهسازی و تقویت تیرهای بتن مسلح مورد استفاده قرار گیرد.

مطالعات انجام شده در این خصوص در تحقیق پیش رو با استفاده از نرم افزار ABAQUS و با ایجاد مدل‌های عددی متفاوت انجام گردیده است. تلاش شده تا با استفاده از روش آنالیز تنش، میزان اعمال پس‌کشیدگی در مقطع بهینه شده و تأثیرات آن بر روی تیر بتن مسلح به عنوان نمونه موجود که مورد تقویت قرار گرفته است مطالعه و بررسی گردد.



(الف)

(ب)

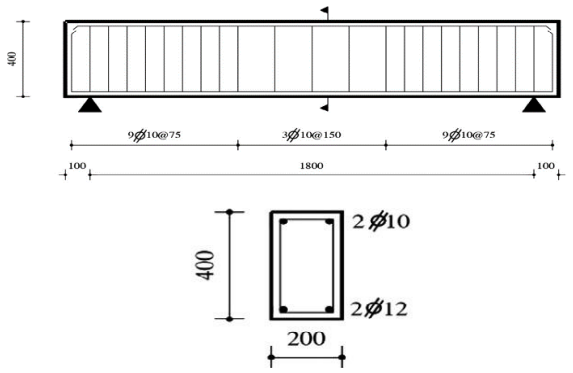
شکل شماره ۱- مقطع تقویت تیر بتن مسلح تقویت شده با استفاده از اضافه نمودن لایه بتن پس‌کشیده

۲- مدل‌سازی

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار ABAQUS به بررسی رفتار تیر بتنی تقویت شده با اضافه نمودن لایه ی تقویتی پس کشیده شده پرداخته شده است. جهت این منظور در نرم افزار از مدل آزمایشگاهی تهیه شده در دانشگاه مهندسی مصر که تحت بار استاتیکی و به صورت بار افزون تا شکست کامل نمونه مورد آزمایش قرار گرفته استفاده شده است [۱۴]. و اطلاعات مربوطه با مدل عددی ساخته شده در این تحقیق با مدل آزمایشگاهی مورد مقایسه و صحت سنجی قرار گرفته است. همچنین جهت صحت سنجی رفتار و عملکرد لایه پس کشیده، هرکدام به صورت جداگانه با اطلاعات به دست آمده از مدل آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که اطلاعات مربوطه در ادامه ارائه خواهد شد.

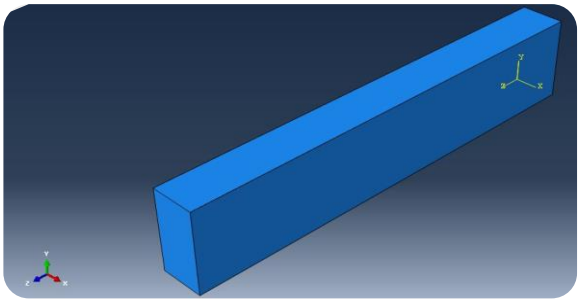
۲-۱- مشخصات تیر بتنی مسلح مورد استفاده

همان‌طور که در شکل شماره ۲ مشاهده می‌شود تیر بتنی با ابعاد ۱۸۰۰ * ۴۰۰ میلی‌متر و مقطع ۲۰۰* ۴۰۰ میلی‌متر جهت مدل سازی استفاده شده است. همچنین از میلگرد با قطر ۱۰ میلی‌متر برای آرماتورگذاری طولی و عرضی (خاموت گذاری) در مقطع با ضخامت و فواصل نشان داده شده در شکل استفاده شده است.

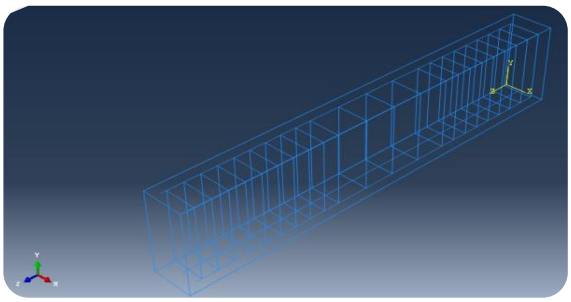


شکل شماره ۲–مشخصات مقطع بتنی مسلح مورد استفاده در مدل سازی [۱۸]

در نرم افزار نیز نمونه به صورت ماکرو مدل گردیده (شکل شماره ۳) و المان‌های تشکیل‌دهنده تیر بتنی مورد نظر به صورت جداگانه ساخته شده و با توجه به مشخصات ذکر شده در شکل شماره ۳ کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. با توجه به اهمیت مدل سازی عددی، در این تحقیق تلاش شده تا بتوان دقیقاً همانند مدل ساخته شده در آزمایشگاه و شرایط حاکم بر آن عمل شود تا بتوان کم‌ترین خطای ممکن را در تحلیل به همراه داشته باشد.



(الف)



(ب)

شکل شماره ۳– (الف) تیر مدل شده در نرم افزار (ب) میلگرد گذاری در تیر بتنی مورد نظر در نرم افزار

۲-۲- مشخصات مصالح

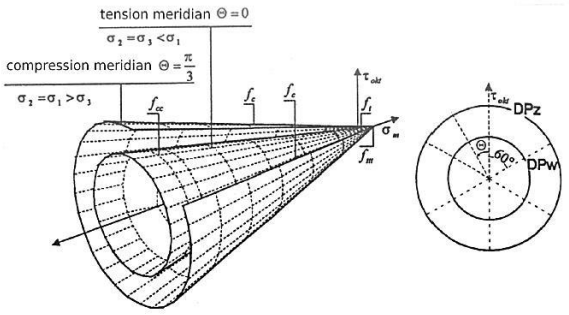
مصالح مورد استفاده در این تحقیق بتن و فولاد می‌باشد. مشخصات پلاستیک مصالح بتنی با استفاده تئوری مدل خسارت پلاستیک بتن در نظر گرفته شده است. مدل خسارت پلاستیک بتن (Concrete Damage Plasticity) تکنیکی است که قابلیت نشان‌دادن رفتار غیرخطی و خصوصیات خرابی مواد شبه ترد مثل بتن را دارد [۱۵]. مقاومت فشاری بتن مورد نظر ۳۵ مگاپاسکال و مقاومت کششی به دست آمده از آزمایش نیز ۳/۲۹ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است (جدول شماره ۱). مشخصات مصالح فولادی نیز بر اساس رفتار کششی فولاد بعد از تنش تسلیم مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور تنش تسلیم برای میلگردهای طولی به ترتیب ۴۲۰/۷۰ مگاپاسکال و برای خاموت‌ها تنش تسلیم نیز همین مقدار در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است رفتار فولاد در ناحیه پلاستیک باتوجه به ماهیت آن در ناحیه غیر خطی به صورت الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده است.

جدول ۱– مقاومت بتن مورد استفاده در تحلیل

	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)
بتن	۳۵	۳/۲۹

تئوری مدل آسیب پلاستیک بتن دارای ۳ بخش کلی با عنوان ثابت‌های پلاستیک، رفتار فشاری بتن در ناحیه پلاستیک و رفتار کششی بتن در ناحیه پلاستیک می‌باشد. رفتار فشاری و کششی بتن در ناحیه پلاستیک می‌تواند با وارد نمودن پارامترهای خسارت (Damage) و هم بدون در نظر گرفتن آسیب مورد استفاده قرار گیرند. تئوری و روابط بسیاری در تخمین این ضرائب توسط محققان مختلف ارائه شده است و همچنین در راهنمای نرم افزار نیز مقادیر پیشنهادی در صورت نبود اطلاعات آزمایشگاهی پیشنهاد شده که می توان در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گیرد (شکل شماره ۴). در این تحقیق با توجه به اینکه اطلاعات آزمایشگاهی در خصوص زاویه اصطکاک، خروج از مرکزیت و دیگر پارامتر ها در دسترس نبوده، از مقادیر پیشنهادی راهنمای نرم افزار باتوجه به نوع و مقاومت بتن مورد استفاده در این تحقیق استفاده شده است. زاویه اصطکاک ۱۵ درجه و خروج از مرکزیت برابر ۰/۱ به‌عنوان

پارامترهای اصلی و تأثیرگذار در بخش ثابت‌های پلاستیک بتن در نظر گرفته شده است.



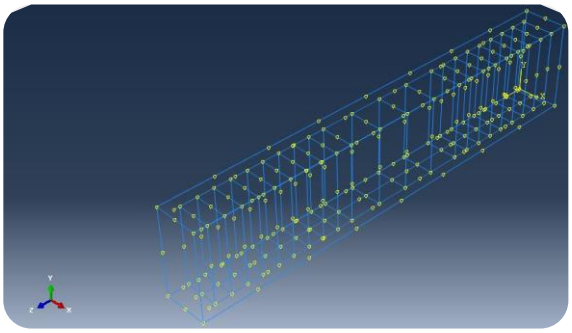
شکل شماره ۴- سطوح مرزی معیار دراگر پراگر که برای استخراج ضریب K در مدل خسارت بتن استفاده می‌شود [۱۵].

۲-۳- روش تحلیل

برای انجام تحلیل در این تحقیق از روش بارگذاری بار افزون تا شکست کامل نمونه استفاده شده است. به دلیل پایین بودن قدر مطلق مقادیر سرعت‌ها و شتاب‌ها، سهم نیروهای اینرسی و انرژی جنبشی در این‌گونه تحلیل‌ها بسیار ناچیز می‌باشد، بنابراین در شبیه‌سازی این مسائل با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، معمولاً از استپ static, general که حل‌گر آن Abaqus/Standard است استفاده می‌شود چراکه به هنگام استفاده از این استپ، مقادیر سرعت و شتاب حالت مجازی داشته و سبب ایجاد نیروی اینرسی نمی‌شوند [۱۶].

۲-۴- اندرکنش اعضاء نسبت به یکدیگر

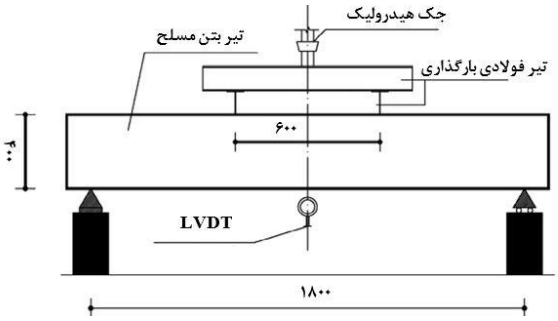
با توجه به اینکه در مدل‌سازی، المان‌ها به صورت جدا از یکدیگر در نظر گرفته شده‌اند می‌باید با استفاده از اندرکنش، رفتار مناسب بخش‌های مدل شده را ایجاد نمود. برای این منظور در نرم‌افزار با استفاده از اندرکنش "embedded" میلگردهای مدل شده به صورت مدفون در بتن در نظر گرفته شده‌اند. در شکل شماره ۵ اندرکنش ایجاد شده نشان داده شده‌اند.



شکل شماره ۵- اندرکنش‌های ایجاد شده در تیر بتنی

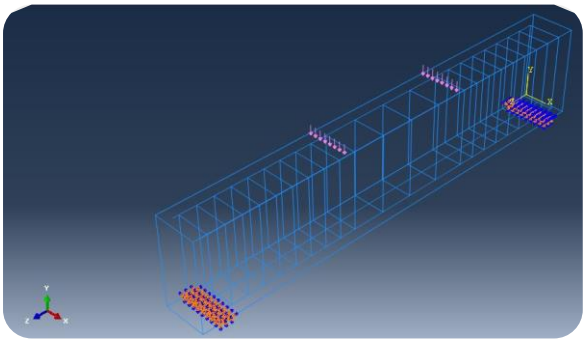
۲-۵- بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی

برای بارگذاری نمونه‌ی مدل سازی شده در نرم‌افزار همانند فرآیند انجام شده در مدل آزمایشگاهی عمل شده است. همان‌طور که در شکل شماره ۶ مشاهده می‌شود بارگذاری به صورت بار افزون تا شکست کامل نمونه انجام شده است [۱۷].



شکل شماره ۶- مشخصات شرایط تکیه گاهی و بارگذاری در مدل آزمایشگاهی

در شکل شماره ۷ نیز شبیه‌سازی کامل شرایط بارگذاری و شرایط تکیه گاهی به صورت دقیق مطابق آنچه در آزمایشگاه انجام شده است در نرم‌افزار مدل سازی و ارائه شده است. در تحلیل‌های عددی و تهیه مدل‌های عددی همواره تلاش می‌شود تا جزئیات بارگذاری و شرایط حاکم بر نمونه به صورت دقیق مدل شده و در نظر گرفته شود تا میزان خطا در نتایج به دست آمده از مدل عددی به نسبت مدل آزمایشگاهی دارای کمترین میزان ممکن باشد.



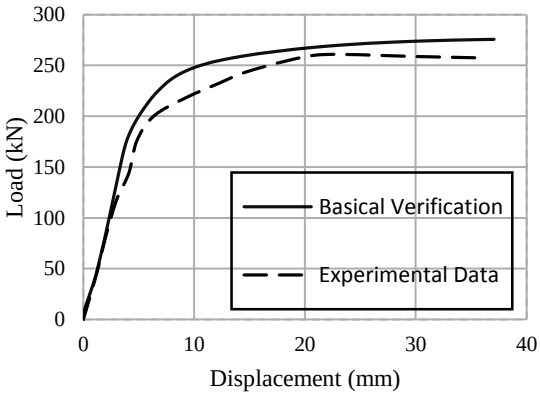
شکل شماره ۷– مشخصات شرایط تکیه گاهی و بارگذاری در مدل عددی در نم افزار آباکوس

۲-۶- المان‌های در نظر گرفته شده برای انجام تحلیل

برای مدل‌سازی تیر از المان سه بعدی ۸ نقطه‌ای C3D8R و برای مدل سازی میلگردهای طولی، خاموت‌ها و کابل فولادی از المان تراس ۲ نقطه‌ای T3D2 در این تحقیق استفاده شده است.

۲-۷- صحت سنجی مدل عددی

پس از بارگذاری و تحلیل مدل تهیه شده مطابق مدل آزمایشگاهی، نمودار نیرو– جا به جایی حاصل از تحلیل عددی با نمودار نیرو – جا به جایی حاصل از آزمایش مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند. همان‌طور که در شکل شماره ۷ مشاهده می‌شود رفتار مدل عددی با رفتار مدل آزمایشگاهی هم خوانی داشته و با توجه به این نمودار می توان از مدل عددی جهت انجام مطالعه پارامتریک استفاده نمود.

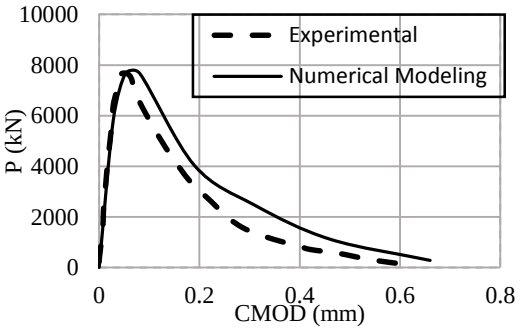


شکل شماره ۸–صحت سنجی نرم افزار آباکوس با تهیه مدل عددی از تحقیق آزمایشگاهی

پس از انجام صحت‌سنجی نرم‌افزار المان‌های تقویتی مربوطه (لایه بتنی پس کشیده) به مدل اصلی اضافه شده و سپس تیر بتنی تقویت شده تحت بارگذاری قرار گرفته است. در ادامه به بررسی نحوه مدل‌سازی لایه تقویت مورد استفاده در این تحقیق پرداخته شده است.

۲-۸- تقویت با استفاده از اضافه نمودن لایه‌ی بتنی پس کشیده

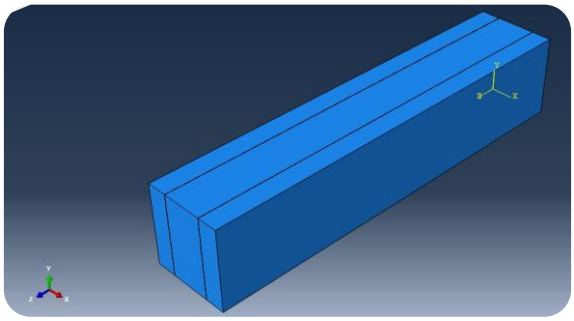
برای بررسی صحیح و دقیق رفتار کابل در تیر پس‌کشیده در تحقیق پیش رو، ابتدا مدل عددی با استفاده از اطلاعات تحقیق آزمایشگاهی تهیه شده [۲۲]، و سپس نتایج به دست آمده از مدل عددی با نتایج آزمایشگاه مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل شماره ۹). در مدل آزمایشگاهی و عددی تیر بتنی به طول ۶۰۰ میلی‌متر با مقطع ۴۰*۱۵۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفته است.



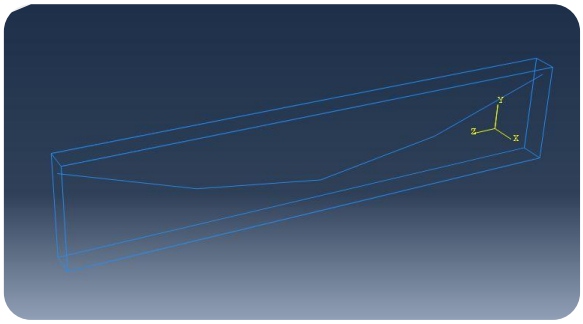
شکل شماره ۹– صحت سنجی نرم افزار آباکوس با تهیه مدل عددی از تحقیق آزمایشگاهی

بررسی‌ها و مطالعات انجام شده در زمینه ویژگی‌ها و عملکرد مناسب بتن‌های پس‌کشیده تحت بارهای سایکلیک و زلزله نشان می‌دهد که می‌توان از این دست از بتن‌های مسلح به عنوان یک روش تقویت جدید در خصوص مقاوم سازی و بهسازی سازه های بتن مسلح و فولادی نیز استفاده نمود. بررسی و ساخت مدل‌های عددی اولیه نشان‌دهنده همسازی و تطابق رفتار و بهبود عملکرد تیرهای بتنی مسلح می‌باشد. جهت این منظور مدل ساخته شده اولیه (مدل صحت‌سنجی شده در نرم‌افزار) با استفاده از اضافه نمودن یک‌لایه ۱۰۰ میلی‌متری مطابق شکل شماره ۱۰ مورد تقویت قرار گرفت. پس کشیدگی در این لایه تقویت با اضافه نموده یک کابل و اعمال نیروی پس‌کشیدگی با درصدهای مختلف بر اساس ظرفیت کششی کابل مورد نظر انجام پذیرفت. نیروی

پس‌کشیدگی در کابل مورد نظر به میزان ۵۰ و ۱۰۰ درصد حد مجاز پس‌کشیدگی اعمال شده و در نهایت مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته شده است. لازم به ذکر است به دلیل استفاده از یک رشته کابل فولادی جهت مسلح نمودن بتن از میزان کشش ۰ درصد صرفه نظر شده است.



(الف)



(ب)

شکل شماره ۱۰: (الف) اضافه نمودن لایه تقویتی بتن پیش‌تنیده به مدل تحلیلی در نرم افزار، (ب) نمای قرارگیری کابل فولادی پیش‌تنیده شده در لایه تقویت

۲-۹- اعمال پس کشیدگی در کابل فولادی

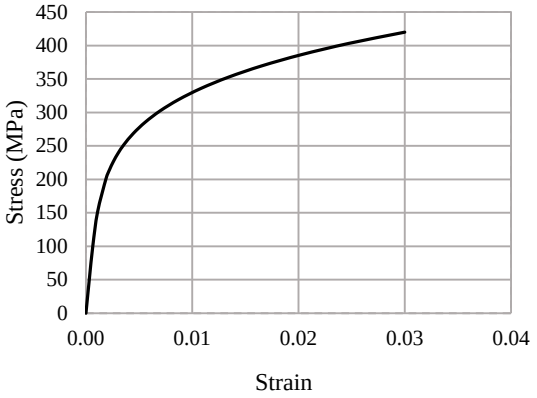
اعمال نیروی پیش‌تنیدگی در نرم افزار آباکوس برای کابل‌های فولادی به دو روش قابل انجام می باشد.

۱- ایجاد پیش تنیدگی با استفاده از حرارت
۲- ایجاد پیش تنیدگی با استفاده از تنش

در این تحقیق جهت ایجاد پس کشیدگی در کابل فولادی از روش دوم استفاده شده است و میزان پس کشیدگی برابر با میزان تنش متناسب با درصد پس کشیدگی مورد نظر قبل از بارگذاری و تحلیل نمونه به کابل فولادی اعمال شده است.

مقاومت بتن لایه تقویت همان مقاومت بتن تیر اصلی مدل سازی شده در نظر گرفته شده است.

برای مدل‌سازی کابل پس کشیده در نرم‌افزار از فرضیات موجود در مقاله استفاده شده است [۱۸]. کابل در نظر گرفته شده دارای قطر ۵ میلی‌متر می‌باشد و حد مجاز اعمال پیش‌تنیدگی در آن به مقدار ۱۰۱۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است (جدول شماره ۲). مدول الاستیسیه مفروض جهت مدل سازی کابل مقدار ۲۰۰ گیگاپاسکال فرض شده، همچنین در شکل شماره ۱۱ مدل رفتاری استفاده شده جهت تحلیل نشان داده شده است.



شکل شماره ۱۱: مدل رفتاری در نظر گرفته شده کابل فولادی پیش‌تنیده

جدول ۲- مشخصات کابل فولادی پس کشده مورد استفاده در مدل سازی

کابل فولادی	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	قطر (میلی متر)
	۲۰۰۰۰۰	۱۰۱۰	۵

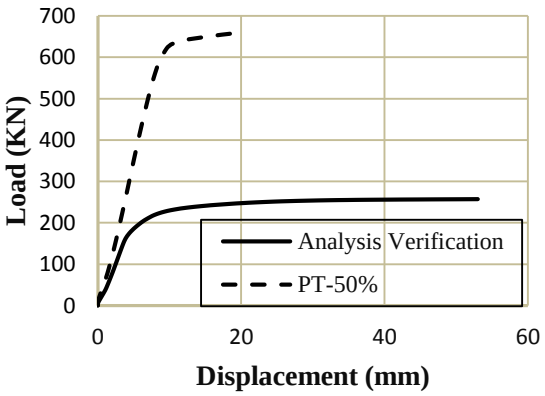
۲-۱۰- نتایج تحلیل اضافه نمودن لایه بتنی پیش‌تنیده به تیر بتنی مدل سازی شده

پس از انجام تحلیل با استفاده از نرم افزار آباکوس نتایج به دست آمده حاصل از تقویت تیر بتنی مسلح با استفاده از اضافه نمودن لایه بتنی پس‌کشیده در جدول شماره ۳ نشان داده شده است، همچنین در ادامه نتایج به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۳- نتایج حاصل از تحلیل عددی تیر بتن مسلح تقویت شده با استفاده از لایه تقویت پس کشیده بتنی

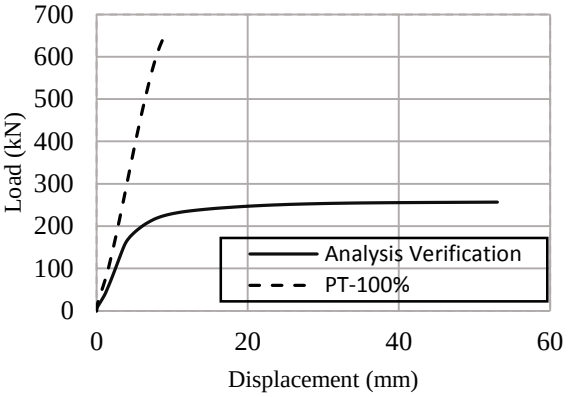
شکل پذیری (μ)	Δ_y (میلی متر)	Δ_u (میلی متر)	مقاومت نهایی (کیلو نیوتن)	میزان پیش تنیدگی (٪)
۵/۶۰	۹/۴۸	۵۳/۰۱	۲۵۵/۶۹	–
۲/۳۱	۸/۵۹	۱۹/۸۶	۶۵۹/۳۶۸	۵۰
۱/۱۱	۸/۶۰	۹/۵۸	۶۶۰/۴۸۲	۱۰۰

همان‌طور که در شکل شماره ۱۲ مشاهده می‌شود، ظرفیت باربری نهایی نمونه تقویت شده با استفاده از اضافه نمودن لایه تقویت بتنی با اعمال پس‌کشیدگی (۵۰٪) برابر ۶۵۹/۳۶۸ کیلونیوتن می‌باشد. این مقدار در مقایسه با تیر بتنی بدون تقویت به میزان ۱۵۶/۷۷ درصد افزایش باربری داشته است.



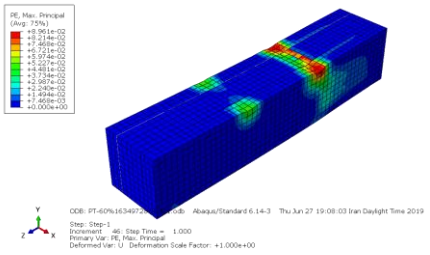
شکل شماره ۱۲- نمودار نیرو – جابه‌جایی نمونه بدون تقویت و نمونه تقویت شده با اضافه نمودن لایه بتنی بدون پس‌کشیدگی (۵۰ ٪)

با اعمال پس‌کشیدگی به میزان ۱۰۰ درصد حد مجاز در کابل فولادی مورد استفاده جهت مدل سازی (شکل شماره ۱۳)، ظرفیت باربری نمونه برابر ۶۶۰/۴۸۲ کیلونیوتن گردید که در مقایسه با نمونه بدون تقویت بیش از ۱۵۰ درصد افزایش داشته و نسبت به نمونه بتنی تقویت شده با پس‌کشیدگی به میزان ۵۰ درصد حد مجاز نیز جابه‌جایی کمتری را از خود نشان داده است.



شکل شماره ۱۳–نمودار نیرو – جابه‌جایی نمونه تقویت شده با اضافه نمودن لایه بتنی با پیش تنیدگی (۱۰۰٪)

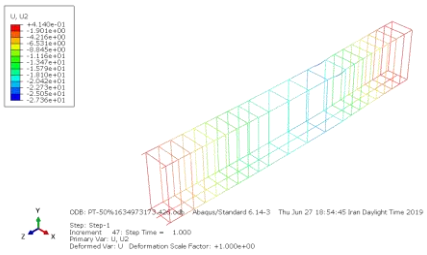
یکی از پدیده‌هایی که پس از بارگذاری چهار نقطه‌ای بر روی سطح تیرهای بتن مسلح به مشاهده می گردد، خردشدگی سطح بتن (آسیب فشاری) می‌باشد. در شکل ۱۴ همان‌طور که مشاهده می‌شود سطح بتن دچار آسیب شده، در صورتی که در مدل عددی تیر بتن مسلح بدون تقویت، آسیب‌دیدگی سطح بتن ناشی از تنش فشاری مشاهده نشده است. با توجه به تقویت تیر و اضافه نمودن لایه‌های تقویت پس کشیده جابه‌جایی ها در راستای ۲ (Y) کاهش پیدا نموده است که سبب آسیب‌دیدگی سطح بتن در نتیجه بارگذاری حاصل بوده است.



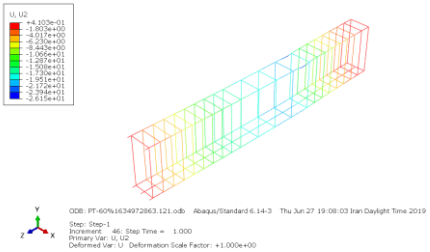
شکل شماره ۱۴- آسیب دیدگی سطح بتن ناشی از بارگذاری

با توجه به استفاده از کابل پس‌کشیده در روش تقویت در شکل شماره ۱۵ و ۱۶ جابه‌جایی های به وجود آمده در میلگرد تحت تأثیر بارگذاری یکسان در مدل‌های با پس‌کشیدگی ۵۰ درصد و ۱۰۰ درصد نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد بیشینه جابه‌جایی در دهانه میانی نمونه تقویت شده با اعمال پس‌کشیدگی به میزان ۵۰٪ به میزان ۲۲ میلی‌متر و بیشینه جابه‌جایی در دهانه میانی نمونه تقویت شده با اعمال پس‌کشیدگی به میزان ۱۰۰٪ به میزان ۶ میلی‌متر به نسبت نمونه

دیگر کاهش پیدا نموده است. این موضوع بیانگر تأثیر اعمال نیروی پس‌کشیدگی در روش تقویت مورد استفاده قرار داده شده می‌باشد.



شکل شماره ۱۵– بیشینه جابه‌جایی در دهانه میانی نمونه تقویت شده با اعمال پس‌کشیدگی به میزان ۵۰٪



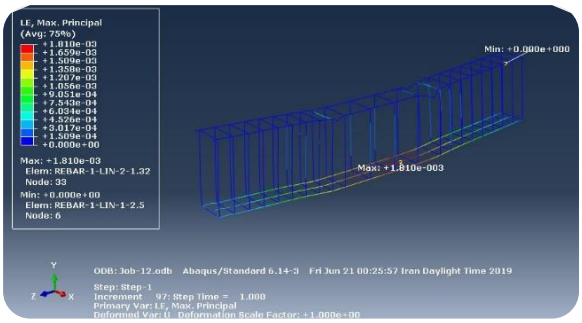
شکل شماره ۱۶: بیشینه جابه‌جایی در دهانه میانی نمونه تقویت شده با اعمال پس‌کشیدگی به میزان ۱۰۰٪

۳- نتیجه‌گیری

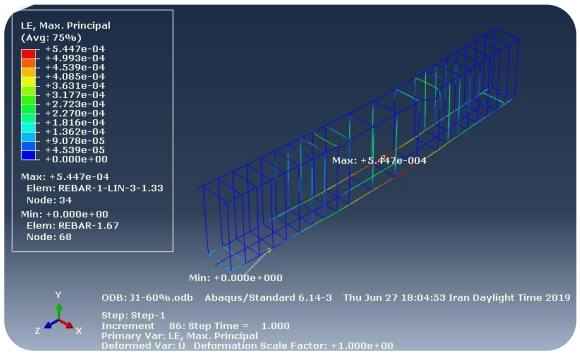
روش تقویت ارائه شده در این تحقیق روشی نوین و کاربردی در تقویت خمشی تیرهای بتن مسلح می‌باشد. این روش تاکنون مورد استفاده قرار نگرفته است.

استفاده از روش تقویت اضافه نمودن لایه بتنی پس‌کشیده به تیر بتن مسلح می‌تواند عملکرد این عضو سازه‌ای را بهبود دهد و همچنین ظرفیت خمشی تیر را به میزان چشم‌گیر و قابل ملاحظه‌ای افزایش دهد. با توجه به ماهیت ساختاری این روش می‌توان از آن در تقویت و بهسازی شاه تیرهای بتن مسلح پل‌ها و تیرهای ساختمانی مورد استفاده قرارداد. از جمله مزیت‌های استفاده از این روش عدم ایجاد آویز می‌توان اشاره نمود که این مهم سبب حفظ تراز ارتفاعی در پروژه می‌گردد.

مفصل پلاستیک در تیر بتن مسلح بدون تقویت در دهانه میانی تشکیل می‌گردد که در شکل ۱۷ نشان داده شده است. پس از اعمال تقویت مفصل پلاستیک به دهانه‌های $\frac{1}{3}$ ابتدایی و انتهایی انتقال پیدا کرده است. یکی دیگر از تأثیرات مثبت استفاده از این روش تقویت، بهبود الگوی توزیع ترک و مکانیزم آسیب در تیر بتن مسلح تقویت شده نسبت به تیر بتن مسلح بدون تقویت می‌باشد. لازم به ذکر است به دلیل نوع روش تقویت مورد استفاده و کاهش جا به جایی در نمونه پایه، شکل‌پذیری کاهش پیدا می‌نماید که این مهم باتوجه به ماهیت این روش قابل درک بوده و دور از انتظار نمی‌باشد.



(الف) بیشینه تنش در تیر بتن مسلح بدون تقویت



ب بیشینه تنش در تیر بتن مسلح تقویت شده

شکل شماره ۱۷– محل ایجاد مفصل پلاستیک در تیر بتن مسلح بدون تقویت (الف) و تیر بتن مسلح تقویت شده با استفاده از اضافه نمودن لایه بتنی پس‌کشیده (ب)

۴- مراجع

[1] Aldhafairi F, Hassan A, Abd-EL-Hafeza L, Abouelezza A. Different techniques of steel jacketing for retrofitting of different types of concrete beams after elevated temperature exposure. Structures. 2020; 28: 713–725.
[2] Chalioris C, Thermou G, Pantazopoulou S. Behaviour of rehabilitated RC beams with self-compacting concrete jacketing – Analytical model and test results. Construction and Building Materials. 2014; 55: 257–273.
[3] Al-Bayati G, Al-Mahaidi R, Kalfat R. Experimental investigation into the use of NSM FRP to increase the torsional resistance of RC beams using epoxy resins and cement-based adhesives. Construction and Building Materials. 2016; 124: 1153–1164.
[4] Sumathi A, Arun Vignesh S. Study on behavior of RCC beams with externally bonded FRP members in flexure. Advances in Concrete Construction. 2017; 5: 625-638.
[5] Al-Khafaji A, Salim H, El-Sisi A. Behavior of RC beams strengthened with CFRP sheets under sustained loads. Structures. 2021; 33: 4690–4700.
[6] Al-Fakih A, Mohd Hashim M, Alyousef R, Mutafi A, Abo Sabah S, Tafsirojjaman T. Cracking behavior of sea sand RC beam bonded externally with CFRP plate. Structures. 2021; 33: 1578–1589.
[7] Cai L, Liu Q, Guo R. Study on the shear behavior of RC beams strengthened by CFRP grid with epoxy mortar. Composite Structures. 2021; 275.
[8] Abdallah M, Al Mahmoud F, Khelil A, Mercier J. Efficiency of EB CFRP composites for flexural strengthening of continuous RC beams: A comparative study with NSM CFRP rods. Structures. 2021; 34: 1567–1588.
[9] Kim M, Lee Y. Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Retrofitted with Modularized Steel Plates. Applied Science. 2021; 11.
[10] Alhadid M, Youssef M. Assessment of the flexural behavior of reinforced concrete beams strengthened with concrete jackets. Engineering Structures. 2018; 167: 108–120.
[11] Alhadid M, Youssef M. Analysis of reinforced concrete beams strengthened using concrete jackets. Engineering Structures. 2017; 132: 172–187.
[12] El-Sisi A, Hassanin A, Shabaan H, Elsheikh A. Effect of external post-tensioning on steel–concrete composite beams with partial connection. Engineering Structures. 2021; 247: 113-130.
[13] Wang X, Liu X. Predicting the flexural capacity of RC beam with partially unbonded steel reinforcement. Computers and Concrete. 2009; 6: 235-252.
[14] El-Azab A, Mohamed H. Effect of tension lap splice on the behavior of high strength concrete (HSC) beams. HBRC Journal. 2014; 10: 287–297.
[15] lee j, fenves g. plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures. journal of engineering mechanics. 1998; 124: 892–900.
[16] Smith M. ABAQUS/Standard User's Manual. Dassault Systèmes Simulia Corp. 2006; 6.6.
[17] ASTM C78 / C78M Standard test method for flexural strength of concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). 2018.
[18] Dong W, Wua Z, Zhou X. Calculating crack extension resistance of concrete based on a new crack propagation criterion. Construction and Building Materials. 2013; 38: 879–889.

Numerical Study of the Effect of Adding a Posttensioned Stiffener Layer on the Flexural Strength of Reinforced Concrete Beams

Alireza Mirzaee*
PhD of Structural Engineering, Technical Design Office, Deputy of Technical & Development Affairs Shiraz Municipality, Iran
Ashkan Torabi
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Marvdasht Branch, Islamic Azad University, Marvdasht, Iran
Amir Tabebordbar
Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Jahrom Branch, Islamic Azad University, Jahrom, Iran
a.mirzaee@miau.ac.ir

Abstract

Retrofitting of buildings and improving their performance has received a lot of attention from researchers and engineers in recent years. With the advancement of technology and the presentation of new materials in the field of construction, the quality of retrofitting and improving of structures has also enhanced. Many structures in the world have been built using reinforced concrete materials, which have exhibited a good performance during previous earthquakes, too. The reinforcement of these structures and the presentation of new solutions to improve their performance have also been studied by many researchers and various solutions such as the use of concrete jackets have been proposed and applied. In the present study, using the posttensioned concrete, a new approach is presented to strengthen the flexural strength of reinforced concrete beams using ABAQUS software. In this method, by adding a posttensioned concrete layer to the reinforced concrete beam (base sample) from both sides, its flexural performance has been investigated. The results of the analyses indicate the appropriate behavioural compatibility of this method due to the high tensile capacity of steel cable, which can have a significant effect on ductility, improving performance, increasing the capacity of reinforced concrete beams and transferring of the plastic joint from the middle span to $\frac{1}{3}$ of the end of the beam.

Keywords: Retrofitting, Post-tensioning, RC Beam, ABAQUS software, Plastic joint

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license: (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)