

تأثیر استفاده از الیاف FRP بر شاخص خسارت، سطوح عملکرد لرزه‌ای و شکل پذیری ستون‌های دایره‌ای شکل پایه پل‌ها با استفاده از تحلیل‌های NSP و IDA

احسان باقری^۱، فرهاد دانشجو*^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه سازه، مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
^۲ استاد گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

دریافت: ۱۳۹۶/۸/۱۳، بازنگری: ۱۴۰۰/۳/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۲۵، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۳/۲۵

چکیده

یکی از روش‌های بهبود عملکرد لرزه‌ای ستون‌های دایره‌ای شکل پل‌ها، استفاده از الیاف FRP (Fiber Reinforced Polymer) است. در این پژوهش، عملکرد لرزه‌ای ستون‌ها با مقطع دایره‌ای در حالت‌های بدون محصورشدگی و همچنین با در نظر گرفتن تعداد لایه‌های مختلف الیاف FRP به دور آن‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. اثر استفاده از الیاف در تعداد لایه‌های مختلف بر ظرفیت شکل‌پذیری، مقاومت تسلیم و سطوح عملکرد لرزه‌ای این ستون‌ها با انجام تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی ارزیابی شده است. نتایج تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی بار افزون، نشان می‌دهد که با افزایش محصورشدگی، در اثر استفاده از تعداد لایه‌های مختلف الیاف، ظرفیت شکل‌پذیری و مقاومت تسلیم این ستون‌ها افزایش خواهد یافت. همچنین نتایج تحلیل‌های تاریخیچه زمانی غیرخطی حاکی از کاهش تقاضای شکل‌پذیری و شاخص خسارت لرزه‌ای این ستون‌ها تحت زلزله‌های دور از گسل ثبت‌شده بر روی خاک تیپ C است. آنالیزهای دینامیکی غیرخطی فزاینده نیز بر روی مدل‌های مختلف، با استفاده از ۲۲ رکورد زلزله معرفی‌شده در گزارش FEMA-P695 انجام شده است. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که استفاده از این الیاف به دور ستون‌ها، سطوح عملکرد لرزه‌ای خدمت‌رسانی بی‌وقفه، قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش آن‌ها را بهبود می‌بخشد. تأثیر این الیاف در افزایش سطح عملکرد لرزه‌ای آستانه فروریزش ستون‌ها، قابل توجه است.

کلیدواژه‌ها: الیاف FRP، محصورشدگی، ظرفیت شکل‌پذیری، تقاضای شکل‌پذیری لرزه‌ای، شاخص خسارت، مقاومت تسلیم، سطوح عملکردی.

۱- مقدمه

در پایه پل‌ها نظیر زلزله‌های کوبه^۱ و نورتریج^۲ ظرفیت پایین این ستون‌ها در تحمل تغییر مکان‌های جانبی زیاد بوده است. یکی از راهکارهای غلبه بر این مشکل، استفاده از یک سیستم مقاوم‌سازی مناسب است که بتواند ظرفیت شکل‌پذیری این ستون‌ها را افزایش و تقاضاهای شکل‌پذیری ناشی از زلزله را کاهش دهد (Zoppo و Ludovico، ۲۰۱۷). یکی از اهداف این پژوهش بررسی میزان تأثیرگذاری استفاده از الیاف FRP به‌منظور افزایش ظرفیت شکل‌پذیری و کاهش تقاضای شکل‌پذیری تحت اثر بارهای لرزه‌ای است. یکی از روش‌های افزایش مقاومت جانبی ستون‌ها در حین بارهای لرزه‌ای، استفاده از الیاف FRP به دور ستون‌های پایه پل‌ها است. در این پژوهش اثر استفاده از این الیاف به‌منظور افزایش مقاومت جانبی این ستون‌ها به‌صورت کمی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی‌های انجام‌شده در زلزله‌های رخ‌داده نظیر زلزله کوبه

پایه‌های مورد استفاده در پل‌ها نقش کلیدی و تعیین‌کننده در عملکرد لرزه‌ای آن‌ها در حین زلزله دارد. در سال‌های اخیر تعیین پتانسیل آسیب‌پذیری سازه‌های موجود و بررسی راهکارهای مقاوم‌سازی آن‌ها در مناطق لرزه‌خیز گسترش پیدا کرده است. یکی از روش‌های متداول برای مقاوم‌سازی و بهبود عملکرد لرزه‌ای پایه پل‌ها استفاده از الیاف FRP به‌صورت دورپیچ در لایه‌های مختلف است (Polat و Turgay، ۲۰۱۰).

محصورشده‌گی بتن هسته در ستون‌های دایره‌ای نقش اساسی در عملکرد لرزه‌ای آن‌ها دارد. استفاده از آرماتورهای عرضی کم و محصورشدگی نامناسب هسته بتنی باعث کاهش ظرفیت باربری فشاری و خمشی مقطع شده و می‌تواند باعث انهدام پایه‌های پل‌ها شود. یکی از مشکلات ایجادشده در رفتار ستون‌های مورد استفاده

2. Northridge (1994)

1. Kobe (1995)

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۲۱-۸۲۸۸۳۳۸۴

آدرس ایمیل: ehsan.bagheri@modares.ac.ir (ا. باقری)، danesh_fa@modares.ac.ir (ف. دانشجو).

محصورشده با الیاف ندارد. ترک‌های موجود در بال‌های تیرهای محصورشده با الیاف تأثیر چندانی بر کاهش سختی تیر ندارند؛ اما ترک‌هایی که در جان تیر ایجاد شده‌اند سختی تیر را به شدت کاهش می‌دهند. براین اساس در پژوهش حاضر یکی از پارامترهای موردبررسی، تغییر سختی ستون‌های بتن‌آرمه محصورشده با الیاف FRP می‌باشد.

Shao و همکاران (۲۰۰۶) به مدل‌سازی سیکلیک^۴ بتن‌های محصورشده با الیاف FRP پرداختند. مدل‌های ارائه‌شده برای مدل‌سازی رفتار بتن‌های محصورشده توسط محققان قبلی اکثراً برای بارهای مونوتونیک^۵ بوده است و رفتار سیکلیک آن‌ها موردبررسی قرار نگرفته است. در این تحقیق ۲۴ نمونه بتن محصورشده با الیاف FRP با مقطع دایره‌ای تحت بارگذاری فشاری تک‌محوره در حالت‌های مختلف بارگذاری و باربرداری، انواع و ضخامت‌های مختلف الیاف و الگوهای متفاوت بارگذاری موردبررسی قرار گرفتند. با انجام رگرسیون بر روی نتایج این تست‌های آزمایشگاهی مدلی دو خطی برای مدل‌سازی رفتار سیکلیک بتن‌های محصورشده با الیاف FRP ارائه شد. انطباق مناسب نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی و نتایج آزمایشگاهی نشانگر قابلیت بالای این مدل‌ها در پیش‌بینی رفتار سیکلیک بتن‌های محصورشده با الیاف می‌باشد. براین اساس با توجه به این‌که در این پژوهش ستون‌های موردبررسی تحت بارگذاری‌های لرزه‌ای قرار گرفته‌اند، از مدل پیشنهادی توسط این محققان استفاده شده است.

Turgay و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی آزمایشگاهی عملکرد فشاری ستون‌های دایره‌ای شکل بزرگ‌مقیاس، که به‌وسیله الیاف CFRP محصور شده‌اند پرداختند. در این آزمایش‌ها ۳۰ نمونه مختلف در حالت‌های محصورنشده، نیمه‌محصور و محصورشده کامل موردبررسی قرار گرفتند. نتایج تست‌های آزمایشگاهی نشان داد که ستون‌هایی که به‌صورت محصورشده کامل هستند، در یک چهارم بالایی و پایینی خود دچار شکست شده‌اند. ستون‌هایی که به‌صورت نیمه‌محصور هستند نیز در فاصله ۱۰۰ میلی‌متر پایینی خود دچار گسیختگی شدند. در ستون‌هایی که تنها از یک لایه الیاف CFRP^۶ استفاده شده است، قابلیت تحمل تغییر مکان‌های جانبی بین ۲۰٪ تا ۵۰٪ افزایش یافته است براین اساس در پژوهش حاضر اثرات استفاده از الیاف بر ظرفیت شکل‌پذیری و تقاضای شکل‌پذیری ستون‌های دایره‌ای شکل بتن‌آرمه محصورشده با الیاف FRP موردبررسی قرار گرفته است.

Youcef و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر محصورسازی ستون‌های بتن‌آرمه توسط الیاف CFRP را بر ناپایداری کمانشی آن‌ها موردبررسی قرار دادند. این تحقیق به بررسی اثرات مثبت استفاده از این الیاف پلیمری بر کاهش ناپایداری کمانشی و تغییر رفتار

و نورث‌ریج در مورد پایه‌های پل‌ها نشان می‌دهد که خسارات ایجادشده در آن‌ها در حین زلزله به‌اندازه‌ای بوده که استفاده از آن‌ها را پس از وقوع زمین‌لرزه‌های شدید مختل کرده است. یکی از روش‌های کاهش خسارت لرزه‌ای در این ستون‌ها، مقاوم‌سازی آن‌ها با استفاده از الیاف پلیمری است. در این مطالعه با استناد به یک شاخص مناسب، به بررسی کمی خسارات ستون‌ها در حالت‌های استفاده و عدم استفاده از این الیاف پرداخته و میزان تأثیر استفاده از آن‌ها در کاهش خسارت لرزه‌ای را موردبررسی قرار خواهیم داد (Eid و Paultre، ۲۰۱۷).

ازجمله نگرانی‌های مهم در مورد ستون‌های پایه پل‌ها، عدم تأمین سطوح عملکرد لرزه‌ای آن‌ها در حین زلزله است که باعث می‌شود ستون‌ها رفتار لرزه‌ای مناسبی نداشته باشند و تحت زلزله‌های با شدت متوسط و کم نیز در آستانه فروریزش قرار گیرند (دهقانی و دانشجو، ۱۳۹۶). در این تحقیق با انجام تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزاینده بر روی این ستون‌ها با در نظر گرفتن محصورشدگی ناشی از الیاف، سطوح عملکرد لرزه‌ای، خدمت-رسانی بی‌وقفه، قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش آن‌ها موردبررسی قرار گرفته است.

۲- مرور ادبیات فنی

اولین کاربرد الیاف FRP در فعالیت‌های عمرانی در سال ۱۹۶۸، استفاده در سازه یک سد ساخته‌شده در بن‌قازی^۳ بود. به‌مرور توجه مهندسی به سمت نوسازی زیرساخت‌های حمل‌ونقل با استفاده از کامپوزیت‌های FRP برای نگهداری و مرمت پل‌های موجود و زیرساخت‌های شهری جلب شد. بسیاری از پروژه‌های پل‌های عابر پیاده در آمریکا با استفاده از انواع سازه‌های کامپوزیت ساخته شده‌اند. خصوصاً در ایالت‌های لرزه‌خیز، پایه‌های بتنی پل‌ها به‌منظور افزایش شکل‌پذیری با سیستم چسباندن ورقه‌های FRP بر روی سطح خارجی بتن تقویت شده‌اند. از موارد استفاده دیگر مهاربندی صفحه‌ای با استفاده از الیاف FRP به‌منظور تقویت اجزای بتنی و یا فولادی پل‌ها می‌باشد. ازجمله پژوهش‌های انجام‌شده در زمینه استفاده از الیاف FRP به‌منظور تقویت ستون‌های بتن-آرمه دایره‌ای شکل می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

دانشجو و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی رفتار خمشی تیرهای ترک‌خورده فولادی قبل و بعد از بهسازی با ورق‌های FRP پرداختند. بدین منظور رفتار تیرهای فولادی محصورشده با الیاف FRP از نظر سختی و مقاومت بررسی شده و تأثیر استفاده از این الیاف بر پارامترهایی نظیر طول، عرض، زاویه و فواصل ترک‌ها مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده عرض و زاویه ترک‌های ایجادشده تأثیر چندانی بر سختی و مقاومت تیرهای

5. Monotonic

6. Carbon Fiber Reinforced Polymer

3. Benghazi city

4. Cyclic

در پژوهش حاضر به بررسی رفتار لرزه‌ای ستون‌های بتن‌آرمه، تقاضای شکل‌پذیری، شاخص خسارت و مقاومت تسلیم ستون‌های بتن‌آرمه دایره‌ای شکل محصورشده با الیاف FRP پرداخته شده است.

نوری‌شیرازی و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی آزمایشگاهی استفاده هم‌زمان از عناصر فولادی مسلح‌کننده و الیاف FRP به منظور تقویت ستون‌ها و پایه‌های بتنی غیرمسلح پرداختند. نمونه‌های استوانه‌ای از بتن با مقاومت پایین ساخته شده و تحت بارگذاری فشاری در شرایط آزمایشگاهی، برخی مشخصات مکانیکی از قبیل میزان جذب انرژی، تغییرشکل محوری، سختی اولیه و منحنی رفتاری بار-تغییر شکل برای آن‌ها تعیین شد. دو نمونه تقویت نشده به‌عنوان نمونه معیار انتخاب شده و ۱۸ نمونه دیگر با استفاده از روش‌های مرسوم تقویت از قبیل دورپیچ کردن با CFRP و GFRP، دورپیچ کردن با استفاده هم‌زمان پوشش FRP و میلگردهای فولادی نصب‌شده در سطح بتن و درنهایت روش پیشنهادی در این تحقیق تقویت شدند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با استفاده از شیوه تقویت پیشنهادی ظرفیت باربری فشاری، میزان جذب انرژی و تغییرشکل محوری نسبت به استفاده از سایر روش‌های تقویت بهبود یافته است. از روش تقویتی پیشنهادشده می‌توان برای تقویت برشی و خمشی ستون‌ها و پایه‌های بتنی غیرمسلح پل‌های جاده‌ای و راه‌آهن استفاده کرد.

در آیین‌نامه‌های طراحی لرزه‌ای پل‌ها براساس عملکرد مانند آیین‌نامه CALTRANS استفاده از دو روش NSP^۱ و IDA^۲ برای تعیین ظرفیت نقطه هدف جایز شده است. اما تاکنون پژوهش جامعی در زمینه تأثیر استفاده از الیاف FRP به‌منظور تقویت ستون‌ها و پایه‌های بتنی بر شاخص خسارت و سطوح عملکرد لرزه‌ای ستون‌های در پایه پل‌ها در حالت‌های مختلف محصورشدگی با استفاده از این دو روش گزارش نشده است.

۳- مدل‌های مورد استفاده

۳-۱- مشخصات ستون مورد بررسی

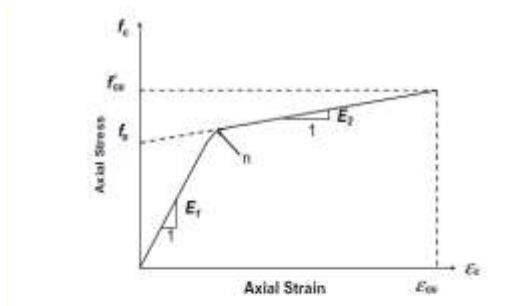
ستون مورد استفاده برای تحلیل‌ها به‌صورت بتنی با مقطع دایره‌ای به قطر 365mm و ارتفاع 1470mm است. مقاومت فشاری بتن محصور نشده برابر 40.4 مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. تنش تسلیم و مدول الاستیسیته^۱ فولاد به ترتیب برابر 450 و 2×10^5 مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. درصد آرماتور طولی مقطع نیز برابر 0.478 درصد است. مشخصات ستون موردنظر بر اساس یکی از مدل‌های مورد استفاده در پژوهش Hu و همکاران (۲۰۱۴) انتخاب و مدل‌سازی ستون موردنظر در نرم‌افزار Opensees انجام شده است. با توجه به

ستون‌های بتن‌آرمه لاغر، تحت اثر بارهای فشاری پرداخته است. بدین منظور شش ستون بتن‌آرمه دارای مقطع دایره‌ای شکل که توسط یک لایه الیاف پلیمری کربنی محصورشده و تحت بارگذاری محوری فشاری با خروج از مرکزیت دو جهته قرار دارد مورد بررسی قرار گرفتند. پارامترهای نظیر مقاومت، سختی، شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که برای ضرایب لاغری ۵۵ تا ۱۰۰٪ افزایش ظرفیت باربری فشاری نسبت به حالت عدم محصورشدگی در حالت اعمال خروج از مرکزیت بارگذاری، بین ۷٪ تا ۱۴٪ می‌باشد. درحالی‌که بدون اعمال اثرات خروج از مرکزیت بارگذاری این افزایش بین ۲۰٪ تا ۶۰٪ می‌باشد. همچنین نتایج تست‌های آزمایشگاهی نشان داد که با افزایش لاغری تأثیر استفاده از الیاف باعث افزایش هرچه بیشتر ظرفیت باربری فشاری ستون‌ها خواهد شد. براین اساس در پژوهش حاضر مقاومت تسلیم، تغییر مکان تسلیم و شاخص خسارت ستون‌های بتن‌آرمه دایره‌ای شکل محصورشده با الیاف FRP مورد بررسی قرار گرفته است.

Omar و همکاران (۲۰۱۶) به بررسی آزمایشگاهی ۱۶ ستون دایره‌ای شکل بتنی محصورشده با الیاف FRP تحت اثر بارگذاری فشاری سیکلیک پرداختند. در این پژوهش جهت دور پیچ کردن الیاف به دور ستون و همچنین نسبت قطر مقطع به ضخامت الیاف، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج تست‌های آزمایشگاهی نشان داد که دور پیچ کردن الیاف با زاویه ۴۵ درجه کم‌ترین مقاومت فشاری و بیش‌ترین کرنش گسیختگی را برای مقطع به‌همراه خواهد داشت. دور پیچ کردن الیاف با زاویه صفر درجه بیش‌ترین مقاومت فشاری و کم‌ترین کرنش گسیختگی را نشان می‌دهد.

Zoppo و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی آزمایشگاهی اثرات استفاده از الیاف FRP به‌منظور افزایش ظرفیت لرزه‌ای ستون‌های بتن‌آرمه پرداختند. به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری ستون‌های بتن‌آرمه موجود، استفاده از الیاف FRP به‌منظور افزایش ظرفیت شکل‌پذیری و مقاومت آن‌ها توصیه می‌شود. در این تحقیق تست‌های آزمایشگاهی با استفاده از نیروهای جانبی سیکلیک بر روی ۷ نمونه ستون با مقطع دایره شکل که توسط الیاف FRP مقاوم‌سازی شده بودند و مدهای گسیختگی ظرفیت باربری و ظرفیت شکل‌پذیری آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در ستون‌های با مقاومت کم، استفاده از الیاف FRP باعث تشکیل مفصل پلاستیک در ستون در دررفت^۲ ۷/۵ درصد شد. همچنین در ستون‌های با مقاومت متوسط استفاده از دو لایه الیاف FRP به‌منظور مقاوم‌سازی ستون باعث تشکیل مفصل پلاستیک در دررفت حدود ۸/۵ درصد خواهد شد. استفاده از این الیاف در ستون‌هایی با بتن مقاومت کم نیز باعث افزایش ۵۶ تا ۷۶ درصدی ظرفیت باربری جانبی شده است. براین اساس

این مدل که به مدل SZM معروف است، در شکل (۲) ارائه شده است. در این مقاله از این مدل به منظور مدل سازی ستون های بتنی محصور شده با الیاف FRP استفاده شده است. این مدل در سال ۲۰۱۵ در پژوهشی توسط Hu و همکاران به منظور مدل سازی صحت سنجی آزمایشگاهی ستون های محصور شده با الیاف مورد استفاده قرار گرفته است. ستون مورد بررسی در پژوهش حاضر از این مرجع انتخاب شده است.



شکل ۲- مدل رفتاری بتن محصور شده با FRP

پارامترهای معرفی شده در این مدل با استفاده از روابط زیر

تعریف می شوند:

$$E_1 = 3950 \sqrt{f'_{C_0}} \quad (1)$$

$$E_2 = 245.61 f'_{C_0} + 1.3456 \frac{E_j t_j}{D} \quad (2)$$

$$f_0 = 0.872 f'_{c_0} + 0.371 f_r + 6.258 \quad (3)$$

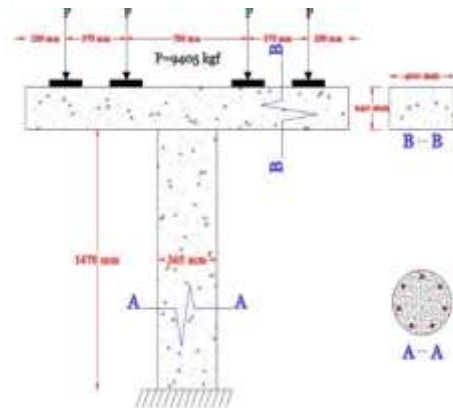
$$f'_{cu} = f'_{c_0} + 0.6 f_r^{0.7} \quad (4)$$

$$f_r = \frac{2 f_j t_j}{D} \quad (5)$$

$$f_c = \frac{(E_1 - E_2) \epsilon_c}{\left[1 + \frac{(E_1 - E_2) \epsilon_c}{f_0}\right]^n} + E_2 \epsilon_c \quad (6)$$

در این روابط، f'_{C_0} مقاومت فشاری بتن نامحصور، E_j مدول الاستیسیته الیاف، f_j مقاومت گسیختگی الیاف، t_j ضخامت الیاف، D قطر هسته بتنی، E_1 شیب قسمت اول نمودار SZM، E_2 شیب قسمت دوم نمودار SZM، f_r تنش محصورشدگی ناشی از وجود الیاف، f_0 نقطه برخورد قسمت دوم نمودار با محور تنش ها، f'_{cu} مقاومت فشاری نهایی بتن محصور شده با الیاف و n ضریب شکل برای ناحیه انتقال است. براین اساس منحنی رفتاری مقطع بتن آرمه مورد نظر، با در نظر گرفتن یک تا سه لایه الیاف FRP به صورت شکل (۳) در خواهد آمد. این مدل بر مبنای نتایج آزمایشگاهی و تا کرنش نهایی برابر ۰/۰۱۵ ارائه شده است. به-منظور مدل سازی ستون بتن آرمه محصور شده با تعداد لایه های

این که وجود آرماتورهای عرضی دور پیچ به دور هسته بتنی باعث ایجاد محصورشدگی آن می شود، در این مرجع به منظور بررسی اثرات خالص محصورشدگی توسط الیاف FRP آرماتورهای عرضی در نظر گرفته نشده است تا در حالت بدون حضور این الیاف هیچ گونه محصورشدگی در این ستون وجود نداشته باشد و تفاوت نتایج تحلیل های مختلف تنها نمایانگر اثرات محصورشدگی توسط الیاف باشد. برای مدل سازی آرماتورهای طولی، از مدل Steel01 استفاده شده است. پوشش روی آرماتورهای طولی برابر ۳ سانتی متر در نظر گرفته شده است. آرماتورهای طولی نیز به صورت $\nabla \Phi 10$ است. ستون مورد نظر در قسمت پایه (محل اتصال به فونداسیون) به صورت گیردار در نظر گرفته شده است. با توجه به این که نیروهای عرشه پل ها از طریق بالشتک های الاستومری (نئوپرن ها) ^{۱۱} به سرستون منتقل شده و از سرستون به پایه پل ها وارد می شود، در قسمت فوقانی ستون مورد نظر، از یک تیر صلب به منظور انتقال نیروها استفاده شده است. مشخصات مدل مورد استفاده در تحلیل ها در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱- جزئیات ستون نمونه مدل سازی شده در نرم افزار Opensees

۳-۲- مدل مورد استفاده برای الیاف

ضخامت، مقاومت گسیختگی کششی و مدول الاستیسیته الیاف FRP مورد استفاده به ترتیب برابر ۱mm، 900Mpa و 2×10^4 Mpa است. برای مدل سازی رفتار مصالح بتنی محصور شده با الیاف FRP، از مدل SZM^{۱۲} استفاده شده که در بخش (۳-۳) تشریح شده است.

۳-۳- معرفی مدل SZM مورد استفاده

Shao و همکاران (۲۰۱۳) مدلی برای در نظر گرفتن آثار محصورشدگی مقاطع دایره ای با استفاده از الیاف FRP ارائه دادند.

۳-۴- بارگذاری ستون

بارگذاری گسترده خطی اعمال شده به ستون و سرستون به- ترتیب برابر با $261/58$ و 240 کیلوگرم بر متر است. بار ناشی از عرشه نیز توسط 4 الاستومر^{۱۳} تعبیه شده در محل اتصال عرشه و سرستون و به صورت متمرکز اعمال شده است (مطابق شکل (۱)). مقدار هر یک از این بارهای متمرکز برابر 9405 کیلوگرم است. با توجه به محاسبات انجام شده برای ستون‌های پل طبقاتی صدر، مقدار بار قائم اعمال شده به ستون ناشی از بار مرده عرشه و ترافیک حدود $9/9$ درصد ظرفیت باربری فشاری مقطع آن است. برای ستون مورد بررسی در این مقاله نیز مقدار کل بار قائم اعمال شده توسط عرشه، برابر $9/9$ درصد کل ظرفیت باربری مقطع آن در نظر گرفته شده است.

۴- انجام تحلیل‌ها

۴-۱- تحلیل استاتیکی غیرخطی

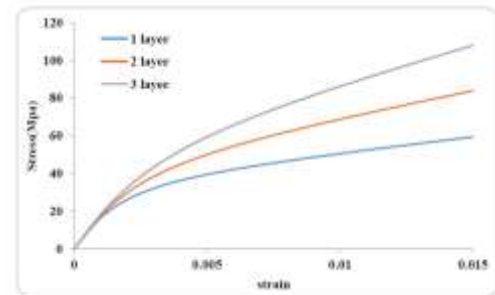
ستون‌های مورد نظر در حالت‌های مختلف محصورشدگی تحت آنالیز پوش‌آور به صورت اعمال تغییر مکان کنترل در بالای ستون قرار گرفتند و نمودار برش پایه در مقابل تغییر مکان بالای ستون، رسم شد. با توجه به نتایج به دست آمده از این تحلیل‌ها، ظرفیت شکل‌پذیری ستون در حالت‌های مختلف محصورشدگی به دست می‌آید. همچنین با دو خطی‌سازی منحنی‌های پوش‌آور به دست آمده طبق دستورالعمل ATC-40، مقاومت و تغییر مکان تسلیم هر یک از ستون‌ها در حالت مختلف محصورشدگی به دست آمده و با یکدیگر مقایسه می‌شود.

۴-۱-۱- محاسبه ظرفیت شکل‌پذیری ستون در حالت‌های

مختلف محصورشدگی

در شکل (۵) منحنی پوش به دست آمده برای ستون مورد مطالعه در حالت‌های مختلف محصورشدگی نمایش داده شده است. به منظور بررسی ظرفیت شکل‌پذیری ستون‌ها (قابلیت تحمل تغییر مکان‌ها قبل از آستانه فروریزش) از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی استفاده شده است. در این منحنی‌ها حداکثر تغییر مکان قابل تحمل توسط سازه (Δu) نقطه‌ای است که پس از آن، منحنی وارد شاخه نزولی خود می‌شود. معیار توقف آنالیز استاتیکی غیرخطی در این قسمت، رسیدن کرنش نهایی بتن در حالت‌های محصور شده و نامحصور است. نتایج تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی در شکل (۵) نشان می‌دهد که با افزایش محصورشدگی توسط الیاف FRP سختی جانبی اولیه و تغییر مکان تسلیم ستون‌ها تغییر نکرده است. اما اثر استفاده از این الیاف بر حداکثر تغییر مکان قابل تحمل توسط این ستون بسیار قابل ملاحظه است.

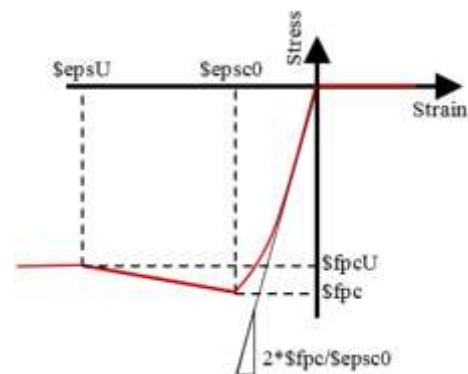
مختلف الیاف از منحنی‌های ارائه شده در شکل (۳) استفاده شده است.



شکل ۳- مدل رفتاری SZM بتن محصور شده با تعداد لایه‌های مختلف FRP

مدل ارائه شده در پژوهش Shao و همکاران (۲۰۱۳) برای ستون‌هایی که به دور آن‌ها الیاف FRP پیچیده شده است قابلیت استفاده دارد و در آن اثرات محصورشدگی بتن توسط آراماتورهای عرضی اعمال نشده است. وجود آراماتورهای عرضی دور پیچ به دور هسته بتنی هم‌زمان با در نظرگیری الیاف FRP باعث ایجاد محصورشدگی مضاعف در آن می‌شود، در پژوهش Shao و همکاران (۲۰۱۳) به منظور بررسی اثرات خالص محصورشدگی توسط الیاف FRP آراماتورهای عرضی در نظر گرفته نشده است تا در حالت بدون حضور این الیاف هیچ‌گونه محصورشدگی در این ستون وجود نداشته باشد و تفاوت نتایج تحلیل‌های مختلف انجام شده تنها نمایانگر اثرات محصورشدگی توسط الیاف باشد.

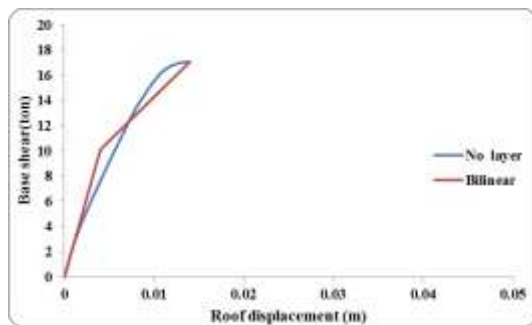
به منظور مدل‌سازی ستون بتنی در حالت محصور نشده مطابق شکل (۴) از المان Concrete01 در نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است. در این مدل پس از رسیدن تنش بتن به مقدار مقاومت حداکثر، شاخه نزولی منحنی شروع می‌شود و هیچ‌گونه محصورشدگی در این حالت رخ نخواهد داد.



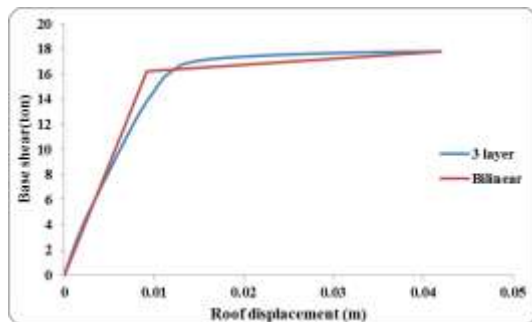
شکل ۴- مدل رفتاری بتن Concrete 01 محصور نشده (Hu و همکاران، ۲۰۱۴)

۴-۱-۲- بررسی مقاومت و تغییر مکان تسلیم ستون در حالت‌های مختلف محصورشدگی

برای محاسبه مقاومت و تغییر مکان تسلیم ستون‌ها، منحنی‌های به‌دست‌آمده از آنالیز استاتیکی غیرخطی با استفاده از نمودارهای دو خطی تقریب زده می‌شود. فرآیند دو خطی‌سازی نمودارها طبق دستورالعمل ATC-40 انجام شده است. فرآیند دو خطی‌سازی طبق این دستورالعمل به‌گونه‌ای انجام شده است که مساحت زیر منحنی پوش‌آور و نمودار دو خطی با یکدیگر یکسان باشد. همچنین شیب اولیه و مقاومت نهایی به‌دست‌آمده از این دو نمودار نیز باید با هم برابر باشد. در شکل‌های (۶) و (۷) نمودار پوش‌آور به‌دست‌آمده برای حالت‌های مختلف محصورشدگی به همراه منحنی دو خطی آن‌ها نمایش داده شده است. در جدول (۲) مقادیر مقاومت و تغییر مکان تسلیم ستون در حالت‌های مختلف محصورشدگی ارائه شده است. در این پژوهش بررسی اثرات افزایش تعداد لایه‌های الیاف FRP به دور ستون بر عملکرد لرزه‌ای ستون‌ها مدنظر بوده است و محصورشدگی ستون‌ها توسط آرماتورهای عرضی مدنظر نبوده است.

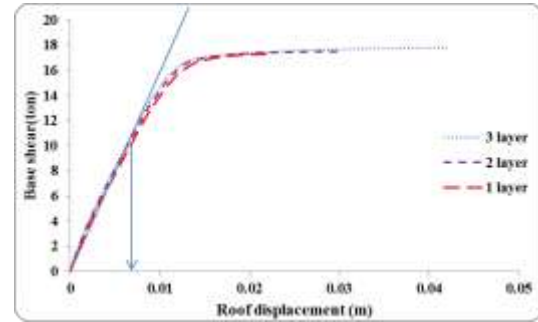


شکل ۶- نمودار پوش‌آور برای ستون بدون FRP و نمودار دو خطی‌سازی شده آن



شکل ۷- نمودار پوش‌آور برای ستون با سه لایه FRP و نمودار دو خطی‌سازی شده آن

به‌همین خاطر در هیچ‌یک از این حالت‌های مختلف ستون موردبررسی در حالت‌های مختلف محصورشدگی و حالت عدم محصورشدگی توسط الیاف، آرماتورهای عرضی در نظر گرفته



شکل ۵- نمودارهای پوش‌آور برای ستون در حالت‌های مختلف محصورشدگی

مقدار ظرفیت شکل‌پذیری ستون (μ) از رابطه (۷) به‌دست می‌آید.

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (7)$$

مقادیر ظرفیت شکل‌پذیری ستون در حالت‌های مختلف محصورشدگی، در جدول (۱) ارائه شده است. نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد که با استفاده از الیاف FRP حتی در یک لایه، مقدار ظرفیت شکل‌پذیری تقریباً ۵۷٪ نسبت به ستون بدون FRP افزایش داشته است. این مقدار افزایش برای ستون با دو و سه لایه نسبت به ستون بدون الیاف ۱۱۷٪ و ۲۰۰٪ است. با افزودن الیاف FRP به‌دلیل محصورشدگی و قابلیت جذب انرژی بیشتر، تغییر مکان‌هایی که ستون قبل از آستانه فروریزش می‌تواند تحمل کند، افزایش یافته و در نتیجه ظرفیت شکل‌پذیری آن نیز بیشتر خواهد شد. این مقدار افزایش ظرفیت شکل‌پذیری حاکی از عملکرد بسیار مناسب این الیاف در مقاوم‌سازی و بهسازی ستون‌هایی است که باید تغییر مکان‌های زیادی را در حین زلزله تحمل نمایند. از طرف دیگر افزایش ظرفیت شکل‌پذیری ستون با اعمال اثرات محصورشدگی به‌دلیل ورود هر چه بیشتر ستون به ناحیه غیرخطی خود، پتانسیل جذب انرژی آن را نیز در حین زلزله بیشتر خواهد کرد.

جدول ۱- ظرفیت شکل‌پذیری ستون در حالت‌های مختلف محصورشدگی

درصد	شکل‌پذیری	تغییر مکان تسلیم (متر)	تغییر مکان نهایی (متر)	بدون لایه
۱/۹۶	۱/۹۶	۰/۰۱۳۹۹	۰/۰۰۷۱۴۴	
۵۷	۳/۰۸	۰/۰۲۱۹۹	۰/۰۰۷۱۴۴	یک لایه
۱۱۴	۴/۲۰	۰/۰۲۹۹۹	۰/۰۰۷۱۴۴	دو لایه
۲۰۰	۵/۸۸	۰/۰۴۱۹۹	۰/۰۰۷۱۴۴	سه لایه

در رابطه (۸)، U_{max} حداکثر تغییر مکان بالای ستون تحت اثر رکوردهای زلزله است. U_y نیز تغییر مکان تسلیم ستون است که از دو خطی کردن منحنی‌های پوش‌آور به‌دست‌آمده برای هر ستون به حاصل می‌شود. در جدول (۴) مقادیر حداکثر شکل‌پذیری تقاضای ناشی از رکوردهای مختلف زلزله به‌همراه میانگین آن‌ها در حالت‌های مختلف محصورشدگی نمایش داده شده است.

نتایج جدول (۴) نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه‌های FRP به دور ستون و افزایش ضخامت آن، مقدار تقاضای شکل‌پذیری ایجادشده در ستون کاهش می‌یابد. این امر نشان‌دهنده تأثیر استفاده از الیاف در لایه‌های مختلف بر بهبود عملکرد لرزه‌ای ستون موردنظر تحت بارهای لرزه‌ای است.

عملکرد لرزه‌ای ستون‌ها با خسارت‌های ایجادشده در آن‌ها تحت زلزله‌های مختلف، رابطه معکوس دارد. به‌طوری‌که با کاهش خسارت ایجادشده در ستون‌ها در حین زلزله، عملکرد لرزه‌ای آن‌ها نیز بهبود می‌یابد. از طرف دیگر خسارت‌های سازه‌ای ایجادشده در ستون‌ها، تابعی از حداکثر تقاضای شکل‌پذیری (μ_{max}) ایجادشده در آن‌ها تحت اثر بارهای لرزه‌ای است. با استفاده از الیاف به دور ستون‌های بتن‌آرمه در حین زلزله جابه‌جایی‌های حداکثر بالای ستون نسبت به ستون‌های بدون الیاف کاهش می‌یابد. با توجه به این‌که جابه‌جایی تسلیم ستون‌ها در حالت محصورشده و غیرمحصور تقریباً یکسان است در نتیجه شکل‌پذیری ایجادشده در ستون‌های محصورشده کمتر از ستون‌های بدون محصورشدگی است. در نتیجه خسارت‌های ایجادشده در آن‌ها تحت زلزله‌های مختلف کمتر شده و عملکرد لرزه‌ای این ستون‌ها بهبود می‌یابد. بنابراین در ستون‌های بتن‌آرمه محصورشده با الیاف که شکل‌پذیری ایجادشده ناشی از زلزله در آن‌ها کمتر از ستون‌های بدون محصورشدگی است؛ خسارت کمتری ایجادشده و عملکرد لرزه آن‌ها بهتر می‌شود.

در ستون آخر جدول (۴) در میزان درصد کاهش تقاضای شکل‌پذیری در حالت‌های مختلف محصورشدگی نسبت به حالتی که در ستون از الیاف استفاده نشده، ارائه شده است. این میزان کاهش برای یک، دو و سه لایه FRP به‌ترتیب برابر ۰/۱۴/۰۵، ۱۷/۹۸، ۳۰/۱۳٪ است. بنابراین در ستون‌هایی که باید تغییر مکان‌های جانبی زیادی در حین زلزله تحمل کنند و تقاضای شکل‌پذیری آن‌ها بالا است، به‌منظور بهسازی می‌توان این الیاف را مورد استفاده قرار داد. دلیل این امر بازدهی بالای استفاده از این الیاف در کاهش تقاضای شکل‌پذیری در ستون تحت بارهای لرزه‌ای است.

نشده است و تنها پارامتر موردبررسی اثر تعداد لایه‌های الیاف FRP به دور ستون می‌باشد.

با توجه به نتایج شکل‌های (۶) و (۷) و جدول (۲) مشاهده می‌شود که مقاومت تسلیم این ستون با افزایش محصورشدگی، روند افزایشی به خود گرفته است. این مقدار افزایش مقاومت تسلیم در حالت یک و دو و سه لایه FRP به‌ترتیب برابر ۳۹/۹۴، ۵۵/۶۸ و ۶۰/۹۳ درصد افزایش نسبت به حالت بدون استفاده از FRP است. با بررسی اثرات استفاده از الیاف FRP بر ظرفیت شکل‌پذیری و مقاومت تسلیم ستون‌های دایره‌ای مورد استفاده در پایه پل‌ها، نتیجه گرفته می‌شود که تأثیر استفاده از این الیاف به‌منظور مقاوم‌سازی ستون‌هایی که باید تغییر شکل‌های غیرخطی زیادی در حین زلزله تحمل کنند، بیشتر از ستون‌هایی است که کمبود مقاومت جانبی در حین بارهای لرزه‌ای دارند.

۴-۲- تحلیل دینامیکی غیرخطی

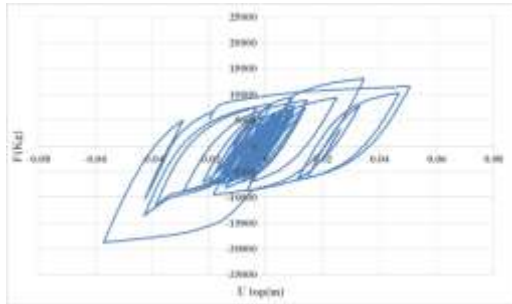
در این قسمت آنالیزهای دینامیکی غیرخطی بر روی ستون موردنظر در حالت‌های مختلف محصورشدگی با استفاده از شش رکورد زلزله ثبت‌شده دور از گسل بر روی خاک تیپ C گزارش FEMA P695 انجام شد. مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده در جدول (۳) ارائه شده است. رکوردهای زلزله انتخاب‌شده مطابق نشریه ۴۶۳ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی ایران مقیاس شده‌اند.

مطابق ضوابط این نشریه برای محاسبه ضریب مقیاس زلزله‌ها ابتدا تمامی زوج شتاب‌نگاشت‌های مربوط به هر رکورد زلزله به 1g تبدیل و سپس طیف شتاب مربوط به هر یک از مؤلفه‌های زوج شتاب‌نگاشت با استفاده از روش SRSS^۴ با یکدیگر ترکیب می‌شوند. در نهایت از طیف شتاب SRSS شده تمام رکوردهای زلزله میانگین می‌گیریم. این طیف میانگین به‌گونه‌ای مقیاس می‌شود که در بازه 0.2T تا 1.5T در هیچ نقطه‌ای، طیف میانگین پایین‌تر از ۱/۴ برابر طیف آیین‌نامه قرار نگیرد. ضریب مقیاس به‌دست‌آمده برابر ۰/۶۵۸ است که باید در مؤلفه بزرگ‌تر مقیاس شده به 1g ضرب گردد.

۴-۲-۱- بررسی شکل‌پذیری حداکثر تقاضا تحت رکوردهای زلزله انتخابی ستون در حالت‌های مختلف محصورشدگی

حداکثر شکل‌پذیری تقاضای ایجادشده ناشی از زلزله با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu_{max} = \frac{U_{max}}{U_y} \quad (۸)$$



شکل ۸- منحنی هیستریزس ستون با سه لایه الیاف FRP برای رکورد زلزله C1

V_y مقاومت تسلیم ستون در حالت‌های مختلف محصورشدگی است. که از دوخطی کردن منحنی پوش‌آور آن ستون به دست می‌آید. u_{mon} حداکثر جابه‌جایی قابل تحمل توسط ستون‌های بتن‌آرمه تحت تحریک مونوتونیک^{۱۷} است. این مقدار طبق توصیه Park و همکاران (۲۰۰۲) برابر ۰.۵٪ ارتفاع ستون فرض شده است. β از کالیبره کردن نتایج تست‌های آزمایشگاهی و رابطه ارائه‌شده به دست می‌آید. طبق توصیه Park و همکاران، این مقدار برای ستون‌های بتن‌آرمه برابر ۰.۲ فرض شده است. در جدول (۵) شاخص خسارت ایجادشده در ستون تحت شش رکورد زلزله در حالت‌های مختلف محصورشدگی و همچنین مقدار میانگین آن‌ها ارائه می‌شود:

۴-۲-۲- بررسی شاخص خسارت ایجادشده در ستون در حالت‌های مختلف محصورشدگی

در این قسمت مقدار شاخص خسارت ایجادشده در ستون در حالت‌های مختلف محصورشدگی تحت شش رکورد زلزله و مقدار میانگین آن‌ها بر اساس رابطه ارائه‌شده توسط Park و همکاران (۲۰۰۲) محاسبه شده است.

$$DI = \frac{u_{max}}{u_{mon}} + \beta \frac{E_{hys}}{u_{mon} * V_y} \quad (9)$$

در این رابطه u_{max} حداکثر جابه‌جایی بالای ستون تحت رکوردهای زلزله مختلف است. E_{hys} انرژی هیستریزس^{۱۵} تلف‌شده تحت هر رکورد زلزله است که از محاسبه مساحت حلقه‌های هیستریزس متوالی ایجادشده در هر رکورد زلزله به دست می‌آید. در شکل (۸) منحنی هیستریزس ستون موردبررسی در حالت سه-لایه الیاف FRP برای رکورد زلزله C1 ترسیم شده است.

به منظور محاسبه مساحت زیر منحنی هیستریزس در هر کدام از چرخه‌ها، با قطعه‌بندی هر لوپ^{۱۶} به دوزنقه‌های متوالی، مساحت آن دوزنقه محاسبه می‌شود. مجموع مساحت این دوزنقه‌ها برابر مساحت هر چرخه است. درنهایت از جمع مساحت تمامی چرخه‌های متوالی، مساحت کل زیر منحنی هیستریزس به دست می‌آید. این فرآیند توسط برنامه نوشته‌شده در نرم‌افزار MATLAB انجام شده است.

جدول ۲- مقاومت و تغییر مکان تسلیم ستون در حالت‌های مختلف محصورشدگی

مساحت دقیق	مساحت دوخطی	درصد اختلاف	تغییر مکان تسلیم (m)	برش تسلیم	درصد اختلاف
۰/۱۵۴	۰/۱۵۶	۰/۹۱	۰/۰۰۴	۱۰/۰۷	بدون لایه
۰/۲۷۴	۰/۲۷۶	۰/۷۴	۰/۰۰۸	۱۴/۰۹	یک لایه
۰/۴۱۹	۰/۴۲۰	۰/۱۳	۰/۰۰۸۹	۱۵/۶۸	دو لایه
۰/۶۳۷	۰/۶۳۲	۰/۷۲	۰/۰۰۹۲	۱۶/۲۱	سه لایه

جدول ۳- مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده در تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی

شماره	بزرگا ۷/۱	سال	مشخصات زلزله	
			نام	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)
C1	۶/۹	۱۹۹۹	هکتور ماین ^{۱۸}	۶۸۵
C2	۷/۵	۱۹۹۵	کوبه ^{۱۹}	۶۰۹
C3	۷/۴	۱۹۹۹	کجائلی ^{۲۰}	۵۲۳
C4	۷/۶	۱۹۹۰	منجیل	۷۲۴
C5	۶/۵	۱۹۹۹	چی چی ^{۲۱}	۷۰۵
C6	بزرگا	۱۹۷۶	فریولی ^{۲۲}	۴۲۵

19. Kobe
20. Kojali-Turkey
21. Vilparaiso -Chile
22. Friuli- Italy

15. Hysteresis
16. Loop
17. Monotonic
18. Hector Mine

جدول ۴- حداکثر تقاضای شکل پذیری اعمال شده به ستون‌ها در حالت‌های مختلف محصورشدگی

درصد اختلاف	متوسط	C۶	C۵	C۴	C۳	C۲	C۱	
	۳/۰۱	۱/۹۵	۳/۰۳	۲/۰۴	۶/۸۱	۱/۸۶	۲/۳۸	بدون لایه
	۲/۵۹	۱/۴۰	۴/۰۵	۲/۷۷	۴/۶۶	۱/۳۵	۱/۲۹	یک لایه
	۲/۴۷	۱/۳۶	۲/۴۰	۱/۷۷	۶/۰۲	۱/۳۳	۱/۹۴	دو لایه
	۲/۱۰	۱/۲۱	۲/۶۷	۱/۲۷	۵/۱۱	۱/۱۵	۱/۲۲	سه لایه

جدول ۵- شاخص خسارت ستون در حالت‌های مختلف محصورشدگی

درصد اختلاف	متوسط	C۶	C۵	C۴	C۳	C۲	C۱	
	۰/۸۴	۰/۱۷	۱/۰۵	۱/۵۱	۰/۵۸	۰/۲۴	۱/۴۸	بدون لایه
	۰/۵۵	۰/۱۸	۱/۸۴	۰/۴۴	۰/۵۲	۰/۱۹	۰/۱۶	یک لایه
	۰/۳۸	۰/۱۷	۰/۶۰	۰/۲۶	۰/۷۴	۰/۱۶	۰/۲۷	دو لایه
	۰/۳۰	۰/۱۵	۰/۵۲	۰/۱۷	۰/۶۴	۰/۱۴	۰/۱۶	سه لایه

و ... با گام‌های 0.05g به ستون موردنظر اعمال شده و حداکثر تغییر مکان بالای ستون موردنظر در هر یک از این تحلیل‌ها ثبت می‌شود. در فرآیند بررسی عملکرد لرزه‌ای ستون‌ها حداکثر پاسخ‌ها ملاک است و زمان وقوع این پاسخ‌ها در حین زلزله تأثیری در بررسی عملکرد لرزه‌ای نخواهد داشت. افزایش مقیاس شدت در هر رکورد زلزله تا جایی ادامه پیدا کرد که مقدار تغییر مکان بالای ستون از حد آستانه فروریزش در هر یک از حالت‌های مختلف محصورشدگی بیشتر شود. طبق تحقیقات انجام شده توسط وموتسیکوس^{۲۴} و همکاران (۲۰۰۲)، دلیل استفاده از معیار شتاب طیفی در مود اول سازه در این تحلیل‌ها، کاهش میزان پراکندگی نتایج است.

۴-۳-۱- محاسبه تغییر مکان‌های نظیر سطوح مختلف عملکردی برای ستون موردنظر

برای محاسبه تغییر مکان‌های نظیر هر یک از سطوح عملکردی خدمت‌رسانی بی‌وقفه^{۲۵}، قابلیت استفاده بی‌وقفه^{۲۶}، ایمنی جانی^{۲۷} و آستانه فروریزش^{۲۸} یک احتمال فراگذشت در نظر گرفته شد. طبق گزارش FEMA P695 این احتمال فراگذشت برای این سطوح عملکردی به ترتیب برابر ۰.۵۰٪، ۰.۲۰٪، ۰.۱۰٪ و ۰.۰۲٪ می‌باشد. با توجه به این فراگذشت‌ها دوره بازگشت متناظر آن‌ها به دست می‌آید. طیف شتاب ارائه شده در نشریه ۴۶۳ برای دوره بازگشت ۴۷۵ سال (احتمال فراگذشت ۰.۱۰٪ در ۵۰ سال عمر مفید سازه) ارائه شده است. با استفاده از روابط ارائه شده در گزارش FEMA-356 شتاب مبنای طرح برای سطوح مختلف عملکردی به دست آمده و طیف شتاب آن بر اساس نشریه ۴۶۳ تعیین

نتایج جدول (۵) نشان می‌دهد که با استفاده از الیاف FRP برای محصورسازی ستون‌ها، مقدار خسارت ایجاد شده در ستون کاهش می‌یابد. این میزان کاهش، با افزایش تعداد لایه‌های FRP بیشتر خواهد شد و نشان‌دهنده تأثیر مثبت استفاده از الیاف FRP بر عملکرد لرزه‌ای ستون موردنظر است. مقدار کاهش خسارت میانگین تحت شش رکورد زلزله اعمال شده به ستون برای حالت‌های یک لایه و دولایه و سه‌لایه FRP نسبت به حالت بدون استفاده از FRP به ترتیب برابر ۳۳/۹۲ و ۵۴/۱۹ و ۶۴/۳۵ درصد است. مشاهده می‌شود که با اضافه نمودن الیاف FRP به دور ستون، مقدار خسارت ایجاد شده در آن کاهش می‌یابد. به همین منظور برای کاهش خسارات ناشی از زلزله‌های شدید در ستون‌های مورد استفاده در پایه پل‌ها که استفاده از آن‌ها به منظور عملیات امداد و نجات ضروری است، می‌توان از این روش مقاوم‌سازی استفاده نمود.

۴-۳-۲- تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزایش یافته

تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزایش یافته^{۲۳} بر روی ستون موردنظر در حالت‌های مختلف محصورشدگی انجام شده است. این تحلیل‌ها با استفاده از ۲۲ رکورد زلزله دور از گسل معرفی شده در گزارش FEMA P695 صورت گرفت. این رکوردهای زلزله بر روی خاک‌های تیپ C و D ثبت شده و مشخصات آن‌ها در جدول (۶) نمایش داده شده است.

در این تحلیل‌ها، ابتدا هر رکورد زلزله به گونه‌ای مقیاس شد که مقدار شتاب طیفی آن در پیوند مود اول ستون موردنظر برابر 1g شود. سپس این رکورد زلزله با مقیاس‌های 0.05g، 0.1g، 0.15g

23. Incremental Dynamic Analysis

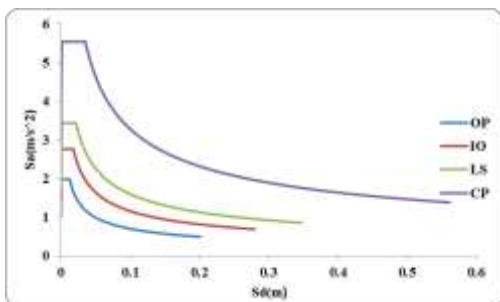
24. Vamvatsikos

25. Operational

26. Immediate Occupancy

27. Life Safety

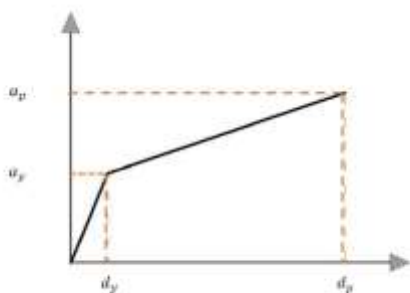
28. Collapse Prevention



شکل ۹- طیف تقاضای نشریه ۴۶۳ برای تمامی سطوح عملکردی

منحنی های پوش آور به دست آمده از آنالیز استاتیکی غیرخطی، با استفاده از ضوابط دستورالعمل ATC-40 در فضای Sa+Sd ترسیم شده است و طیف تقاضای نشریه در سطوح مختلف عملکردی تقاطع داده می شود. با استفاده از ضوابط ارائه شده در این گزارش، تغییر مکان های متناظر با هر یک از سطوح عملکردی تعریف شده به دست می آید.

برای ستون مورد مطالعه در حالت های مختلف محصورشدگی که نمودارهای طیف ظرفیت و طیف تقاضا یکدیگر را در ناحیه غیرخطی طیف ظرفیت قطع می کنند، به منظور در نظر گرفتن اثرات غیرخطی شدن بر طیف تقاضا، باید β_{eff} محاسبه گردد و مقادیر ضرایب کاهش طیف تقاضا (^{38}SRA و ^{39}SRV) به دست آید. محل برخورد طیف ظرفیت و طیف تقاضای کاهش یافته، نقطه عملکردی مورد نظر خواهد بود. (لازم به ذکر است در حالت هایی که منحنی طیف ظرفیت و طیف تقاضا یکدیگر را در ناحیه خطی طیف ظرفیت قطع می کنند، میرایی ناشی از غیرخطی شدن سازه صفر بوده و β_{eff} برابر ۰/۰۵ خواهد بود و ضرایب SRA و SRV برابر واحد خواهند بود، در نتیجه منحنی طیف تقاضا کاهش نخواهد داشت).



شکل ۱۰- نمودار دوخطی حاصل از Push Over برای محاسبه β_{eff}

می شود. نمودار Sa-Sd برای سطوح مختلف عملکردی مطابق شکل (۹) می باشد.

جدول ۶- مشخصات رکوردهای زلزله مورد استفاده در تحلیل های دینامیکی غیرخطی افزاینده (IDA)

شماره	مشخصات زلزله			سال	بزرگا	زلزله
	سرعت موج حداکثر برشی (g)	نام	متر بر ثانیه			
C1	۰/۵۲	نورتریج ^{۲۹}	۳۵۶	۱۹۹۴	۶/۷	C1
C2	۰/۴۸	نورتریج	۳۰۹	۱۹۹۴	۶/۷	C2
C3	۰/۸۲	دوزچی ^{۳۰}	۳۲۶	۱۹۹۹	۷/۱	C3
C4	۰/۳۴	هکتورماین	۶۸۵	۱۹۹۹	۷/۱	C4
C5	۰/۳۵	امپریال ولی ^{۳۱}	۲۷۵	۱۹۷۹	۶/۵	C5
C6	۰/۳۸	امپریال ولی	۱۹۶	۱۹۷۹	۶/۵	C6
C7	۰/۵۱	کوبه	۶۰۹	۱۹۹۵	6.9	C7
C8	۰/۲۴	کوبه	۲۵۶	۱۹۹۵	۶/۹	C8
C9	۰/۳۶	کجائلی	۲۷۶	۱۹۹۹	۷/۵	C9
C10	۰/۲۲	کجائلی	۵۲۳	۱۹۹۹	۷/۵	C10
C11	۰/۲۴	لندرز ^{۳۲}	۳۵۴	۱۹۹۲	۷/۳	C11
C12	۰/۴۲	لندرز	۲۷۱	۱۹۹۲	۷/۳	C12
C13	۰/۵۳	لوما پریتا ^{۳۳}	۲۸۹	۱۹۸۹	۶/۹	C13
C14	۰/۵۶	لوما پریتا	۳۵۰	۱۹۸۹	۶/۹	C14
C15	۰/۵۱	منجیل	۷۲۴	۱۹۹۰	۷/۴	C15
C16	۰/۳۶	سوپراستیشن هیلز ^{۳۴}	۱۹۲	۱۹۸۷	۶/۵	C16
C17	۰/۴۵	سوپراستیشن هیلز	۲۰۸	۱۹۸۷	۶/۵	C17
C18	۰/۵۵	کیپ مندوسینا ^{۳۵}	۳۱۲	۱۹۹۲	۷/۰	C18
C19	۰/۴۴	چی چی	۲۵۹	۱۹۹۹	۷/۶	C19
C20	۰/۵۱	چی چی	۷۰۵	۱۹۹۹	۷/۶	C20
C21	۰/۲۱	سن فرناندو ^{۳۶}	۳۱۶	۱۹۷۱	۶/۶	C21
C22	۰/۳۵	فریولی ^{۳۷}	۴۲۵	۱۹۷۶	۶/۵	C22

35. Cape Mendocino

36. San Fernando

37. Friuli- Italy

38. Spectral Response Acceleration

39. Spectral Response Velocity

29. Northridge

30. Duzce-Turkey

31. Imperial Valley

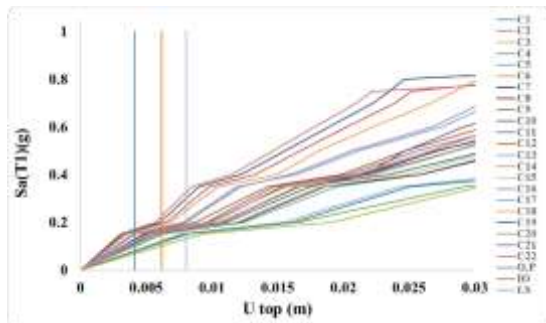
32. Landers

33. Loma Preeta

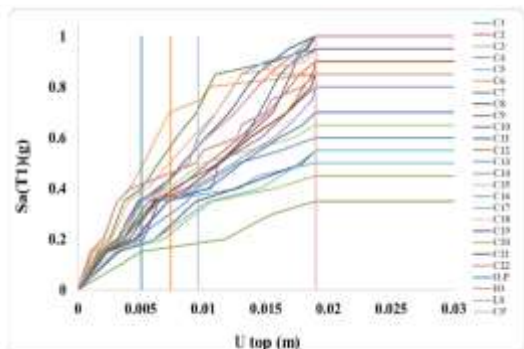
34. Superstition Hills

بررسی‌ها نشان می‌دهد که این ستون در حالت عدم محصورشدگی در زلزله‌ای با دوره بازگشت ۱۲۸۰ سال به سطح عملکرد آستانه فروریزش خود رسیده است.

۴-۳-۲- نتایج تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزایشی
در این بخش نمودارهای مربوط به نتایج تحلیل IDA بر روی ستون مورد مطالعه در حالت‌های مختلف محصورشدگی در شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) ارائه شده است. در شکل (۱۱) منحنی‌های IDA حاصل از نتایج تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی برای ستون مورد مطالعه در حالت بدون استفاده از ایفان نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این حالت ستون سطح عملکرد آستانه فروریزش تعریف نشده است. همچنین در شکل (۱۲) منحنی‌های تحلیل دینامیکی غیرخطی افزایشی مربوط به ۲۲ رکورد زلزله معرفی شده در جدول (۶)، برای ستون مورد نظر در حالت استفاده از یک لایه ایفان ارائه شده است. در این حالت محصورشدگی ستون تمامی سطوح عملکردی تعریف شده است. در شکل‌های (۱۳) و (۱۴) نیز به ترتیب منحنی‌های IDA متناظر با ۲۲ رکورد زلزله مختلف، برای ستون مورد مطالعه در حالت‌های محصورشدگی با استفاده از دو و سه لایه ایفان به همراه سطوح عملکردی مختلف نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- منحنی‌های IDA برای ۲۲ رکورد زلزله مختلف در ستون بدون محصورشدگی



شکل ۱۲- منحنی‌های IDA برای ۲۲ رکورد زلزله مختلف در ستون دارای یک لایه ایفان FRP

بر اساس مقادیر a_y و d_y و ضرایب کاهش طیفی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$E_{s0} = \frac{a_p d_p}{2} \quad (10)$$

$$E_D = 4(a_y d_p - d_y a_p) \quad (11)$$

$$\beta_0 = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{s0}} \quad (12)$$

$$\beta_{eff} = k\beta_0 + 0.05 \quad (13)$$

در محاسبه β_{eff} ضریب k بستگی به رفتار سازه در حین زلزله دارد، این پارامتر بر اساس جدول (۸-۱) گزارش ATC-40 به دست آمده است. برای سازه‌هایی که در حین زلزله، منحنی هیستریزس آن‌ها افت قابل توجهی ندارد و چرخه‌های هیستریزس تقریباً به صورت منظم هستند و ضریب β_0 آن‌ها کمتر از ۱۶/۵ درصد است، مقدار ضریب k برابر واحد در نظر گرفته می‌شود.

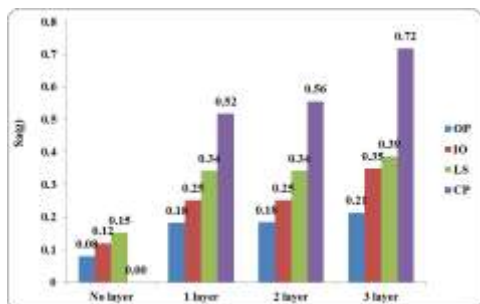
$$S_{RA} = \frac{1}{B_S} = \frac{3.21 - [0.68 \cdot \ln(\beta_{eff})]}{2.12} \quad (14)$$

$$S_{RV} = \frac{1}{B_L} = \frac{2.31 - [0.41 \cdot \ln(\beta_{eff})]}{1.65} \quad (15)$$

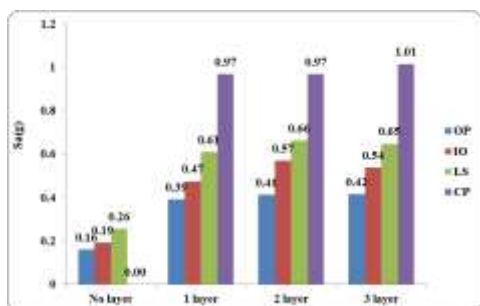
این روند تکراری ارائه شده چندین بار انجام و در هر مرحله مقادیر a_p و d_p محاسبه می‌شود. این فرآیند تا مرحله‌ای ادامه می‌یابد که اختلاف مقادیر a_p و d_p محاسبه شده در دو مرحله متوالی کمتر از یک درصد باشد. d_p نهایی محاسبه شده به عنوان تغییر مکان‌های نظیر هر سطح عملکردی در نظر گرفته می‌شود. در جدول (۷) تغییر مکان بالای ستون برای هر یک از سطوح عملکردی ارائه شده است. همان‌طور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، برای این ستون در حالت عدم استفاده از FRP، تغییر مکان متناظر با سطح عملکرد آستانه فروریزش معرفی نشده است. دلیل این مهم، عدم تقاطع طیف ظرفیت سازه و طیف تقاضای آیین‌نامه با دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال است.

جدول ۷- تغییر مکان‌های متناظر با سطوح عملکردی لرزه‌ای

آستانه	ستون بر حسب متر		
	خدمت‌رسانی	قابلیت استفاده	ایمنی جانی
	بی‌وقفه	بی‌وقفه	فروریزش
بدون لایه	۰/۰۰۴۱	۰/۰۰۶۲	۰/۰۰۰۸
یک لایه	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۷۴	۰/۰۰۱۹
دو لایه	۰/۰۰۴۸	۰/۰۰۷۰	۰/۰۰۹۱
سه لایه	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۶۸	۰/۰۰۸۹

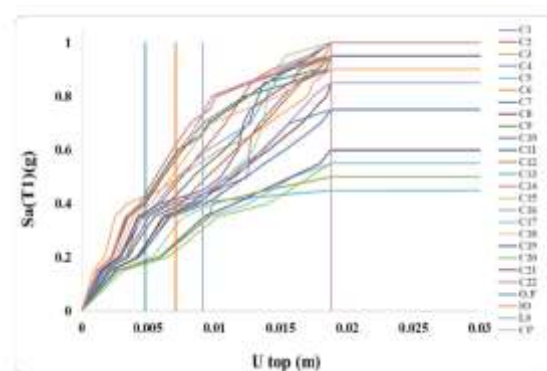


شکل ۱۶- شتاب طیفی متناظر سطوح عملکردی مختلف برای صدک ۱۶٪

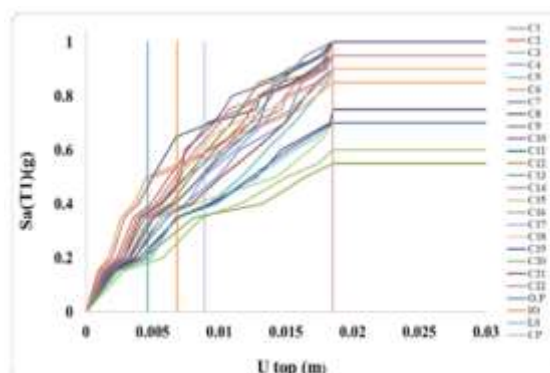


شکل ۱۷- شتاب طیفی متناظر سطوح عملکردی مختلف برای صدک ۸۴٪

نتایج شکل (۱۴) برای مقادیر میانه نتایج نشان می‌دهد که با افزایش تعداد لایه‌های الیاف FRP به دور ستون، مقدار شتاب طیفی لازم برای رسیدن ستون به یک سطح عملکردی خاص افزایش می‌یابد. این مقدار افزایش در سطح عملکردی OP در حالت‌های یک، دو و سه لایه محصورشدگی به ترتیب ۲/۶، ۲/۳۱ و ۲/۶۷ برابر نسبت به حالت بدون محصورشدگی است. برای سطح عملکردی IO، این میزان افزایش به ترتیب ۲/۳۳، ۲/۴۸ و ۲/۵۶ برابر نسبت به حالت بدون FRP و در سطح عملکردی LS به ترتیب ۲/۴۰، ۲/۴۶ و ۲/۸۶ برابر نسبت به حالت عدم استفاده از الیاف است. همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد ستون بدون FRP در دوره بازگشت ۱۲۸۰ سال، به سطح عملکردی آستانه فروریزش خود خواهد رسید اما با افزودن یک لایه FRP، ستون در دوره بازگشت ۲۴۷۵ سال و شتابی برابر 0.83g به این سطح عملکرد خواهد رسید. بررسی نتایج به‌دست‌آمده برای صدک‌های ۱۶٪ و ۸۴٪ نتایج نیز تا حد زیادی این روند را تأیید می‌کند. نتایج این بخش نشان می‌دهد که محصورسازی ستون موردنظر با استفاده از الیاف پلیمری، ظرفیت دینامیکی آن را به‌خصوص در سطح عملکرد آستانه فروریزش به‌میزان قابل توجهی بهبود بخشیده است.

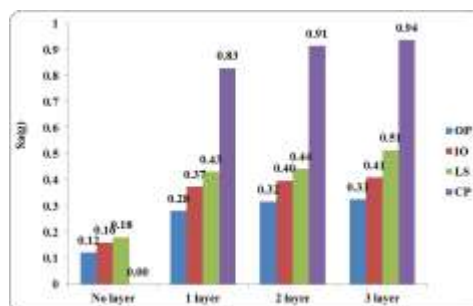


شکل ۱۳- منحنی‌های IDA برای رکورد زلزله مختلف در ستون دارای دو لایه الیاف FRP



شکل ۱۴- منحنی‌های IDA برای رکورد زلزله مختلف در ستون دارای سه لایه الیاف FRP

به‌منظور بررسی سطوح مختلف عملکردی ستون موردنظر، شتاب طیفی متناظر با هر سطح عملکردی در حالت‌های مختلف محصورشدگی برای تمامی رکوردهای زلزله، با درون‌یابی به‌دست‌آمده و مقدار میانه، صدک ۱۶٪ و ۸۴٪ نتایج در هر حالت محاسبه شده است. همچنین در شکل‌های (۱۵) تا (۱۷) مقادیر شتاب طیفی متناظر با هر سطح عملکرد به‌صورت نمودارهای ستونی نمایش داده شده است.



شکل ۱۵- شتاب طیفی متناظر سطوح عملکردی مختلف برای میانه

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، اثر استفاده از الیاف FRP در تعداد لایه‌های مختلف بر عملکرد لرزهای ستون‌های دایره‌ای پایه پل‌ها ارزیابی شده است. بدین منظور ستون دایره‌ای معرفی شده در پژوهش Shao و همکاران (۲۰۱۳) در نرم‌افزار Opensees مدل‌سازی شد و تحت آنالیزهای استاتیکی غیرخطی، تاریخچه زمانی غیرخطی و تحلیل دینامیکی غیرخطی فزاینده قرار گرفت. نتایج این تحلیل‌ها به شرح زیر است:

- ۱) با افزایش محصورشدگی ستون‌ها توسط لایه‌های مختلف الیاف، مقاومت جانبی تسلیم نسبت به حالتی که به دور ستون از این الیاف استفاده نشده است، بیشتر خواهد شد.
- ۲) استفاده از الیاف به دور ستون و افزایش محصورشدگی آن، باعث می‌شود تا تغییر مکان‌های بیشتری را قبل از آستانه فروریزش خود تحمل نماید.
- ۳) حداکثر تقاضای شکل‌پذیری ستون موردنظر تحت رکوردهای زلزله مختلف، با افزایش محصورشدگی نسبت به حالت بدون محصورشدگی کاهش می‌یابد.
- ۴) خسارت ایجادشده در ستون، با افزایش محصورشدگی کاسته خواهد شد.
- ۵) شتاب طیفی نظیر سطوح عملکردی خدمت‌رسانی بی‌وقفه، قابلیت استفاده بی‌وقفه، ایمنی جانی و آستانه فروریزش در حالت‌های استفاده از الیاف FRP نسبت به حالت عدم استفاده از این الیاف به دور ستون، افزایش قابل توجهی یافته است.

۶- مراجع

- دهقانی، ا.، دانشجو ف.، "مقاوم‌سازی تیرهای ترک‌خورده فولادی با استفاده از ورق‌های FRP"، پایان‌نامه دوره دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۹۶.
- نشریه شماره ۴۶۳، آیین‌نامه طرح پل‌های راه و راه‌آهن در برابر زلزله، معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری، وزارت راه و ترابری، ۱۳۸۷.
- نوری شیرازی م، عابدی ک، "بررسی آزمایشگاهی رفتار ستون‌های بتنی غیرمسلح تقویت شده با شیون نوین کاربرد ترکیبی ژاکت‌های فولادی- پلیمری"، نشریه مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تبریز، ۱۳۹۷، ۴۸ (۱)، ۸۸-۷۷.
- Applied Technology Council (ATC 40), "Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings", California, USA, 1996.
- Caltrans, Version 1.6, "Seismic design criteria", California, USA, 2010.
- Eid R, Paultre P, "Compressive behavior of FRP-confined reinforced concrete columns", Engineering Structures, 2017, 132, 518-530.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA 356), "Prestandard and Commentary for the seismic rehabilitation of buildings", Washington DC, USA, 2000.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA P695), "Quantification of Building Seismic Performance Factors", Washington DC, USA, 2009.
- Hu D, Barbato M, "Simple and efficient finite element modeling of reinforced concrete columns confined with fiber-reinforced polymers", Engineering Structures, 2014, 72, 113-122.
- Omar I, ElGawady MA, "Behavior of hollow FRP-concrete-steel columns under static cyclic axial compressive loading", Engineering Structures, 2016, 123, 77-88.
- OpenSees, "Open System for Earthquake Engineering Simulation", Pacific Earthquake Engineering Research Center, 2016.
- Park YJ, Ang AH-S, Wen YK, "Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings", Structural Engineering, 1985, 111, 740-757.
- Shao Y, Zhu Z, Mirmiran A, "Cyclic modeling of FRP-confined concrete with improved ductility", Cement and Concrete Composites, 2006, 28, 959-968.
- Turgay T, Polat Z, Koksall H, Doran B, Karakoc C, "Compressive behavior of large-scale square reinforced concrete columns confined with carbon fiber reinforced polymer jackets", Material and design, 2010, 31, 357-64.
- Vamvatsikos D, EERI M, Cornell CA, "Applied Incremental Dynamic Analysis", Based on a short paper presented at the 12th European Conference on Earthquake Engineering, London, 2002.
- Youcef YS, Amziane S, Chemrouk M, "CFRP confinement effectiveness on the behavior of reinforced concrete columns with respect to buckling instability", Construction and Building, 2015, 81, 81-92.
- Zoppo MD, Ludovico MD, Balsamo A, Prota A, Manfredi G, "FRP for Seismic strengthening of shear controlled RC columns: Experience from earthquakes and experimental analysis", Composites, 2017, 129, 47-57.

EXTENDED ABSTRACT

The effect of FRP use on the Damage Index, Seismic Performance Levels and Ductility of The Bridges Circular Columns by Using IDA and NSP Analyses

Ehsan Bagheri, Farhad Daneshjoo *

Structural Department, Faculty of Environment and Civil Engineering, Tarbiat Modarres University, Tehran, Iran

Received: 04 November 2017; Review: 12 June 2021; Accepted: 15 June 2021

Keywords:

Confinement, ductility capacity, seismic ductility demand, damage index, yield strength, performance levels.

1. Introduction

One of the purposes of this study is to investigate the effect of the FRP use in order to increase the ductility capacity and reduce the ductility demand under dynamic loads. In this order the maximum ductility demand in the circular columns used in the bridges in the cases of use and disuse of FRP under far field earthquake records has been investigated and the effect of this application on the ductility demands has been determined quantitatively. By using the results of this study, the effect of FRP using in increasing the lateral strength of these columns has been investigated quantitatively.

In the following, the columns damages in the cases of use and disuse of this polymers has been investigated quantitatively using an appropriate damage index and the effect of their use in reducing seismic damages has been studied.

Finally, using incremental non-linear dynamic analyses on these columns considering confinement due to the polymers, seismic performance level such as operational, Immediate Occupancy, life safety and Collapse Prevention limit states has been investigated and the effect of using FRP in bridges circular columns on the improvement of their seismic performance has been evaluated.

2. Methodology

2.1. Column Properties

The under consideration column properties are selected based on one of the models recommended by Hu (2014) and its modeling is performed in Opensees software. The used column for analyses is made of concrete with circular cross section with 365 mm diameter and 1470mm height. The compression strength of the unconfined concrete is considered equal to 40.4Mpa. The yield stress and modulus of elasticity of steel are given as 450 and 2×10^5 Mpa respectively.

2.2. FRP modeling

Thickness, tensile rupture strength and modulus of elasticity for FRP polymers are considered to be equal to 1mm, 900Mpa and 2×10^4 respectively. For modeling the behavior of confined concrete materials with FRP, the SZM model is used which was proposed by Shao (2006) for considering the effects of circular cross sections confinement with FRP. For modeling the curve for confined concrete behavior with FRP polymers in Opensees software, concrete01 material was used for which the tensile strength of concrete is neglected.

* Corresponding Author

E-mail addresses: ehsan.bagheri@modares.ac.ir (Ehsan Bagheri), danesh_fa@modares.ac.ir (Farhad Daneshjoo).

2.3. Non-linear static analysis

The under consideration column is under push over analyses in all confinement modes and the diagram of the base shear against the deformation of the column top is obtained. Regarding the obtained results from these analyses, the ductility capacity, yield strength and yield displacement for each column in different confinement modes are acquired and compared to each other.

2.4. Non-linear dynamic analysis

Non-linear dynamic analyses on the considered column in different modes of confinement are performed using the far field earthquake records. The levels of ductility demand and damage index caused in the column in different modes of confinement under earthquake records and their averages are computed and compare to each other.

2.5. Incremental non-linear dynamic analyses

Incremental non-linear dynamic analyses on the considered column in different modes of confinement are performed using 22 far field records. In order to investigate the different performance levels of this columns, the respective spectrum acceleration for each performance level in different modes of confinement for all earthquake records are obtained using interpolation and the median of the results is computed and compared in each case.

3. Results and discussion

3.1. The effect of using FRP polymers on ductility capacity of column

By using FRP polymers even in one layer, the ductility level has been increased approximately 57% compared to the column without polymers. This amount of increase for two and three layer columns is 114 % and 200% respectively. By adding FRP due to confinement and more energy absorption capacity, the displacement that can be endured by the column before its collapse are increased and hence its plasticity will be increased consequently.

3.2. The effect of FRP polymers on column yield strength

The yield strength of this column is increased as a result of confinement increase. This amount of yield strength increase is 40%, 56% and 61% for one, two and three layer FRP compared to the case without FRP.

3.3. The effect of FRP polymers on maximum seismic ductility demand of column peak

With the increase of FRP layers around the column and its thickness, the amount of ductility demand in the column is reduced. This shows the effect of using FRP in different layers in order to increase the column seismic performance under dynamic loads. Thus the use of FRP with more thicknesses will improve the column seismic performance.

3.4. The effect of FRP on column damage index

By using FRP for columns confinement, the amount of damage occurred in the column will be reduced. This amount of decrease is increased by increasing the FRP layers. The amount of damage index reduction under different earthquakes for one, two and three layers FRP is 34%, 54%, 64% respectively compared to the case without FRP.

3.5. The effect of FRP on column seismic performance levels

By increasing the number of FRP layers around a column, the amount of spectral acceleration needed for the column to reach a specified performance level is increased. This amount of increase in OP performance level in one, two and three layers of confinement modes is 2.31, 2.6 and 2.67 times of that of the unconfined case respectively. For IO performance level, this amount of increase is 2.33, 2.48 and 2.56 times of that of the

case without FRP and in the LS performance level it is 2.40, 2.46 and 2.86 times of the corresponding amount in the case without yarn.

4. Conclusions

In this paper, the effect of using FRP fibers in the number of different layers on the seismic performance of circular columns of bridges is evaluated. For this purpose, the circular column recommended by Hu (2014) was modeled in Opensees software and subjected to nonlinear static analysis, nonlinear time history and incremental nonlinear dynamic analysis. The results of these analyzes are as follows:

- 1) As the columns are confined by different layers of fibers, the lateral yield strength will increase compared to the case where these fibers are not used around the column.
- 2) The use of fibers around the column and increasing its confinement, the column will endure more displacement before its collapse.
- 3) The maximum ductility demand of the columns under different earthquake decreases with increasing confinement compared to the state without confinement.
- 4) The damage caused to the column will be reduced by increasing the confinement.
- 5) Spectral acceleration such as to reach the performance levels of Operational, Immediate occupancy, Life safety and Collapse limit in the use of FRP fibers compared to the non-use of these fibers around the column has increased significantly.

5. References

- Hu D, Barbato M, "Simple and efficient finite element modeling of reinforced concrete columns confined with fiber-reinforced polymers", *Engineering Structures*, 2014, 72, 113-122.
- Shao Y, Zhu Z, Mirmiran A, "Cyclic modeling of FRP-confined concrete with improved ductility", *Cement and Concrete Composites*, 2006, 28, 959-968.