مطالعات علوم کاربردی در مهندسی
دوره ۹، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲
صفحات ۳۷-۲۱

Online ISSN: ۲۴۷۶-۴۵۰۷
Print ISSN: ۲۵۳۸-۲۰۵۵
www.irijournals.com

ارزیابی و تحلیل عددی روش‌های اضافه کردن سیستم سازه‌ای جدید برای مقاوم‌سازی ساختمان بتن مسلح

حسن گلمایی[۱]، حسین نژادیان[۲]

[۱]عضو هیئت علمی دانشگاه
[۲]کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه موسسه آموزش عالی سارویه

چکیده

مسئله کاهش آسیب‌پذیری ساختمان‌ها و شریان‌های حیاتی در برابر زلزله را می‌توان یکی از چالش‌های دهه اخیر در کشور دانست. از آنجائی که اکثر سازه‌های موجود در کشور ایران در برابر زلزله مقاوم نیستند و بیشتر این سازه‌ها زلزله مهمی را تجربه نکرده‌اند نیازمند مقاوم‌سازی هستند. در ایران پروژه‌های مقاوم‌سازی ساختمان‌های دولتی از اواسط دهه ۸۰ شروع شده و تاکنون ادامه داشته است. از مهمترین این پروژه‌ها می‌توان به پروژه‌های وسیع مقاوم‌سازی مدارس در استان‌های مختلف اشاره داشت. از اینرو دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰) به همین منظور تدوین شده است. در این تحقیق پس از معرفی و تشریح اجرای روش‌های مختلف تقویت اعضای سازه بتنی، یک ساختمان بتنی ۵ طبقه با سیستم قاب خمشی و مطابق با دستورالعمل ویرایش دوم استاندارد ۲۸۰۰ در نرم‌افزار SAP2000 مدلسازی و طراحی گردید و سپس تحت ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفت و سطح عملکرد آن بر مبنای دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای محاسبه گردید. با توجه به نتایج تحلیل ساختمان ضعیف بوده، در نتیجه با سه روش مقاوم‌سازی گردید. نتایج نشان می‌دهد تمامی روش‌های انتخابی (تقویت با دیوار برشی بتنی، مهاربند هم‌محور فولادی و میراگر ویسکوز) توانستند سطح عملکرد ساختمان را به سطح ایمنی جانی افزایش دهند. از لحاظ کاهش تغییرمکان، میراگر ویسکوز بهترین عملکرد را دارا بوده و سطح عملکرد مطلوب‌تری را ارائه می‌نماید. با در نظر گرفتن تمامی جوانب مقاوم‌سازی از جمله راحتی اجرا و هزینه‌های انجام، تقویت ساختمان با استفاده از دیوار برشی مناسب-ترین گزینه می‌باشد.

کلمات کلیدی: مقاوم‌سازی، ساختمان بتنی، دیوار برشی بتنی ، مهاربند هم‌محور فولادی، میراگر ویسکوز.

مقدمه

کشور ایران از نظر لرزه‌خیزی در منطقه‌ی فعال کره زمین واقع است. وجود گسل‌های فراوان در سراسر پوسته ایران و وقوع مکرر زلزله‌های ویرانگر در طول تاریخ واقعیتی است که همواره باید آن را به عنوان یک تهدید بالقوه باور داشت و برای مقابله با آن چاره-اندیشی نمود. عملکرد نامطلوب و بروز رفتارهای غیرانعطاف‌پذیر بسیاری از سازه‌های بتن مسلح در زلزله‌های اخیر ضرورت عملیات مقاوم‌سازی را بیان می‌کند. هدف از مقاوم‌سازی این ساختمان‌ها، ارتقاء کیفی آنها مطابق ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ ایران می‌باشد.

بهسازی در لغت به مفهوم اصلاح، بهتر کردن یا بهبود بخشیدن به شرایط یا وضعی است. مطابق تعریف بهسازی در صنعت ساختمان، ایجاد قابلیت انجام وظیفه یا وظائفی است در ساختمان، سازه ساختمان یا اجزا (Components) و عناصر (Elements) آن که در وضع موجود قادر به انجام تمام و کمال آن وظیفه یا وظائف نیستند. دلایل بهسازی، ممکن است ناشی از نارسائی طرح، نامناسب بودن اجرا، بهره‌برداری بی‌ضابطه یا فروپایگی ساختمان، سازه ساختمان یا اجزا و عناصر آن در اثر از دست رفتن مشخصه‌های مصالح و تجهیزات به دلایل مختلف از جمله اثر فرساینده زمان، سانحه، حادثه یا عوامل دیگر، یا حاصل تغییر و تحول در شرایط زیست و کار و سنگین‌تر شدن وظائف مورد انتظار از ساختمان باشد.

دلایل مقاوم‌سازی سازه

در زیر دلایل مختلف مقاوم‌سازی سازه‌ها به علت خطاهای انسانی و اشتباهات مهندسی بطور خلاصه معرفی می‌گردد:

خطای طراحی: فرضیات اشتباه در ارتباط با شرایط ساختمان، فراموش کردن بندهایی از آیین نامه و ... از عوامل موثر در خطای طراحی می‌باشند.

استفاده از آیین‌نامه‌های قدیمی: استفاده از آیین‌نامه‌های ساختمانی قدیمی که تا قبل از انتشار آیین‌نامه جدید ایمن محسوب می‌شد ممکن است دیگر از ایمنی کافی برخوردار نبوده و نیاز به ارتقا در شکل‌پذیری و مقاومت داشته باشد.

مشکلات اجرایی: با توجه به اینکه در مراحل اجرای ساختمان امکان خطای نیروی انسانی وجود دارد و این خطا می‌تواند در قالب‌بندی، آرماتوربندی، بتن‌ریزی، عمل‌آوری، اندازه‌گذاری‌ها و ... اتفاق افتد. بنابراین یکی از خطاهای محتمل در سازه، خطاهای اجرایی در مرحله ساخت می‌باشد.

متفاوت بودن مقادیر محاسبه شده با مشخصات مصالح اجرا شده: از جمله خطاهای ممکن در طول ساخت سازه، متفاوت بودن مقادیر طراحی شده با مشخصات مصالح بکار رفته در ساختمان می‌باشد و در هر دو نوع سازه بتنی و فولادی رواج دارد. البته از آنجاییکه فولاد ماده‌ای همگن بوده و مقاطع فولادی در کارگاه و تحت کنترل بالا تولید شوند بین مقادیر مشخصات طرح و واقعی خطای کمتری رخ می‌دهد. برخلاف فولاد، بتن از مصالح ناهمگنی تشکیل داده شده و عملیات اختلاط، حمل، بتن‌ریزی و نگه‌داری سبب تولید مصالحی با مشخصات مکانیکی پراکنده می‌شود.

خوردگی و نابودی مصالح: از جمله مشکلات مصالح فولادی که در سازه‌ها بکار برده می‌شوند، خوردگی مصالح فولادی و زنگ زدگی آن می‌باشد که سازه را وادار به بهسازی می‌کند.

تغییر میزان بار وارده بر ساختمان: در طول عمر یک ساختمان ممکن است افزایش بارگذاری اتفاق بیفتد که این امر ممکن است به شکل‌های مختلفی ایجاد گردد.

تغییر کاربری ساختمان: تغییر کاربری ساختمان مانند تبدیل واحد مسکونی به انباری و ... از جمله مواردی است که باعث انجام عملیات مقاوم‌سازی می‌گردد.

نصب تجهیزات بر روی سازه: تعبیه تجهیزات مخابراتی یا مکانیکی، نصب ماشین‌آلات بر روی ساختمان و... .

فرضیات و روش انجام پژوهش

در مرحله اول با کمک از مقالات، کتب و پژوهش‌های پیشین به بررسی و ارائه تحقیقات در زمینه روش‌های مختلف تقویت ساختمان‌های بتن مسلح از جمله روش‌های شامل اضافه کردن سیستم سازه‌ای جدید مانند استفاده از دیوار برشی، مهاربند هم-محور و ...؛ و یا تقویت اعضای موجود بوسیله ژاکت بتنی، ژاکت فلزی، ورق‌های FRP و ... به پرداخته می‌شود.

در مرحله بعدی، جهت مدلسازی و آنالیز عددی، گام‌های زیر طی می‌گردد:

طراحی یک ساختمان بتنی با سیستم قاب خمشی براساس ویرایش دوم استاندارد ۲۸۰۰ در نرم‌افزار SAP 2000.

ارزیابی عملکرد لرزه‌ای مدل بر اساس دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود نشریه ۳۶۰ و ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰.

ایجاد مدل‌های مقاوم‌سازی شده با استفاده از روش‌های فوق در نرم‌افزار SAP 2000.

ارزیابی مجدد و آنالیز مدل‌های مقاوم‌سازی شده با استفاده از تحلیل استاتیکی غیرخطی.

پیش‌فرض‌های مسئله عبارتند از:

عملکرد نامطلوب سازه‌های بتن مسلح به دلایلی همچون خطاهای اجرایی، خطاهای طراحی، استفاده از استانداردها و آیین‌نامه‌های قدیمی، تغییر کاربری سازه و افزایش طبقات و بار وارده و... .

روش‌های مختلفی برای مقاوم‌سازی و تقویت سازه‌های بتن مسلح وجود دارد که هر یک از روش‌ها دارای مزایا، معایب و محدودیت‌هایی می‌باشند.

عواملی مانند محدودیت‌های ابعادی، معماری، افزایش باربری، زمانی و محدودیت‌های بهره‌برداری، در انتخاب روش موثر می‌باشند.

سطوح عملکرد اجزای سازه‌ای و ملحقات غیر سازه‌ای

سطوح عملکرد ساختمان بر اساس عملکرد اجزای سازه‌ای و ملحقات غیرسازه‌ای تعریف می‌گردد و مختصراً با یک عدد برای عملکرد اجزای سازه‌ای و یک حرف برای عملکرد اجزای غیر سازه‌ای نمایش داده می‌شود. این سطوح عملکرد بر مبنای اندازه ترک-خوردگی یا خرابی اجزای سازه‌ای و ملحقات غیر سازه‌ای تعریف می‌گردند.

سطوح عملکرد اجزای سازه‌ای

اجزای سازه‌ای شامل تیر، ستون، بادبند، دیوار بتنی، دیوارهای پرکننده با مصالح بنایی غیرمسلح، پی، دیافراگم و... می‌باشد. با توجه به نوع سیستم سازه‌ای اصلی یا غیر اصلی بودن اعضاء و همچنین تغییرمکان جانبی گذرا و ماندگار، معیارهای سطح عملکرد اجزای سازه‌ای تقسیم‌بندی می‌گردند. تغییر مکان جانبی گذرا، حداکثر تغییر مکان نسبی جانبی طبقات است که پیش‌بینی می‌شود در طول وقوع زمین‌لرزه طرح در ساختمان ایجاد شود. به همین صورت تغییرمکان جانبی ماندگار حداکثر تغییر مکان نسبی جانبی طبقات است که پس از وقوع زمین‌لرزه به علت رفتار خمیری یا ترک‌خوردگی در سازه باقی می‌ماند. عملکرد اجزای سازه‌ای به اختصار با یک عدد نشان داده می‌شود. و نیز حرف S مخفف Structural است. دسته‌بندی سطوح عملکرد در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱ اصطلاحات بکار رفته در FEMA-356 و دستورالعمل بهسازی برای سطوح عملکرد اجزای سازه‌ای[۳].

اصطلاح به کار رفته در FEMA	اصطلاح معادل FEMA در دستورالعمل بهسازی
Immediate occupancy level (S-1)	قابلیت استفاده بی‌وقفه

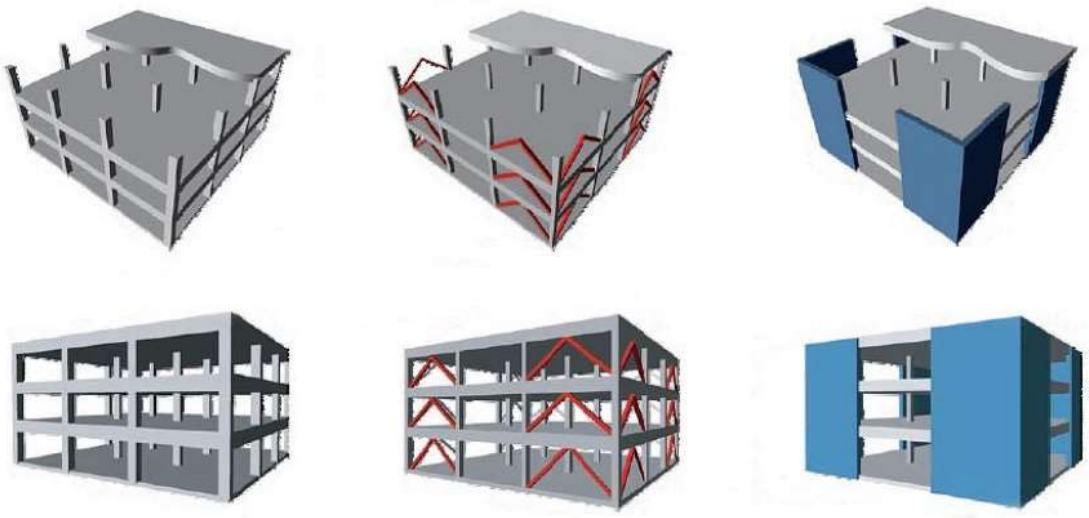
Life safety level (S-3)	ایمنی جانی
Collapse prevention level (S-5)	آستانه فروریزش

در سطح عملکرد قابلیت استفاده بی‌وقفه، مقاومت و سختی اجزای سازه تغییر قابل‌توجهی پیدا نکند و استفاده‌ی بی‌وقفه از آن ممکن باشد.

اضافه کردن سیستم‌های سازه‌ای جدید

اگر زمانی سازه در تحمل بارهای وارده ضعف‌های کلی داشته باشد، جوریکه نسبت نیاز سازه‌ای به ظرفیت موجود و یا تغییرشکل-های غیرخطی در اکثر اعضای آن بزرگ باشد، نیاز است برای فراهم ساختن ظرفیت و مقاومت کلی سازه، سیستم باربر جانبی اصلاح و یا ایجاد گردد. بدین منظور روش‌هایی همچون اضافه نمودن انواع قاب‌های مهاربندی شده، قاب‌های خمشی، انواع دیوارها شامل دیوارهای برشی بتنی، فولادی و یا مرکب، دیوارهای پرکننده، میانقاب‌های بنایی و یا مسلح، دیوارهای پشت بند و ... پیشنهاد می‌گردند.

همچنین اگر ضعف عمده سازه در کمبود سختی جانبی و در نتیجه تغییر مکان‌های زیاد آن تعیین شود، می توان با روش‌های مناسب مثل افزایش تعداد مهاربند یا دیوار برشی، سختی جانبی لازم را برای سازه فراهم نمود (شکل ۱).



شکل ۱ افزایش مقاومت و سختی سازه بوسیله اضافه نمودن قاب خمشی، مهاربند و دیوار برشی [۴]

نقاط ضعف و معایب محتمل در تیرهای بتن مسلح

دو حالت عمده شکست در تیرهای بتنی، شکست‌های برشی و خمشی هستند. از آنجائی که شکست خمشی رفتار شکل‌پذیرتری از خود نشان می‌دهد عموماً نسبت به شکست برشی مقدم‌تر می‌باشد. شکست نرم امکان پخش مجدد تنش را مهیا ساخته و به ساکنین و افراد حاضر در محل نیز فرصت بیشتری برای پی بردن به وضعیت بحرانی تیر می‌دهد.

تهاجم یون‌های شیمیایی، از دیگر خرابی‌های تیر بتن مسلح می‌باشد. در شکل (۲) تأثیر نیروهای لرزه‌ای و خرابی تیرها در اثر تهاجم یون‌های شیمیایی نمایش داده شده است. آسیب‌هایی از این قبیل نیاز به مقاوم‌سازی تیر بتنی را افزایش می‌دهد.

شکل ۲ نمونه‌ای از آسیب دیدگی تیرهای بتنی

اصولاً برای مقاوم‌سازی تیرهای بتن مسلح راهکارهای زیر پیشنهاد می‌گردد:

روکش بتن مسلح

روکش FRP

پیش‌تنیدگی خارجی

روکش فولادی

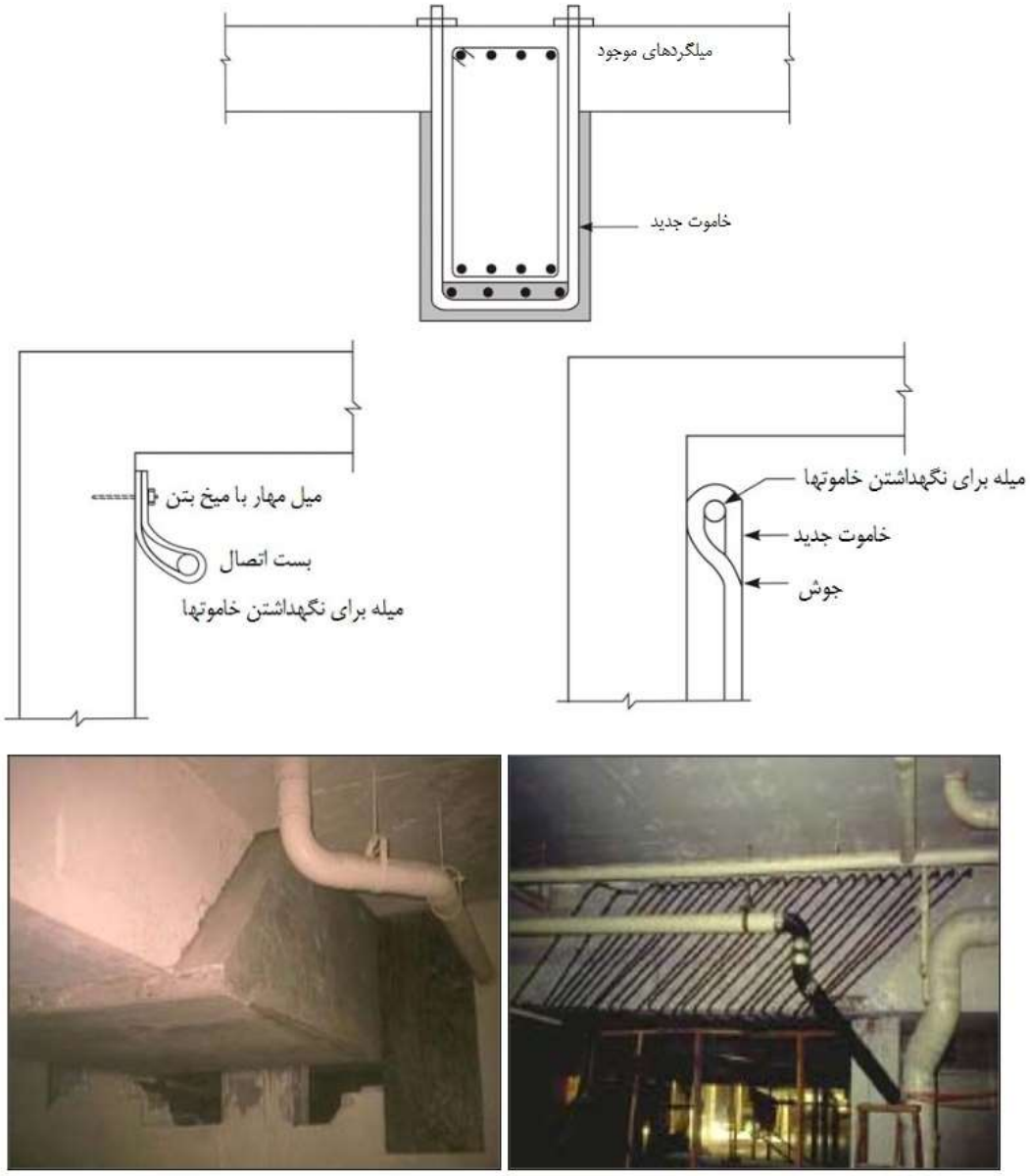
در ادامه هریک از روش‌های فوق بطور مختصر شرح داده می‌شوند.

ژاکت بتن مسلح

یکی از روش‌های مقاوم‌سازی تیر بتنی و بهبود مقاومت آن استفاده از ژاکت بتنی می‌باشد. ژاکت بتنی تیر در سه و یا چهار وجه تیر اجرا می‌شود. همچنین با کمک ژاکت بتنی می‌توان ناحیه کششی و فشاری تیر جدید را تقویت نمود .

جوش دادن میلگردهای اتصال با آرماتورهای جدید و قدیم و زبر نمودن سطح بتن قدیمی برای تکمیل مکانیسم انتقال نیرو بین مصالح قدیم و جدید نیاز می‌باشد. موثرترین شیوه جهت مقاوم‌سازی تیر بتنی، اجرای آن در هر چهار وجه تیر می‌باشد. در این روش ضخامت بتنی که به وجه بالایی تیر اضافه می‌شود می‌بایست در ضخامت سقف ناپیدا باشد. برای اجرای تنگ‌ها می‌توان از طریق سوراخ‌هایی که در فواصل نزدیک به یکدیگر در دال سقف ایجاد می‌شود استفاده نمود.

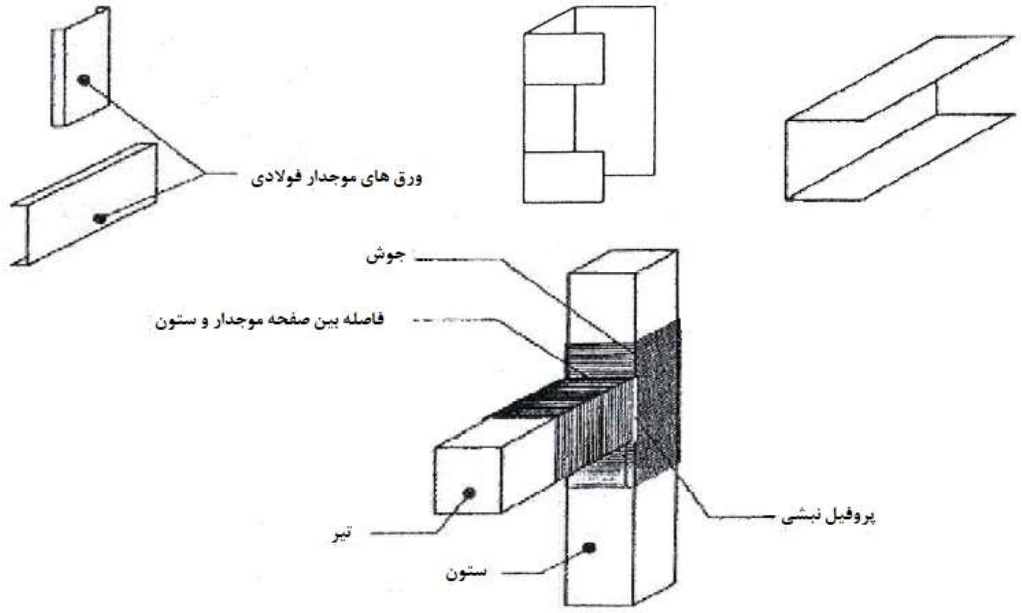
نوع دیگر اجرای ژاکت بتنی یعنی اجرا در سه وجه تیر جهت افزایش ظرفیت برشی و خمشی تیر در برابر بارهای قائم انجام می‌گردد، ولی بعلت اینکه افزایش ظرفیت باربری در این حالت برای مقاطعی از تیر که در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها قرار دارند امکان‌پذیر نمی‌باشد، نمی‌توان تیر را در مقابل بارهای جانبی زمین‌لرزه تقویت نمود. از نکات مهم این روش مهار مناسب خاموت‌ها از ضلع‌های بالایی روکش می‌باشد. بعلت آنکه استفاده از قالب و ریختن بتن از بالای تیر میسر نمی‌باشد تنها شیوه ممکن استفاده از بتن‌پاشی است.



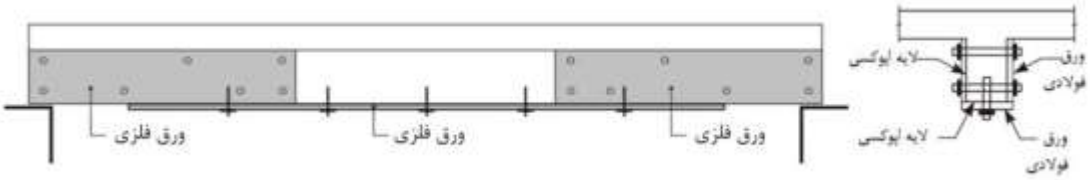
شکل ۳ استفاده از روکش بتنی در مقاوم‌سازی تیرها

روکش فولادی

یکی از روش‌های تقویت خمشی تیر بتنی استفاده از روکش فولادی است. در این روش ورق‌هایی به ضخامت کم را می‌توان با رزین اپوکسی به وجه کششی تیر چسباند. در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها، چسباندن ورق به وجه قائم تیرها سبب افزایش ظرفیت برشی و چسباندن ورق به بال تحتانی سبب افزایش ظرفیت خمشی تیر می‌شود . اگر استفاده از ورقه‌هایی با ضخامت بیشتر مورد نیاز باشد، باید از آرماتورها و بولت‌های مهاری برای انتقال برش بهره گرفت. در این صورت نیز بهتر است ابتدا ورق فولادی با چسب اپوکسی چسبانده شده و سپس آرماتورها به شکل میانگذار یا کاشته شده استفاده گردد (شکل ۳).



شکل ۴ تقویت خمشی تیر بتنی و تقویت برشی تیر بتنی با چسباندن ورق‌های فولادی با ضخامت کم با چسب اپوکسی



شکل ۵ تقویت خمشی تیر بتنی و تقویت برشی تیر بتنی با ورق فولادی

ارزیابی ساختمان بتنی

در هنگام وقوع زمین‌لرزه، اجزای سازه در اثر تغییر مکان سازه تحت تأثیر تغییر شکل‌هایی قرار می‌گیرند. تغییرشکل‌های اجزا و پاسخ سازه در زمین‌لرزه‌های خفیف در محدوده خطی و الاستیک باقی مانده، ولی در زمین‌لرزه‌های شدید تغییر شکل‌های اجزاء و پاسخ سازه از محدوده ارتجاعی فراتر می‌رود و در نهایت می‌تواند سبب خرابی اجزای سازه شود.

سازه می‌بایست نیروهای ناشی از زمین‌لرزه را در سطح عملکرد مورد نظر تحمل نماید. رفتار سازه تحت اثر نیروهای ناشی از زمین-لرزه به پارامترهایی وابسته می‌باشد که این پارامترها عبارت است از: جرم، مقاومت، پیکربندی و هندسه، میرایی، شکل‌پذیری اجزای سازه، سختی و پارامترهای جنبش زمین [۳۱].

بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای، اولین گام در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود می‌باشد. در سال‌های اخیر برای بررسی میزان آسیب‌پذیری سازه‌ها روش‌های مختلفی مبتنی بر ارزیابی‌های کیفی و کمی سازه‌ها ارائه شده است. در روش‌های کیفی جهت برآورد تقریبی و اولیه مقاومت لرزه‌ای ساختمان، فرم‌های ویژه‌ای تهیه می‌شوند که در آن با توجه به شرایط لرزه‌خیزی منطقه و بر مبنای تجربیات ناشی از زمین‌لرزه‌های گذشته، اطلاعات و معایب موجود در اعضا و سیستم سازه مثل سیستم باربر جانبی و قائم، شکل‌پذیری اجزا، آسیب‌های وارد شده بر سازه و عملکرد اجزای مختلف، جمع‌آوری و استفاده می‌شود.

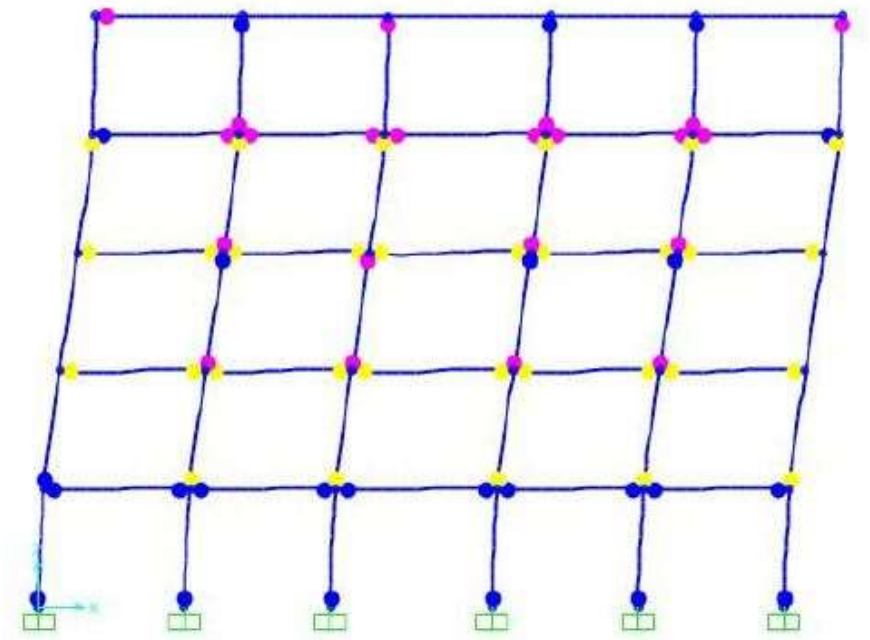
سپس بعد از گردآوری و تشکیل بانک اطلاعاتی در مرحله ارزیابی کیفی، در روش‌های کمی مشخصات سازه با دقت بالاتر و جزییات بیشتری مطالعه و ارزیابی شده و با توجه به شرایط فعلی سازه و با کمک روش‌های متداول بررسی آسیب پذیری لرزه‌ای سازه‌ها، مدلسازی آن انجام می‌پذیرد.

هدف از شناخت وضع موجود ساختمان، جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز جهت مدلسازی، تحلیل و ارزیابی رفتار لرزه‌ای سازه می‌باشد. این عمل می‌تواند با دقت‌های متفاوت و صرف زمان و هزینه متناسب انجام شود. بدین صورت انجام مطالعات شناخت وضع کنونی در سطوح متفاوت، بر مبنای گستره‌ی اطلاعاتی که گردآوری می‌شود، میسر خواهد بود. این سطوح به ترتیب افزایش دقت و گستره، به سطح اطلاعات حداقل، سطح اطلاعات متعارف و سطح اطلاعات جامع تقسیم‌بندی می‌شوند.

هدف اصلی ارائه راهکارهایی جهت ارزیابی و بهبود عملکرد ساختمان‌های متداول موجود در برابر زلزله و کاهش تلفات جانی ناشی از آن می باشد.

بررسی نتایج تحلیل

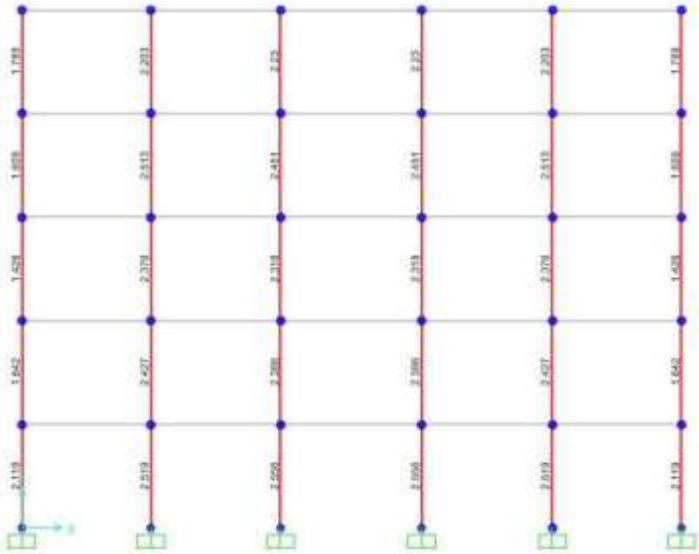
در بخش قبل، همانطور که شرح داده شد، سازه بتنی طراحی شده مطابق با ویرایش دوم استاندارد ۲۸۰۰ مورد تحلیل غیر خطی مطابق با ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ قرار گرفت. همانطور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود، بعد از انجام تحلیل غیرخطی مشخص شده که ساختمان ۵ طبقه بتنی طراحی شده با ویرایش دوم استاندارد ۲۸۰۰، سطح عملکرد ایمنی جانی را ندارد و تغییرمکان بام آن مقدار ۱۷ سانتی‌متر می‌باشد.



شکل ۶ سطح عملکرد لرزه‌ای ساختمان بتنی ۵ طبقه.

در اشکال (۷) و (۸) به ترتیب تنش اعضاء طراحی شده بر مبنای زلزله ویرایش دوم و ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود، در ویرایش چهارم (شکل ۸) نسبت تنش بسیار بالایی را داریم که لزوم نیاز به مقاوم‌سازی دیده می‌شود.

شکل ۷ نسبت تنش اعضا در ویرایش دوم استاندارد ۲.



شکل ۸ نسبت تنش اعضاء در ویرایش چهارم استاندارد ۲۸.

در نهایت در جدول (۲) مقاطع طراحی شده برای تیرها و ستون‌های این سازه برای تأمین سطح خطر ایمنی جانی بر مبنای زلزله ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰ آورده شده است. مقایسه آن با جدول (۱) ضعف مقاطع طراحی شده مطابق با ویرایش دوم استاندارد ۲۸۰۰ را نشان می‌دهد.

جدول ۲ مقاطع تیرها و ستون‌های ساختمان بتنی ۵ طبقه طراحی شده مطابق ویرایش چهارم استاندارد ۲۸۰۰

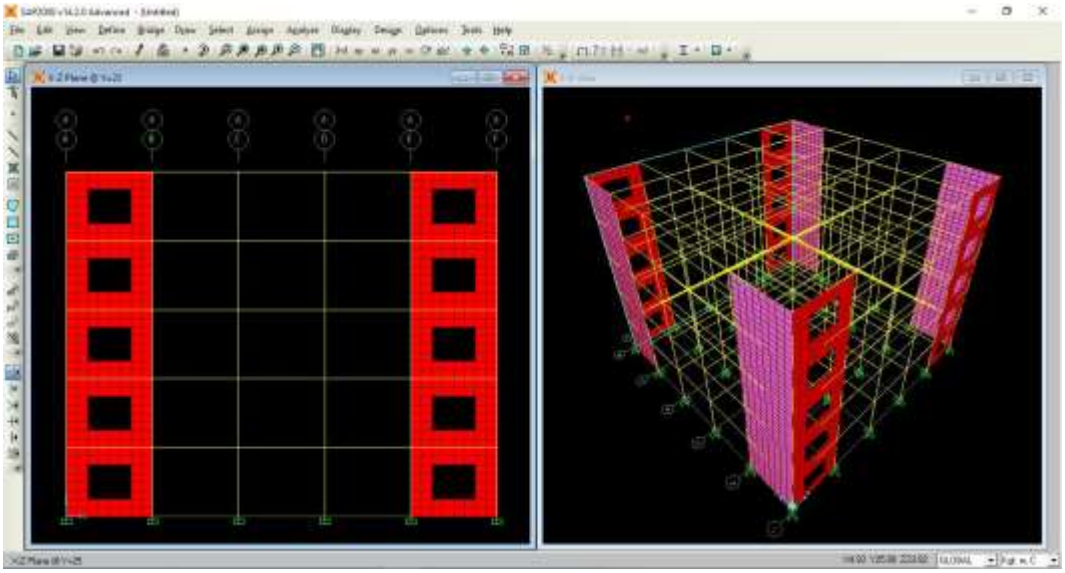
مقاطع ستون‌ها		مقاطع تیرها	
مقطع	طبقه	مقطع	طبقه
$40 \times 40 - 16\phi20$	۵	40×40	۵
$45 \times 45 - 20\phi20$	۴	45×45	۴
$50 \times 50 - 24\phi20$	۳	50×50	۳
$50 \times 50 - 24\phi20$	۲	50×50	۲
$55 \times 55 - 28\phi20$	۱	50×55	۱

طرح‌های مقاوم‌سازی

مطابق نتایج بدست آمده از تحلیل، سازه طراحی شده با ویرایش دوم استاندارد ۲۸۰۰ نیاز سطح عملکرد ایمنی جانی را ندارد و نیاز به مقاوم‌سازی دارد. در این پژوهش از روش‌های «دیوار برشی بتنی»، «مهاربند هم‌محور فولادی» و «میراگر ویسکوز» برای مقاوم‌سازی ساختمان بتنی ۵ طبقه استفاده می‌گردد که در ادامه نتایج بدست آمده، آورده شده است.

طرح تقویت با دیوار برشی بتنی

در شکل (۹) شمای کلی طرح تقویت با دیوار برشی بتنی آمده است. در این طرح دیوار برشی بازشودار به دهانه‌های مشخص شده اضافه شده است. مقاطع دیوار برشی استفاده شده در جدول (۳) نشان داده شده است.

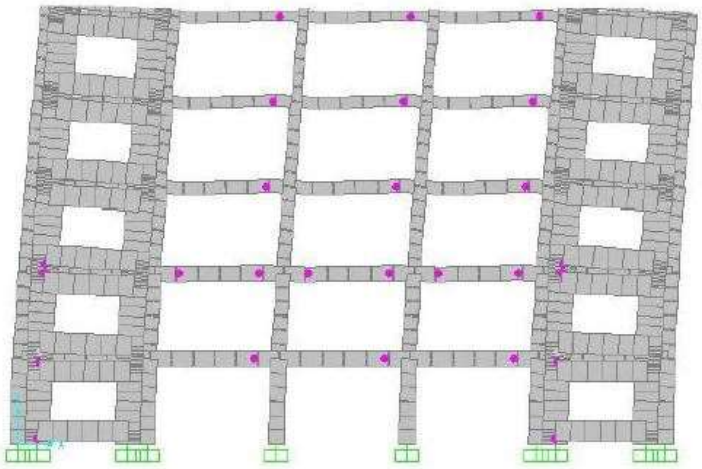


شکل ۹ طرح تقویت با دیوار برشی بتنی

جدول ۳ مقاطع دیوار برشی بتنی

مقطع	طبقه
ϕ12@30– ضخامت ۲۰	**۵**
ϕ16@25– ضخامت ۲۵	**۴**
ϕ16@25– ضخامت ۲۵	**۳**
ϕ20@20– ضخامت ۳۰	**۲**
ϕ20@20– ضخامت ۳۰	**۱**

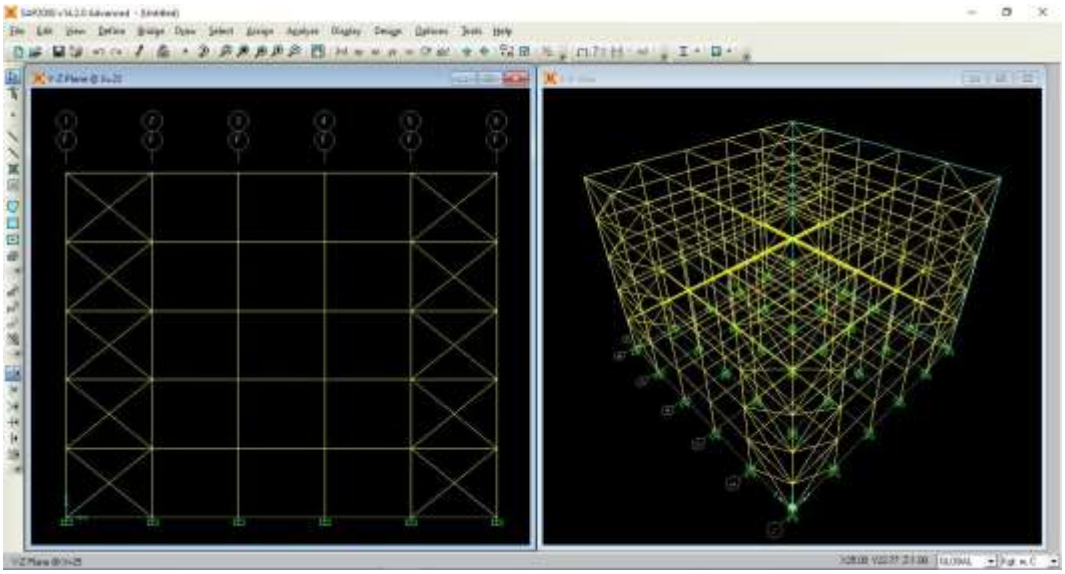
استفاده از دیوار برشی برای تقویت، با توجه به جایگذاری بازشوها مانند پنجره، می‌تواند برای معماری سازه مشکل‌ساز باشد؛ که برای حل این مشکل می‌توان از دیوارهای برشی بازشودار استفاده نمود و یا اینکه پنجره‌های موجود در دهانه را جابجا نمود.
همچنین این روش مشکل خاصی برای تأسیسات ساختمان، دسترسی‌های موجود ساختمان و عملکرد اجزای غیر سازه‌ای ایجاد نکرده و با جانمایی درست دیوارهای برشی، فونداسیون نیز تحت تأثیر مشکلات کمتری قرار می‌گیرد.
تجهیزات، ماشین‌آلات و مهارت نیروهای کار مورد نیاز این روش در حد معمول بوده و نیاز به استفاده از نیروهای ویژه نمی‌باشد.
مراحل اجرای این روش، بهره‌برداری از ساختمان را بطور کامل مختل نکرده و می‌توان به گونه‌ای عمل کرد که تنها بخش محدودی از ساختمان قابلیت بهره‌برداری نداشته باشد. حجم تخریب تیغه‌ها و دیوارها به همراه تیر فوقانی دیوارها به جهت عبور آرماتورهای اصلی دیوار می‌باشد.
در شکل (۱۰) سطح عملکرد ساختمان بعد از مقاوم‌سازی نشان داده شده است. با این روش تغییرمکان بام ساختمان ۱۰ سانتی‌متر بدست آمده است.



شکل ۱۰ سطح عملکرد ساختمان بعد از مقاوم‌سازی توسط دیوار برشی بتنی.

طرح تقویت با مهاربند هم‌محور فولادی

برای دومین روش مقاوم‌سازی ساختمان مورد بررسی، از مهاربند هم‌محور فولادی در دهانه‌های مشخص شده در شکل (۱۱) استفاده شده است. مقاطع مهاربند فولادی هم‌محور استفاده شده در جدول (۴) نشان داده شده است.



شکل ۱۱ طرح تقویت با مهاربند هم‌محور فولادی

جدول ۴ مقاطع مهاربند فولادی هم‌محور

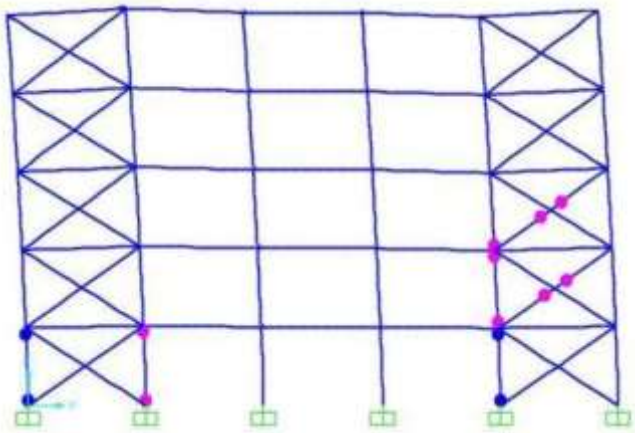
مقطع	طبقه
$2UNP\ 120 \times 120 \times 8$	۵
$2UNP\ 160 \times 160 \times 10$	۴
$2UNP\ 160 \times 160 \times 10$	۳
$2UNP\ 200 \times 200 \times 10$	۲
$2UNP\ 200 \times 200 \times 10$	۱

استفاده از مهاربند هم‌محور برای تقویت، با توجه به جایگذاری بازشوها مانند پنجره، می‌تواند برای معماری سازه مشکل‌ساز باشد؛ که برای حل این مشکل می‌توان از انواع دیگر مهاربندها مانند واگرا و ... استفاده نمود و یا اینکه پنجره‌های موجود در دهانه را جابجا نمود.

همچنین این روش مشکل خاصی برای تأسیسات ساختمان، دسترسی‌های موجود ساختمان و عملکرد اجزای غیر سازه‌ای ایجاد نکرده ولی در صورت بلندشدگی فونداسیون، تعبیه شمع‌های کششی در فونداسیون موجود با مشکلاتی همراه خواهد بود. تخریب قابل ملاحظه و جزییات دشوار و پیچیده دوخت شمع‌ها به فونداسیون موجود از جمله موارد مشکلات اجرایی این گزینه می‌باشد.

در این گزینه نسبت به گزینه دیوار برشی، تجهیزات، ماشین‌آلات و سطح مهارت بیشتری را به واسطه گروت‌ریزی و جزئیات اتصالات فولاد به بتن می‌طلبد. در عین حال در این روش حجم تخریب محدود به تخریب تیغه‌ها و دیوارها می‌باشد. مراحل اجرای این روش، بهره‌برداری از ساختمان را بطور کامل مختل نکرده و می‌توان به گونه‌ای عمل کرد که تنها بخش محدودی از ساختمان قابلیت بهره‌برداری نداشته باشد.

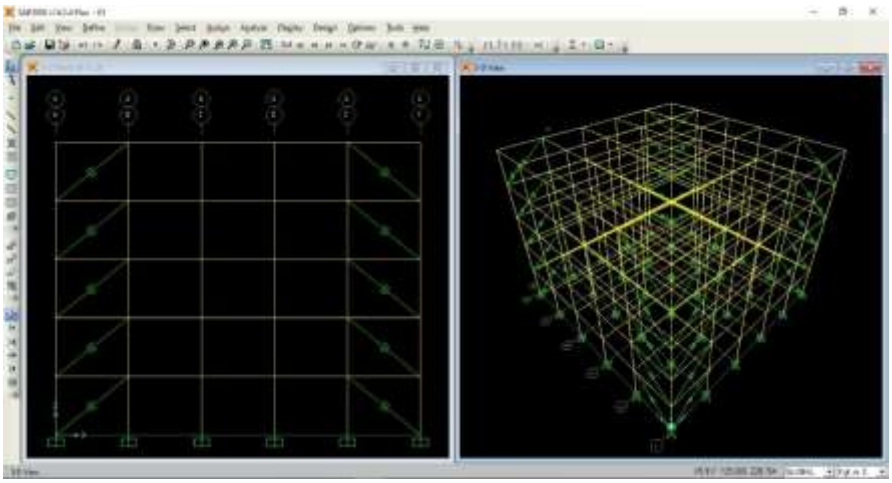
در شکل (۱۲) سطح عملکرد ساختمان بعد از مقاوم‌سازی نشان داده شده است. با این روش تغییرمکان بام ساختمان ۱۱/۵ سانتی-متر بدست آمده است.



شکل ۱۲ سطح عملکرد ساختمان بعد از مقاوم‌سازی توسط مهاربند هم محور فولادی.

طرح تقویت با میراگر ویسکوز

سومین روش مقاوم‌سازی ساختمان مورد بررسی، استفاده از میراگر ویسکوز می‌باشد. در این طرح مطابق شکل (۱۳) میراگر در دهانه‌های مشخص شده، جایگذاری گردید. برای طراحی میراگر ویسکوز از آیین‌نامه بارگذاری لرزه‌ای آمریکا استفاده شده است[۳۲]. جدول (۵) مشخصات طراحی میراگر ویسکوز را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ طرح تقویت با میراگر ویسکوز

جدول ۵ مشخصات طراحی میراگر ویسکوز

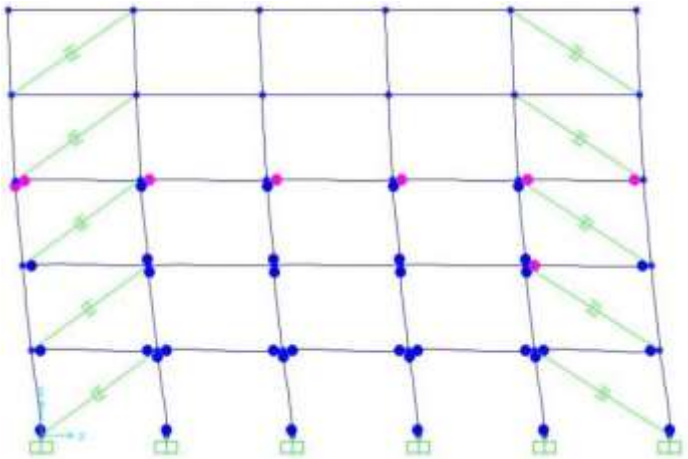
جرم لرزه‌ای طبقه	1,200,000
دوره تناوب تحلیلی مود اول T	0/78
کسینوس زاویه میراگر با افق Cos θ	0/8423
نسبت میرایی میراگر ζ_d	0/15
تعداد میراگر نصب شده در هر طبقه n	4
ضریب میرایی میراگر C	8868224
سختی میراگر K	62605675908
مجموع حاصلضرب جرم لرزه‌ای در مجذورتغییرمکان طبقات $\sum m \times (\Delta)^2$	2504132/23
مجموع مجذور حاصلضرب دریفت طبقات در کسینوس زاویه میراگر با افق	0/149506102

استفاده از میراگر ویسکوز برای تقویت، به نسبت دو روش قبلی از لحاظ عدم ایجاد مشکلات معماری سازه عملکرد بهتری دارد. همچنین این روش مشکل خاصی برای تأسیسات ساختمان، دسترسی‌های موجود ساختمان و عملکرد اجزای غیر سازه‌ای ایجاد نمی‌کند و فونداسیون نیز تحت تأثیر مشکلات کمتری قرار می‌گیرد.

در این گزینه نسبت به دو گزینه دیوار برشی و مهاربند هم‌محور، تجهیزات، ماشین‌آلات و سطح مهارت بیشتری را بواسطه طراحی و اجرای آن می‌طلبد. در عین حال در این روش حجم تخریب محدود به تخریب تیغه‌ها و دیوارها می‌باشد. مراحل اجرای این روش،

بهره‌برداری از ساختمان را بطور کامل مختل نکرده و می‌توان به گونه‌ای عمل کرد که تنها بخش محدودی از ساختمان قابلیت بهره‌برداری نداشته باشد.

در شکل (۱۴) سطح عملکرد ساختمان بعد از مقاوم‌سازی نشان داده شده است. با این روش تغییرمکان بام ساختمان ۵/۶ سانتی-متر بدست آمده است.



شکل ۱۴ سطح عملکرد ساختمان بعد از مقاوم‌سازی توسط میراگر ویسکوز.

بحث و نتیجه گیری

با توضیحاتی که ارائه گردید و نتایج حاصل از خروجی مدلسازی نرم‌افزار SAP2000 و آنالیز آن می‌توان به نتایج زیر رسید:

- تمامی روش‌های استفاده شده توانستند سطح عملکرد ساختمان را به سطح ایمنی جانی افزایش داده تا سازه بتواند در زلزله‌های با شتاب بیشینه g ۰/۳ (سطح خطر زیاد) ایمن بماند.
- از لحاظ معماری طرح تقویت با میراگر ویسکوز نسبت به دو روش دیگر برتری دارد. هر سه گزینه ارائه شده تقریباً به یک میزان بر تأسیسات ساختمان تأثیر می‌گذارند و همچنین هیچ یک از گزینه‌های پیشنهادی تأثیری بر دسترسی‌های موجود ساختمان و عملکرد اجزای غیر سازه‌ای نخواهند داشت.
- در بین گزینه‌های موجود، طرح مهاربند هم‌محور فولادی می‌تواند در صورت بلندشدگی فونداسیون، وضعیت متفاوتی نسبت به دیگر گزینه‌ها ایجاد کرده و با مشکلاتی همراه باشد.
- تجهیزات، ماشین‌آلات و سطح مهارت برای طرح دیوار برشی در حد معمول بوده و برای طرح مهاربند هم‌محور فولادی و همچنین طرح میراگر ویسکوز، سطح بالاتری از مهارت و تجهیزات مورد نیاز می‌باشد. از این لحاظ طرح دیوار برشی دارای برتری می-باشد.
- در گزینه دیوار برشی نسبت به دو گزینه دیگر حجم تخریب بیشتری صورت می‌پذیرد. در هر سه گزینه با اجرای مرحله مرحله روش‌ها، می‌توان به گونه‌ای عمل نمود که تنها بخش محدودی از ساختمان قابلیت بهره‌برداری نداشته باشد.
- از لحاظ کاهش تغییرمکان، میراگر ویسکوز بهترین عملکرد را دارا بوده و سطح عملکرد مطلوب‌تری را ارائه می‌نماید.
- با در نظر گرفتن تمامی جوانب مقاوم‌سازی از جمله راحتی اجرا و هزینه‌های انجام، مناسب‌ترین گزینه تقویت ساختمان در این تحقیق، دیوار برشی می‌باشد. دیوار برشی سبب افزایش سختی، مقاومت، شکل‌پذیری و درجه اطمینان سازه شده و همچنین بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه و کاهش تغییرشکل‌ها و خسارات وارد به دیگر المان‌های بتنی سازه را در پی خواهد داشت.

اگر تیر و ستون‌های سازه بتنی بتوانند بارهای ثقلی را بخوبی تحمل کنند ولی تحت بارهای جانبی تحمل کافی را نداشته و آسیب-پذیر باشند، می‌توان با اضافه نمودن دیوار برشی، نیروی جانبی لرزه‌ای را توسط این دیوارها جذب کرده و مانع اعمال نیروها و تغییرشکل‌های لرزه‌ای به تیرها و ستون‌ها شد. از اینرو اضافه کردن تنها دو یا چهار دیوار برشی سبب کاهش آسیب‌پذیری تمامی تیرها و ستون‌ها می‌شود.

پیشنهادات زیر جهت ادامه کار این پژوهش ارائه می‌شود:

- بررسی روش‌های نسبتاً جدیدتر مقاوم‌سازی سازه مانند کامپوزیت‌های FRP.
- بررسی و آنالیز پروژه‌های بهسازی ساختمان‌های دولتی و عمومی مانند مدارس.
- بررسی روش‌های مقاوم‌سازی سازه‌های بنایی با توجه به گستردگی استفاده در ایران.

منابع

۱. آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) ، ویرایش چهارم، مرکز تحقیقات، راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۲.

۲. پورنمازیان, حبیب الله و عرفان جابرزاده، (۱۳۹۳)، "مدیریت ساخت در مقاوم‌سازی ستون‌های بتن آرمه به کمک کامپوزیت‌های FRP و ژاکت‌های فولادی"، کنفرانس مصالح و سازه‌های نوین در علم مهندسی عمران، شیراز، شرکت پندار اندیش رهپو.

۳. تجربیات و درس‌های بهسازی لرزه‌ای، شرکت خدمات مدیریت ایرانیان، انتشارات علم و ادب، تهران، ۱۳۸۹.

۴. چراغی, حسین؛ محمد صافی و محمد رییسی، (۱۳۹۵)، "بررسی افزایش شکل پذیری ستون بتن مسلح موجود با ژاکت بتنی"، چهارمین کنگره علمی پژوهشی افق‌های نوین در حوزه مهندسی عمران، معماری، فرهنگ و مدیریت شهری ایران، تهران، انجمن توسعه و ترویج علوم و فنون بنیادین- انجمن علمی تخصص عمران و معماری.

۵. خیرالدین، ع.، (۱۳۹۷)، "مقاوم‌سازی سازه‌های بتن آرمه به کمک ورق و پروفیل فولادی و کامپوزیت‌های FRP"، کتاب، دانشگاه سمنان

۶. دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰)، ۱۳۸۵، انتشارات سازمان مدیریت برنامه ریزی کشور.

7. Belouar, A., Laraba, A., Benzaid, R and Chikh, N. (2013), “Structural Performance of Square Concrete Columns Wrapped with CFRP Sheets”. Procedia Engineering. 54:232–240.

8. FEMA (1997), FEMA-273, NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of buildings,Federal Emergency Management Agency,Washington,D.C.,USA.

9. FEMA (2000), FEMA-356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings Federal Emergency Management Agency, Washington,D.C.,USA.

10. Garzón-Roca, J., Adam, J. M., Calderón, P. A., & Valente, I. B. (2012), “Finite element modelling of steel-caged RC columns subjected to axial force and bending moment”, Engineering Structures, 02 , 128-182.

11. Julio, E. Branco, F and Silva,V. (2005), “Structural Rehabilitation Of Columns With Reinforced Concrete Jacketing,” Struct. Engineering Master.

12. Nasr Z.Hassan., Alaa G. Sherif, Amal H.Zamarawy, (2017), "Finite element analysis of reinforced concrete beams with opening strengthened using FRP", Ain Shams Engineering Journal, Volume 8, Issue 4, Pages 531-537.
13. NEHRP, (2014), Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
14. Penelis, G. and Kappos, A.J, (1997), "Earthquake- resistance concrete structures", E&FN Spon Published.
15. Sadjadi, R and Kianoush, M., 2007, Seismic performance of reinforced concerete moment resisting frames. International Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 132, 1, 46-53.
16. Shaban, A. (2014), "Partial strengthening of R.C square columns using CFRP", HBRC Journal. 10: 279-286.
17. Sokkary, E., and Galal, K., 2009, Analytical investigation of the seismic performance of RC frames rehabilitated using different rehabilitation techniques. International Journal of Earthquake Engineering, 25, 4, 408-415.
18. Vandoros, K. G., & Dritsos, S. E. (2006), "Concrete jacket construction detail effectiveness when strengthening RC columns", Construction and Building Materials, 22(2), 220-222.
19. Warburton, G. B., 1992, Optimum absorber parameters for various combinations of response and excitation parameters, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 10, 3, 381-401.
20. Wroblewski. Laura., Hristozov. Dimo., Pedram Sadeghian, (2017), "Durability of bond between concrete beams and FRP composites made of flax and glass fibers", Construction and Building Materials, Volume 126, Pages 800-811.
21. www.nisee.com
22. Yalcin,C and Kaya ,O. (2004), "An Experimental Study On The Behavior Of reinforced Concrete Columns Using CFRP Material." The 13th world conference on earthquake engineering, Vancouver, Canada.