۱– معرفی رساله

۱-۱- مقدمه

دنیا در طول تاریخ شاهد نابودی شهرها و حتی بعضی از تمدنهای خود در اثر زلزله بوده است. ابعاد فاجعه بار اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی، سیاسی و ... یک زلزله کوتاه مدت چند ثانیه‌ای، می‌تواند حاکم بر سرنوشت چند نسل باشد .

در طی چند دهه گذشته با پیشرفت علم مهندسی زلزله و تحولاتی که در این زمینه بوقوع پیوسته است، تغییرات زیادی در آیین نامه های طراحی لرزه‌ای بوجود آمده است. افزایش اطلاعات در مورد نحوه رفتار ساختمانها در زلزله که از طریق مطالعات آزمایشگاهی و تجارب زلزله های گذشته به دست آمده است باعث نگرانی در مورد وضعیت لرزه‌ای ساختمانهای موجود که با آیین نامه های گذشته طراحی و اجرا شده‌اند، گشته است.

علاوه بر زلزله، پارامترهای دیگری از قبیل ضعفهای طراحی، مشکلات اجرا، تغییر کاربری سازه، نگهداری نامناسب و شرایط نامساعد محیطی نیز در کاهش عمر مفید و خرابی سازه ها مؤثر می‌باشند. لذا ایده ارتقای ظرفیت سازه ها یکی از مهمترین مسائل مهندسی عمران در چند سال اخیر بوده است. با توجه به پیشرفتهای علمی و فنی که هر روزه شاهد آن هستیم، مشکلات فوق بطور تدریجی از بین رفته و ملاحظه می‌شود که سازه های جدید از مشکلات کمتری نسبت به سازه های قدیمی برخوردار هستند . با این وجود اهمیت حفظ، نگهداری و مقاوم سازی سازه‌های قدیمی سبب شده است که دریچه های جدیدی در این زمینه به روی جامعه مهندسی گشوده شود. در این میان بحث مقاوم سازی و تقویت سازه ها از اهمیت بیشتری برخوردار می‌باشد، بطوریکه محققان بدنبال روشهایی هستند که با کمترین هزینه و وقت، بهترین عملکرد را در تقویت سازه ها داشته باشد.

در این رساله روشی جدید برای افزایش ظرفیت خمشی و تقویت ستونهای بتنی بر مبنای آزمایشهای انجام گرفته ارائه می‌شود.

۱-۲- آسیب پذیری ستونهای بتنی مسلح

بسیاری از سازه‌های بتنی که بین ۲۰ تا ۴۰ سال گذشته طراحی و ساخته شده‌اند بدون در نظر گرفتن اثرات بارگذاری جانبی ناشی از زلزله بنا گردیده‌اند. تعداد زیادی ساختمان و پل وجود دارد که تنها برای تحمل بارهای ثقلی طراحی شده و بارگذاری لرزه‌ای در طراحی آنها لحاظ نشده است، بطوریکه انتظار می رود در زلزله های آتی این سازه‌ها بسیار آسیب پذیر باشند.

ستونها، اصلی ترین جزء سازه های بتن مسلح محسوب شده و هرگونه خرابی و شکست در آنها پایداری کل سازه را با مشکل روبرو می‌کند. لذا با توجه به این شرایط، مقاوم سازی لرزه‌ای ستونهای بتنی در پلها و ساختمانها در چند سال اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته و تحقیقات زیادی در این زمینه انجام شده است. هنگام وقوع زلزله، ستونهای بتنی در پلها و ساختمانها تحت بارهای جانبی سیکلی قرار می‌گیرند. خرابی این ستونها به علل مختلفی از قبیل کمبود مقاومت برشی، کمبود مقاومت خمشی و یا کمبود شکل‌پذیری اتفاق می‌افتد. [۱] Priestley & Seible ، [۲] Seible et al و [۳] Seible et al سه مود خرابی برای ستونها هنگام وقوع زلزله پیشنهاد نمودند که به شرح ذیل می‌باشد: الف) خرابی خمشی در ناحیه مفصل پلاستیک ب) خرابی برشی ج) خرابی به علت وصله نامناسب آرماتورهای طولی. همچنین مودهای خرابی دیگری نیز توسط دیگر محققین پیشنهاد شد که در ادامه به بررسی همه آنها پرداخته می‌شود [۴].

۱-۲-۱- خرابی خمشی در ناحیه مفصل پلاستیک

یکی از حالات متداول خرابی در ستونها هنگام وقوع زلزله، تخریب خمشی ستون در ناحیه مفصل پلاستیک است. در این حالت خرابی، اندرکنش نیروی محوری و لنگر خمشی در دو انتهای ستون به مقدار بحرانی رسیده و خرابی به وقوع می‌پیوندد. در این نقاط لنگر خمشی زیاد با نیروی محوری ترکیب شده و منجر به خرد شدن بتن در منطقه فشاری می‌شود که این اتفاق در هر دو وجه مقطع اتفاق می افتد. هر چه حجم خاموتها در این منطقه کمتر باشد، آسیب پذیری ستون در مقابل

این نوع خرابی افزایش می یابد. خرد شدن بتن منطقه فشاری باعث از بین رفتن پوشش روی میلگردها می‌شود، سپس هسته بتن منبسط شده و خرد می گردد. این اتفاق معمولاً با کمانش میلگردهای طولی در منطقه فشاری و از بین رفتن خاموتها همراه می‌باشد. شکست خاموتها و خرد شدن بتن باعث شکست ستون تحت بارهای محوری می‌شود. بنابراین این نوع خرابی، به علت کاهش سختی ستون منجر به عدم توانایی تحمل بارهای قائم شده و بسیار خطرناک است. نمونه‌ای از این نوع خرابی در شکل (۱-۱) مشاهده می‌شود. در این حالت خرابی، تغییر شکلهای غیرخطی خمشی زیادی در ستون بوجود می آید.

شکل (۱-۱): شکست خمشی در ستون [۵]

۱-۲-۲- خرابی برشی

یکی از بدترین و خطرناک ترین حالات خرابی در ستونهای بتنی، شکست برشی ستون است. در شکست‌های برشی، ابتدا در بتن ترکهای ضربدری شکل به وجود می‌آید. به علت پدید آمدن این ترکها، میلگردهای عرضی (خاموتها و تنگها) گسیخته شده یا باز می‌شوند و در ادامه میلگردهای طولی کمانش می‌کنند و المان بتنی به صورت بسیار ترد و با حالت انفجاری تخریب می‌شود. در شکل (۱-۲) نمونه‌ای از این نوع خرابی در ستون مشاهده می‌شود. علت اصلی این نوع خرابی فقدان میلگرد عرضی مناسب می‌باشد. همچنین اگر خاموتها و تنگها، دارای جزئیات اتصال مناسب نبوده و به طور

مناسب مهار نشوند، امکان این نوع خرابی وجود دارد. در مورد جزئیات اتصال نامناسب می‌توان به طول وصله ناکافی و تنگهای با مهار نامناسب در هسته بتن اشاره کرد[۶]. از آنجا که این نوع خرابی بسیار خطرناک است، باید از وقوع آن جلوگیری نمود. ستونهایی که جزئیات طراحی و اجرای میلگردهای عرضی آنها نامناسب می‌باشد، باید به طور مناسب تقویت گردند تا ظرفیت برشی آنها افزایش یافته و خرابی برشی در آنها بوجود نیاید.

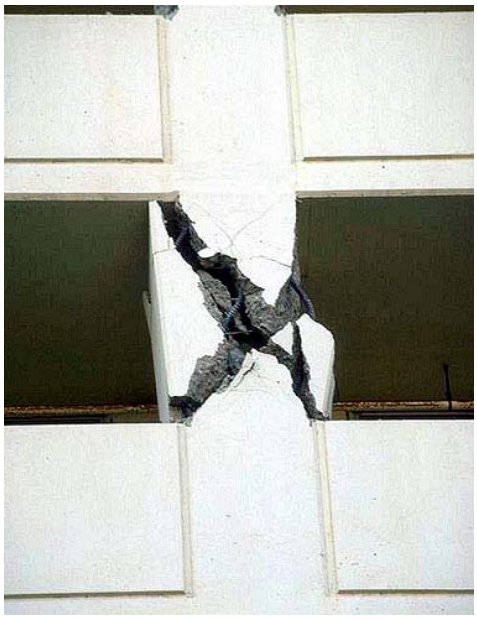
گاهی اوقات میانقاب‌هایی که از یک طرف یا دو طرف به ستونهای خارجی تکیه دارند نیز باعث شکست برشی ستون می‌شود. این نوع ستونها، ستون کوتاه نامیده می‌شوند. در شکل (۱-۳) یک نمونه ستون کوتاه مشاهده می‌گردد.

شکل (۱-۲): شکست برشی در ستون [۵]

۱-۲-۳- خرابی وصله‌های پوششی

گسیختگی وصله‌های پوششی یکی از انواع خرابیهای متداول در ستونها است. این حالت خرابی زمانی اتفاق می‌افتد که میلگردهای طولی در نزدیک انتهای ستون و در ناحیه لنگر خمشی حداکثر وصله شوند. در اکثر سازه‌ها میلگرد انتظار در روی فونداسیون قرار داده شده و میلگردهای طولی در ابتدای ستون به میلگردهای انتظار وصله می‌شوند. این وصله‌ها عموماً در ناحیه مفصل پلاستیک پای ستون‌ها و ناحیه حداکثر لنگر خمشی قرار دارند. هنگام وقوع زلزله و تحت نیروهای جانبی ناشی از

آن، ممکن است که وصله‌های پوششی جدا شوند. در این صورت ستون قابلیت جذب انرژی و شکل‌پذیری تحت تغییر شکلهای بزرگ را از دست می‌دهد. در شکل (۱-۴) نمونه از خرابی ستون به علت تخریب وصله پوششی مشاهده می‌شود.



شکل (۱-۳): شکست برشی در ستون کوتاه در زلزله سال ۱۹۹۴ Northridge

شکل (۱-۴): خرابی ستون به علت تخریب وصله پوششی [۵]

۱-۲-۴- خرابی برشی- خمشی به علت قطع میلگردهای طولی

علاوه بر خرابیهایی که به آنها اشاره شد، اگر میلگردهای طولی ستون در خارج از ناحیه مفصل پلاستیک به طور ناگهان قطع شوند، امکان یک نوع خرابی دیگر هم وجود دارد[۷]. در صورتیکه بدون در نظر گرفتن اثر انتقال نیروهای کششی ناشی از وقوع ترکهای قطری برشی، میلگردهای طولی

ستون بر اساس پوش منحنی لنگر خمشی در نقاط مختلف قطع شوند، امکان ایجاد ترک و خرابی ستون در نقاط قطع میلگردها بیشتر از انتهای ستون می‌باشد. در شکل (۱-۵) نمونه‌ای از خرابی برشی- خمشی در وسط ارتفاع ستون و در محل قطع میلگردهای طولی مشاهده می‌شود.

شکل (۱-۵): خرابی برشی- خمشی در وسط ارتفاع ستون و در محل قطع میلگردهای طولی [۵]

۱-۳- روشهای مقاوم سازی ستونهای بتنی مسلح

روشهای مقاوم سازی و تقویت ستونهای بتنی به دو دسته روشهای معمول و روشهای نوین دسته‌بندی می‌شود که در ادامه بطور مختصر به بررسی آنها پرداخته می‌شود.

۱-۳-۱- روشهای مقاوم سازی معمول

روشهای تقویت معمول با استفاده از مصالحی از قبیل بتن، گروت و فولاد انجام می گیرد. در حال حاضر از این روشها با توجه به مشکلاتی از قبیل افزایش وزن سازه، افزایش سختی سازه، صعوبت اجرا، عدم امکان عبور قطعات فولادی از داخل سقف و . . . استفاده نمی‌شود. تعدادی از روشهای متداول تقویت ستوها به شرح زیر می‌باشد:

۱-۳-۱-۱- جکت بتنی

از این روش در مواردی که ستون دچار آسیب دیدگی شدید و نقصان مقاومت شده باشد استفاده می‌شود [۴]. بر حسب قابلیت دسترسی به فضای اطراف ستون می توان یک، دو، سه و یا چهار طرف

آن را به وسیله بتن مسلح جکت نمود.

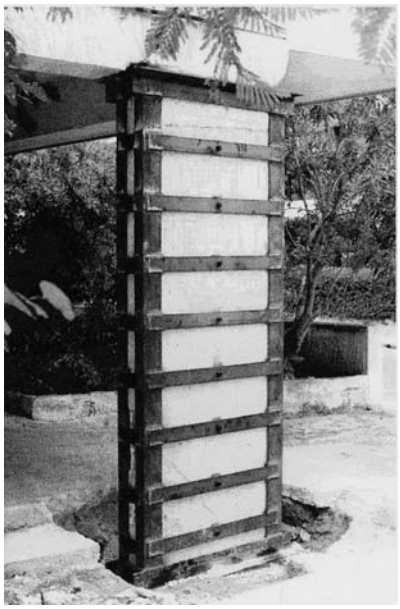
جکت نمودن ستون بدون این که میلگرد طولی تقویتی از سقف سازه عبور نماید فقط سبب افزایش موضعی مقاومت محوری و برشی ستون می‌شود و تأثیری روی مقاومت خمشی ستون و اتصال آن به تیر ندارد و ممکن است باعث شود که سازه رفتاری نا مطلوب در زلزله های بعدی بروز دهد. اکتفا کردن به جکت نمودن ستون بین طبقات، به بهبود پاسخ سازه در برابر زلزله کمکی نمی‌کند. مگر آنکه دیوار برشی نیز به سیستم اضافه شود [۸]. می توان با عبور دادن میلگرد طولی تقویتی از میان دال سقف و بتن ریزی در محل اتصال تیر به ستون مقاومت خمشی کافی در ستون ایجاد نمود. در شکل (۱-۶) نمونه ای جکت بتنی ستون مشاهده می‌گردد.

شکل (۱-۶): جکت چهار طرفه ستون [۸]

۱-۳-۱-۲- جکت فولادی

جکت فولادی عبارت است از چهار پروفیل نبشی که در طول چهار گوشه ستون قرار داده شده و توسط تسمه های عرضی به یکدیگر متصل می‌شوند. قطعات متصل کننده می توانند از میلگرد با حداقل قطر ۱۲ میلیمتر و یا تسمه فولادی با حداقل ابعاد ۴×۲۵ میلیمتر باشد که به نبشی‌ها جوش میگردند. حداقل ابعاد نبشی ۵×۵۰×۵۰ می‌باشد [۴]. از آنجا که اتصال کامل میان نبشی‌ها و سقف

جهت انتقال نیرو اهمیت دارد، از نبشی در گلوگاه اتصال ستون به سقف استفاده می گـردد. در شـکل (۱-۷) نمونه ای از جکت فولادی مشاهده می‌شود .



شکل (۱-۷) : جکت فولادی ستون بتن مسلح [۸]

۱-۳-۱-۳- ورق پوش فولادی

در این روش از ورق فولادی نازک جهت پوشش کامل ستون استفاده می‌شود. در این روش ابعـاد ستون تغییر چندانی نمی‌کند. ورقهای فولادی با ضخامت ۴ تا ۶ میلیمتر به طور پیوسـته بـه یکـدیگر جوش می‌شوند. فاصله ناچیزی که بین ورق و سطح ستون باقی می ماند توسط پر کننده هـایی نظیـر دوغاب سیمان بدون افت یا منبسط شونده و یا بتن پر میگردد[۴]. پوشش استوانه ای شکل به لحـاظ مهار تنش های محیطی ستون دارای عملکرد بهتری می‌باشد. پوشش های مستطیلی شکل می‌تواند با جوش دادن دو ورق L شکل فولادی به یکدیگر و یا جوش چهار تسمه قـائم بـه چهـار نبـشی ایجـاد گردد. شکل پذیری و مقاومت محوری ستون در این روش به طور موضعی افزایش می یابد، اما مقاومت خمشی سازه با این روش تغییر نمی‌کند، زیرا عبور دادن ورق ها از داخل سقف غیـر ممکـن اسـت. در شکل (۱-۸) نمونه ای از این روش تقویت مشاهده می‌گردد.

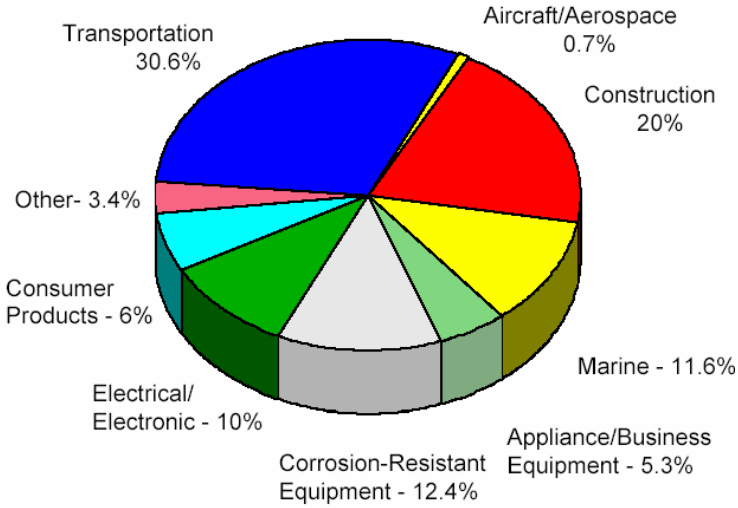
شکل (۱-۸): ورق پوش فولادی ستون بتن مسلح [۸]

۱-۳-۲- روشهای مقاوم سازی جدید

۱-۳-۲-۱- مقدمه

جدید ترین روش تقویت اجزای سازه های بتنی، استفاده از مواد کامپوزیت و الیاف تقویت شده پلیمری (FRP) می‌باشد. پیشینه استفاده از مواد کامپوزیت به دهه ۱۹۵۰ و در صنایع نظامی و هوا فضا بر می گردد. این مواد به دلایل مختلف از جمله وزن کم و مقاومت بسیار زیاد، گزینه ای مناسب برای صنعت مذکور به شمار می‌آیند. استفاده از این مواد برای مقاوم سازی و تقویت سازه‌ها از اواسط دهه ۸۰ میلادی در اروپا و ژاپن آغاز شد. اولین بار از این مواد برای دور پیچی ستونهای بتنی و پایه پلها جهت افزایش ظرفیت باربری آنها استفاده گردید و باتوجه به خصوصیات منحصر به فرد این مواد، در نقاط مختلف دنیا تحقیقات زیادی در خصوص استفاده از این مواد انجام گرفت. در اروپا، ژاپن، کانادا و آمریکا محققین زیادی بر روی نحوه استفاده از این مواد شروع به تحقیق نمودند و در این نقاط آیین نامه های مختلفی جهت استفاده از FRP برای مقاوم سازی تدوین گردید که از این جمله می توان به آیین نامه آمریکا [۱۳-۹]، آیین نامه اروپا [۱۴] ، آیین نامه کانادا [۱۵] و . . . اشاره کرد.

با توجه به خصوصیات این مواد، استفاده از FRP برای مقاوم سازی سازه‌ها در صنعت ساختمان روز به روز در حال افزایش است. بطوریکه هم اینک اکثر مواد کامپوزیت تولید شده در دنیا در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل (۱-۹) میزان مصرف مواد کامپوزیت جهت مقاوم سازی سازه‌ها در مقایسه با دیگر صنایع مصرفی مشاهده می‌گردد.

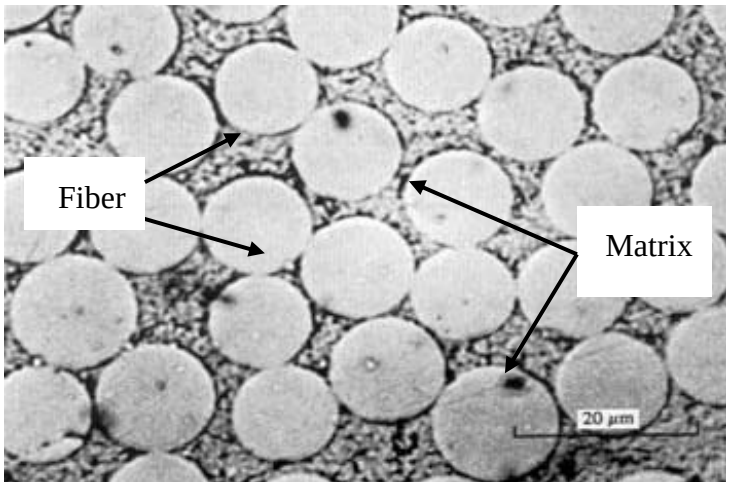


شکل (۱-۹): میزان مصرف مواد کامپوزیت در صنایع مختلف [۱۶]

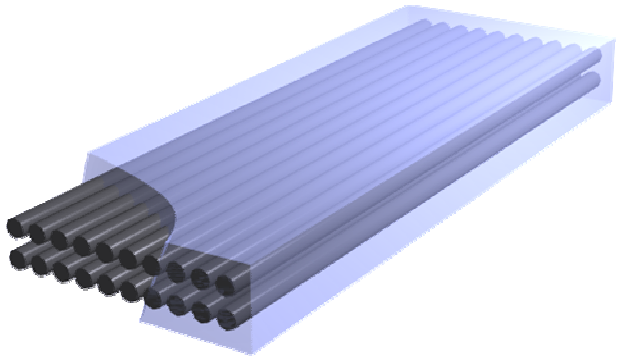
۱-۳-۱-۲- مشخصات مواد FRP

FRP به عنوان یک ماده کامپوزیت جهت تقویت سازه ها، از یک ماتریس و یک ماده تقویت کننده به صورت الیاف تشکیل شده است. ماتریس خود نیز ترکیبی از یک رزین (پلی استر، اپوکسی و ...) و مواد افزودنی مناسب است که مواد افزودنی جهت بهبود بخشیدن به خصوصیات رزین استفاده می‌شود. در کامپوزیت ها ماده تقویت کننده باعث ایجاد کیفیت مکانیکی بالا می گردد، در حالیکه ماتریس نقش انتقال بارهای خارجی به الیاف و محافظت از آنها در مقابل عوامل نامناسب محیطی را به عهده دارد. انتخاب نوع ماتریس و ماده تقویت کننده و نسبت آنها بستگی به تنشهای اعمال شده، مقاومت در برابر حرارت، مقاومت در مقابل خوردگی، نوع ویژگی های مورد تقاضا و نهایتاً قیمت مصالح دارد.

ماتریس ماده ای است که الیاف را به هم می‌چسباند، بارهای وارده را به الیاف منتقل کرده و از الیاف در مقابله عوامل فرسایشی محیط محافظت می‌کند. رزین های اپوکسی، پلی استر و وینیل استر از ماتریس های متداولی هستند که با FRP مورد استفاده قرار می‌گیرند. خصوصیات FRP تا حد زیادی بستگی به مشخصات ماتریس دارد. در شکل (۱-۱۰) تصویری میکروسکوپی از نحوه اتصال الیاف در ماتریس و در شکل (۱-۱۱) نحوه قرار گیری الیاف در ماتریس مشاهده می‌شود.



شکل (۱-۱۰): تصویری میکروسکوپی از نحوه قرار گیری الیاف در داخل ماتریس [۱۶]



شکل (۱-۱۱): نحوه قرار گیری الیاف در داخل ماتریس [۱۶]

با توجه به نقش مهم زرین ها در عملکرد ماده کامپوزیت، این مواد باید قابلیت تغییر شکل کافی و سازگاری مناسب با الیاف داشته باشند. به عبارت دیگر، رزین ها باید به گونه ای باشند که از یک طرف جرم حجمی اندک داشته و از طرف دیگر بتوانند ویژگیهای مکانیکی و فیزیکی مناسب را تامین کنند. خصوصیات شیمیایی و فیزیکی رزین ها بسیار پیچیده بوده و خارج از بحث ما می‌باشد و ما در اینجا تنها به معرفی متداول ترین نوع رزین که برای چسباندن FRP به سطح بتن مورد استفاده قرار میگیرد اکتفا می کنیم .

معروف‌ترین و متداول ترین رزین که در اکثر موارد برای چسباندن مواد FRP برروی سطح بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد، رزین اپوکسی می‌باشد. این چسب، ماده ای دو مولفه ای بوده که از آمیختن رزین اپوکسی و ماده سخت کننده[۱] ساخته می‌شود، به طوریکه بعد از ترکیب رزین و سخت

[۱] Hardner

کننده یک واکنش شیمیایی شروع شده و در نهایت چسب تولید می‌شود. بسته به نیاز ماتریس می‌تواند شامل مواد مختلفی باشد. رزین اپوکسی در حالت عادی چسبندگی ندارد و تنها زمانی که با ماده سخت کننده ترکیب شد شروع به گیرش و سفت شدن می‌کند. زمان گیرش بسته به مشخصات چسب می‌تواند بین چند ثانیه تا چند سال متغیر باشد.

الیاف عامل اصلی مقاومت و سختی FRP هستند. این مواد دارای طول بسیار زیاد و قطر حدود ۵ تا ۲۰ میکرو متر می‌باشند. الیاف در امتداد محور طولی خود قابلیت تحمل تنشهای کششی بسیار زیادی را دارند، بطوری که به دلیل همین ظرفیت کششی فوق العاده، از FRP جهت تقویت سازه های بتنی استفاده می گردد.

به طور کلی از سه دسته الیاف جهت مقاوم سازی اجزای بتنی استفاده می گردد که عبارتند از الیاف کربن[۲]، الیاف شیشه[۳] و الیاف آرامید[۴]. خصوصیات فیزیکی و مکانیکی الیاف فوق با هم متفاوت می‌باشد بطوریکه با توجه به شرایط از الیاف مناسب استفاده می گردد.

الیاف شیشه به سه دسته الیاف E-glass، الیاف S-glass و الیاف AR-glas تقسیم بندی می‌شوند. الیافE-glass شامل مقادیر زیادی اسید بوریک و آلومینیوم هستند و در نتیجه در مقابل حمله مواد قلیایی آسیب پذیر هستند، لذا این الیاف را باید در مناطقی که خطر قلیایی شدن وجود ندارد استفاده نمود. الیاف S-glass از الیاف E-glass مقاوم تر و سخت تر هستند ولی باز هم در محیط های قلیایی آسیب پذیر هستند. برای افزایش مقاومت الیاف شیشه در محیط های قلیایی، به الیاف شیشه نوع E-glass مقدار زیادی فلز زیرکونیوم اضافه می کنند و به این ترتیب مقاومت الیاف شیشه در مقابل حمله مواد قلیایی بسیار زیاد می‌شود. مشخصات مکانیکی E-glass و AR-glass کاملا مشابه هم است. مهمترین خصوصیت الیاف شیشه قیمت بسیار پایین این الیاف می‌باشد.

الیاف آرامید دارای سختی و مقاومت بیشتری نسبت به الیاف شیشه هستند. این الیاف دارای

---

[۲] Carbon Fiber
[۳] Glass Fiber
[۴] Aramid fiber

قابلیت جذب انرژی زیاد هنگام گسیختگی بوده و قابلیت تحمل آثار ناشی از ضربه و انفجار را دارند. الیاف آرامید در کشش رفتار خطی از خود نشان می دهند، اما در فشار ماهیت غیر خطی داشته و شکل پذیر می باشند. همچنین در برابر بارهای خستگی نیز بسیار مقاوم هستند. در مقاوم سازی اجزای سازه‌ای، به علت سختی زیاد از این الیاف برای مقاوم سازی ستونهای مستطیل شکل استفاده می‌شود. همچنین این مواد قابلیت پیش کشیده کردن را نیز دارند.

الیاف کربن از مشتقات نفت و زغال سنگ هستند و با توجه به نحوه تولید و شکل و جهت کریستال های آنها دارای مشخصات متفاوتی می باشند. سختی و مقاومت این الیاف نسبت به الیاف شیشه و آرامید بسیار بالا می باشند. این الیاف مقاومت زیادی در برابر بارهای خستگی و حملات شیمیایی داشته و هیچگاه دچار خوردگی نمی‌شوند. همچنین مقاومت زیادی در برابر سیکلهای ذوب و انجماد از خود نشان می دهند. در جدول (۱-۱) مشخصات تیپ های مختلف FRP معرفی شده است. در شکل (۱-۱۲) منحنی تنش-کرنش انواع FRP درمقایسه با فولاد نشان داده شده است.

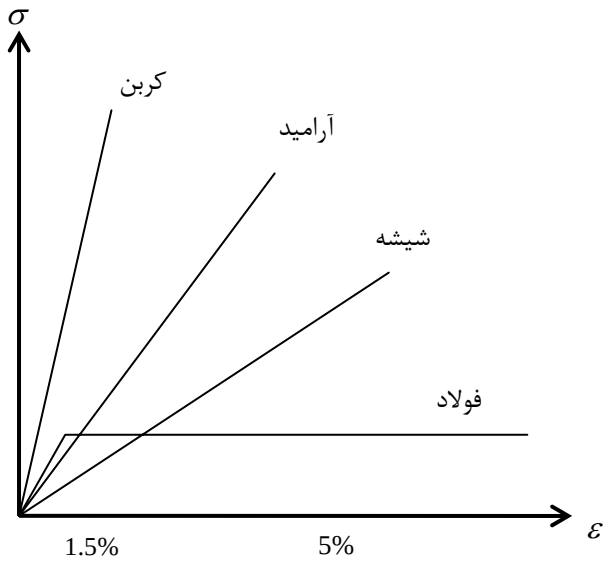
همانطور از شکل (۱-۱۲) مشخص است الیاف مختلف FRP بر خلاف فولاد که دارای رفتار الاستو پلاستیک می‌باشد، تا لحظه گسیختگی رفتار کاملا الاستیک از خود نشان می دهند. با مراجعه به شکل (۱-۱۲) مشاهده می‌شود که الیاف کربن دارای مدول ارتجاعی و مقاومت بیشتری نسبت به فولاد هستند بطوریکه مقاومت کششی الیاف کربن بیش از چند برابر تنش تسلیم فولاد می‌باشد. الیاف شیشه و آرامید نیز مقاومت به مراتب بیشتری نسبت به فولاد دارند. همچنین مشخص می گردد که میزان کرنش حد گسیختگی در انواع مختلف FRP بین 1.5 تا 5 درصد در نوسان است که این مقدار بسیار بیشتر از کرنش حد تسلیم فولاد می‌باشد.

یکی دیگر از خصوصیات بسیار مهم الیاف کامپوزیت در مقایسه با فولاد ، وزن بسیار کم این مواد می‌باشد، بطوریکه وزن این مواد حدود یک چهارم وزن فولاد می‌باشد.

مواد کامپوزیت که امروزه جهت مقاوم سازی مورد استفاده قرارمی گیرند، بسته به نحوه استفاده از الیاف و ماتریس به طور کلی به چند دسته تقسیم بندی می‌شوند.

جدول (۱-۱) : مشخصات کلی الیاف FRP [۵]

نوع ماده کمپوزیت	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	کرنش کششی نهایی (درصد)
کربن با مقاومت زیاد	۲۱۵-۲۳۵	۳۵۰۰-۴۸۰۰	1.4-2.0
کربن با مقاومت بسیار زیاد	۲۱۵-۲۳۵	۳۵۰۰-۶۰۰۰	1.5-2.3
کربن با مدول زیاد	۳۰۰-۵۰۰	۲۵۰۰-۳۱۰۰	0.5-0.9
کربن با مدول بسیار زیاد	۵۰۰-۷۰۰	۲۱۰۰-۲۴۰۰	0.2-0.4
شیشه (E)	۷۰	۱۹۰۰-۳۰۰۰	3.0-4.5
شیشه (S)	۸۵-۹۰	۳۵۰۰-۴۸۰۰	4.3-5.0
آرامید با مدول کم	۷۰-۸۰	۳۵۰۰-۴۱۰۰	2.5-3.5



شکل (۱-۱۲): منحنی تنش - کرنش الیاف کامپوزیت و فولاد [۵]

الف : ورقه های پیش ساخته[۵]

ورقه های پیش ساخته FRP با استفاده از روش اکستروژن تهیه می گردند. در این روش ابتدا الیاف کربن با رزین اپوکسی آغشته شده و بوسیله حرارت خشک می‌شوند. در این حالت، الیاف کربن در داخل ماتریسی از رزین اپوکسی قرار می گیرند.

ب: الیاف یک جهته[۶]

در این مصالح، الیاف بصورت فشرده در کنار هم قرار می گیرند و دارای ظاهری همانند پارچه

---

[۵] Laminate

[۶] Unidirectional Sheet

می‌باشند، بطوریکه جهت الیاف در جهت طولی پارچه بوده و مقاومت و مدول الاستیسته زیادی در این راستا از خود نشان می دهند. این مصالح جهت افزایش مقاومت و ظرفیت اجرای سازه بسیار مناسب هستند.

ج: الیاف بافته شده دو جهته[۷]

در این مصالح، الیاف بکار رفته شده در دو جهت قرار گرفته و مثل پارچه به هم بافته می‌شوند. این مواد جهت تقویت دیوار های آجری و سازه های ساخته شده از مصالح بنایی غیر مسلح بسیار مفید هستند.

د: میلگردهای FRP[۸]

این مصالح عموما از الیاف کربن و شیشه طی یکسری عملیات پیچیده تهیه می‌شوند. از این میلگردها می توان به عنوان میلگرد اصلی در طراحی سازه های بتن مسلح استفاده نمود. اما کاربرد اصلی این مصالح در مقاوم سازی و تقویت اجزای سازه های بتنی است. از این مواد به عنوان NSM *(Near Surfac Mounted)* نام برده می‌شود. برای استفاده از این مواد، ابتدا یک شیار بر روی سطح ایجاد شده و سپس این اجزا بوسیله خمیر کاشت در داخل شیار قرار می گیرند. استفاده از NSM در تقویت اعضای بتنی در چند سال اخیر از رشد چشمگیری برخوردار بوده است. نصب آسان، عدم نیاز به آماده سازی زیاد سطح، سرعت کار زیاد، امکان استفاده در مناطق دارای لنگر منفی و . . . از مزایای این روش است.

۱-۴- معرفی موضوع رساله

در بخش ۱-۳ روشهای قدیمی و جدید تقویت ستونهای بتنی بررسی گردید و مشخص شد که استفاده از روشهای قدیمی باعث افزایش وزن، ابعاد و سختی ستون میگردد و با این کار به علت افزایش سختی المان نیروهای وارده به المان افزایش یافته و همچنین فونداسیون سازه نیاز به تقویت

---

[۷] Bidirectional Sheet
[۸] Rebar

پیدا می‌کند. لذا استفاده از این روشها چندان عملی نبوده و مشکلات زیادی به همراه دارد.

همانطور که دربخش ۱-۳ به آن اشاره شد، در چند سال اخیر استفاده از مواد کامپوزیت در مهندسی عمران و بالاخص تقویت و بهسازی لرزه‌ای سازه های موجود رشد چشمگیری داشته است. در چند سال گذشته تحقیقات زیادی در زمینه تقویت ستونهای بتن مسلح با استفاده از FRP انجام شده است که در فصل ۲ به طور خلاصه به نتایج تعدادی از این تحقیقات اشاره می‌شود.

همانطور که در فصل ۲ مشاهده می‌گردد، اکثر تحقیقات انجام شده بر روی تقویت ستونها با استفاده از FRP، در زمینه تاثیر دورپیچی ستونها با FRP (به گونه ای که جهت طولی الیاف عمود بر محور طولی ستون است) بر روی مقاومت برشی، ظرفیت باربری محوری و شکل پذیری ستونها بوده است. با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده در صورت استفاده از دورپیچی به علت تامین محصورشدگی[۹]، تنها مقاومت برشی، محوری و شکل پذیری ستون افزایش یافته و این روش تاثیر چندانی بر روی افزایش ظرفیت خمشی ستون ندارد.

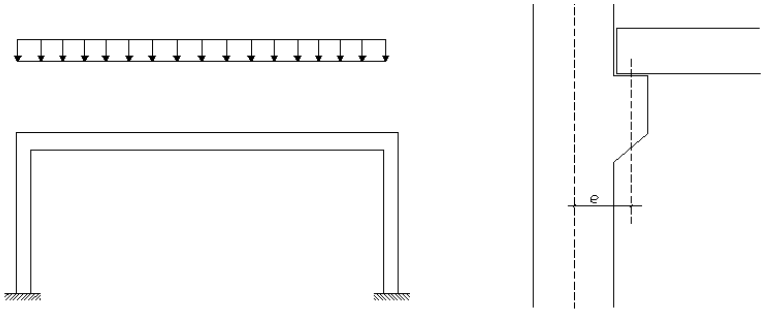
با توجه به این که تعداد زیادی از ستونها در سازه های قدیمی برای بارهای لرزه‌ای طراحی نشده‌اند، لذا دچار کمبود ظرفیت خمشی می باشند. همچنین بسیاری از ستونها دارای میلگرد ساده می‌باشند، لذا این ستونها نمی توانند به مقاومت خمشی مورد انتظار برسند و در آنها پدیده لغزش میلگرد رخ می دهد. همچنین با توجه به این موضوع که در پایه بسیاری از پلها، به علت شرایط محیطی نامناسب محیطی، میلگردهای طولی ستون دچار خوردگی شده و بالتبع ظرفیت خمشی ستون تا حد بسیار زیادی کاهش یافته است، لزوم استفاده از روشها، تکنولوژیها و مصالح نوین در ارتقای ظرفیت خمشی ستونها احساس می‌شود. لذا مبنای این رساله، بررسی و امکان سنجی افزایش ظرفیت خمشی ستونها با استفاده از میلگردهای NSM می‌باشد.

یک ستون بتن مسلح در حالات مختلفی می‌تواند تحت اثر توام نیروی محوری و لنگر خمشی قرار گیرد. در قابهای بتن مسلح، به علت یکپارچگی اتصال بین تیر و ستون، لنگرهای انتهای تیرها در

---

[۹] Confinement

ستونهای متصل به آن توزیع می‌شود. در شکل (۱-۱۳- الف) علاوه بر نیروی محوری، لنگر خمشی ناشی از بارگذاری تیر نیز وارد ستون می‌شود. اگر اتصال تیر به ستون، صلب و یکپارچه نباشد، به علت وجود نیروهای خارج از مرکز بر محور ستون نیز اثر توام نیروی محوری و لنگر خمشی وجود خواهد داشت (شکل ۱-۱۳- ب).



(الف) (ب)

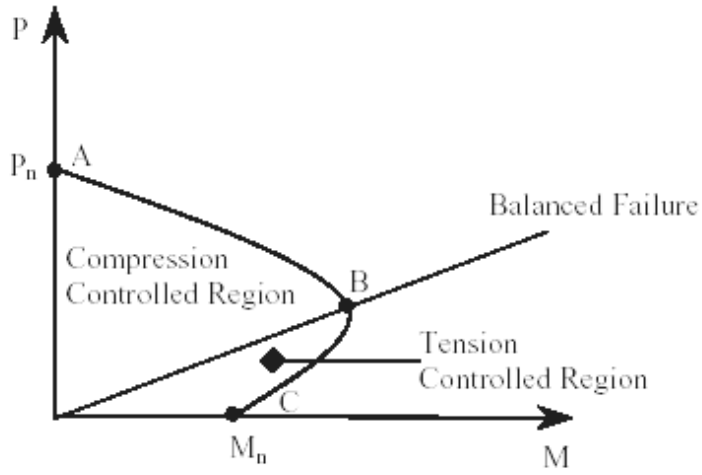
شکل (۱-۱۳): ستونهای بتن مسلح تحت اثر همزمان نیروی محوری و لنگر خمشی

با توجه به مطالب فوق در سازه های بتن مسلح، ستونها تقریبا در اکثر مواقع تحت اثر همزمان نیروی محوری و لنگر خمشی قرار دارند. با توجه به‌اندرکنش بین نیروی محوری و لنگر خمشی، حالات گوناگونی در ترکیب آنها می توان مشاهده نمود که در حد بالای آن لنگر خمشی صفر و حد پایین آن نیروی محوری صفر قرار دارد. مابین این دو حالت حدی، بی نهایت ترکیب مختلف از این دو تلاش می توان یافت که منجر به خرابی ستون می گردند (شکل (۱-۱۴)). بدون توجه به مسئله کمانش، یعنی وقتی که فقط منظور مطالعه مقاومت مقطع از نظر شکست در مصالح باشد، اثر متقابل (اندرکنش) نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی را می توان با استفاده از شکل (۱-۱۴) مورد مطالعه قرار داد. در چنین موردی دو ناحیه خرابی در ستون می توان تشخیص داد:

الف: تمام و یا قسمت اعظم مقطع تحت تنشهای فشاری می‌باشد، بطوریکه قبل از جاری شدن فولاد کششی، کرنش در بتن به مقدار حداکثر خود (۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۳۵) می رسد. به این ناحیه اصطلاحا *ناحیه کنترل فشار*[۱۰] می‌گویند.

[۱۰] Compression Controlled region

ب: قسمت اعظم مقطع تحت کشش قرار دارد، به طوریکه وقتی کرنش فشاری در بتن به مقدار حداکثر خود (۰/۰۰۳ تا ۰/۰۰۳۵) می رسد، کرنش کششی در میلگردها بزرگتر از تغییر شکل نسبی نقطه جاری شدن (تسلیم) می‌باشد. این ناحیه *ناحیه کنترل کشش*[۱۱] نامیده می‌شود.



شکل (۱-۱۴): نمودار اندرکش نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی حول یک محور

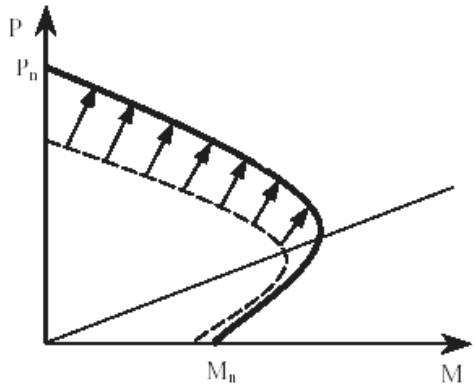
در شکل (۱-۱۴) خطوط شعاعی که از مختصات رسم می‌شوند نشان دهنده نسبت های ثابت لنگرخمشی به نیروی محوری می باشند. به عبارت دیگر این خطوط نشان دهنده برون محوری نیروی محوری از مرکز پلاستیک مقطع می باشند.

از لحاظ استاتیکی، ترکیب نیروی محوری و لنگر خمشی معادل یک نیروی محوری تنها می‌باشد که تحت برون محوری e نسبت به مرکز پلاستیک وارد می‌شود. در نمودار اندرکنش شکل (۱-۱۴) محور قائم نشان دهنده $e = 0$ و محور افقی نشان دهنده $e = \infty$ می‌باشد. مفهوم جایگزین نمودن نیروی محوری و لنگر خمشی با یک نیروی محوری برون محور، روش عملی برای تحلیل و طراحی ستونهای بتن مسلح می‌باشد.

همانطور که در فصل ۲ اشاره می‌شود، دورپیچ کردن ستونهای بتن مسلح با استفاده از FRP به علت تامین محصورشدگی کافی، با افزایش کرنش نهایی و جلوگیری از خرد شدگی بتن و کمانش

[۱۱] Tension Controlled region

میلگردهای طولی، باعث افزایش چشمگیر ظرفیت باربری محوری ستونهای بتنی می گردد. در شکل (۱-۱۵) تاثیر دورپیچ FRP برروی منحنی اندرکنش یک ستون بتنی مشاهده می گردد. منحنی خط چین، منحنی اندرکنش ستون قبل از تقویت می‌باشد. با توجه به شکل مشاهده می گردد که دورپیچ کردن ستونهای بتنی با FRP به گونه ای که جهت اصلی الیاف در جهت عمود بر محور طولی ستون باشد تنها در"ناحیه کنترل فشار" منحنی اندرکنش تاثیر گذاشته و تاثیر چندانی بر بهبود رفتار "ناحیه کنترل کشش" ندارد.



شکل (۱-۱۵): افزایش مقاومت در ناحیه کنترل فشار در صورت استفاده از FRP بصورت دورپیچ

برای افزایش ظرفیت خمشی ستونها و یا به عبارت دیگر افزایش ظرفیت " ناحیه کنترل کشش" باید الیاف FRP به گونه ای قرار گیرند که جهت طولی آنها در جهت محور ستون قرار گیرد. در صورتیکه از الیاف FRP بصورت پارچه برای افزایش ظرفیت خمشی ستون استفاده گردد، از آنجا که مهار الیاف FRP به این صورت در دو انتهای ستون بسیار مشکل است، عملا استفاده از الیاف بصورت پارچه جهت افزایش ظرفیت خمشی امکان پذیر نمی‌باشد. برای این کار بهتر است که از FRP بصورتهای دیگر مثل میلگرد یا تسمه (NSM) استفاده شود.

با توجه به این موضوع که هنوز تحقیقات چندانی در زمینه افزایش ظرفیت خمشی ستونهای بتنی با FRP به طوریکه جهت اصلی الیاف در جهت محور طولی ستون باشد، صورت نگرفته است، نکات مبهم زیادی در این زمینه وجود دارد که هدف از انجام این رساله تحقیقاتی، بررسی این موضوع می‌باشد.اهمیت این موضوع تا حدی است که آیین نامه[10-9] ACI 440-2R، این موضوع را به عنوان

یکی از مواردی که نیاز به تحقیقات زیادی دارد مطرح نموده است.

علیرغم تحقیقات بسیار زیادی که در زمینه تقویت ستونهای بتنی با استفاده از FRP صورت گرفته است، متاسفانه تاکنون هیچگونه تحقیقات منسجم و هدفداری در زمینه افزایش ظرفیت خمشی ستونهای بتنی با FRP بگونه ای که جهت اصلی الیاف FRP موازی محور ستون و در جهت بارهای محوری باشد انجام نگرفته است، بگونه ای که با مراجعه به آیین نامه های مختلفی که در زمینه استفاده از FRP در سازه در دنیا وجود دارد [۱۵-۹] مشاهده می گردد که ضوابط طراحی برای افزایش ظرفیت خمشی ستونها در ناحیه کشش کنترل در هیچ کدام از آیین نامه های فوق الذکر مطرح نشده و آیین های مذکور تنها افزایش ظرفیت باربری محوری از طریق تامین محصورشدگی و افزایش شکل پذیری ستونها را مدنظر قرار داده و افزایش ظرفیت خمشی در آیین نامه ها تنها به تیرها محدود شده است. لذا با توجه به این نکته و اهمیت این مسئله، موضوع این رساله بصورت زیر انتخاب گردیده است:

((افزایش ظرفیت خمشی ستونهای بتن مسلح با میلگردهای

مدفون در سطح (NSM) و با استفاده از FRP))

۱-۵- مروری بر مطالب پایان نامه

در فصل دوم مروری بر تحقیقات انجام شده در زمینه تقویت اجزای سازه های بتنی با FRP در حالات مختلف انجام می گیرد. در این بخش خلاصه ای از تحقیقات انجام شده در زمینه استفاده از مواد کامپوزیت جهت افزایش ظرفیت خمشی تیرهای بتن مسلح، افزایش ظرفیت باربری محوری ستونهای بتنی و بهبود منحنی اندر کنش نیروی محوری- لنگر خمشی ارائه می‌گردد. در این فصل مواردی که در تحقیقات انجام شده تاکنون مورد توجه قرار نگرفته است روشن می‌گردد.

در فصل سوم برنامه آزمایشات انجام گرفته توضیح داده می‌شود. در این فصل ابتدا توضیحی در خصوص نحوه ساخت نمونه ها و مشخصات مصالح بکار رفته در آن ارائه می‌شود و سپس نوع