



وزارت علوم، تحقیقات و فن آوری
دانشگاه علوم و فنون مازندران

پایان نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
مهندسی عمران - سازه

موضوع

ارزیابی عددی و المان محدود ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP

نگارش

سعیدسرفلاح

استاد راهنما

دکتر مسعود سلطانی محمدی

استاد مشاور

دکتر مرتضی اسکندری قادی

زمستان ۱۳۸۵

چکیده

چسباندن موضعی FRP روی سطح اعضای سازه ای، به عنوان روشی جدید در مقاوم سازی سازه ها مورد استفاده قرار گرفته است. این روش مقاوم سازی باعث افزایش مقاومت سازه های آسیب دیده و کلاً افزایش مقاومت سازه های بتن مسلح می گردد.

مقاومت قابل توجه، نسبت سختی به وزن مصالح، جلوگیری کردن از خوردگی و فرسایش سازه و از نظر اقتصادی کاهش زمان کار از مزایای استفاده از FRP است.

عموماً مودهای گسیختگی برشی در تیرهای تقویت شده با FRP با کنده شدن پوشش بتن و جداشدگی موضعی ورق FRP همراه است. بیشتر تحقیقات صورت گرفته در این رابطه به تامین طول مهارى ورق FRP چسبیده شده روی تیر بتن مسلح و تعیین تنش موثر ورق FRP، به منظور جلوگیری از جداشدگی موضعی ورق FRP اختصاص دارد. ولی نتایج تحقیقات عموماً نشان از پراکندگی بالای نتایج تحلیلی نسبت به نتایج آزمایشگاهی دارد و لزوم انجام تحقیق بیشتر در این زمینه احساس می شود. در این تحقیق ضمن بررسی تحلیلی رفتار تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP، روابط ساده ای در برآورد ظرفیت برشی این اعضا ارائه می شود.

مقدمه

شکستهای برشی و خمشی تیرها دو شکل اصلی و متداول شکست تیرهای بتن مسلح تقویت نشده می باشد. بدلیل شکل پذیری بیشتر تیرها در وضعیت شکست خمشی نسبت به شکست برشی، حالت شکست خمشی مطلوب می باشد. زیرا شکست شکل پذیر، هشدار دهنده بوده و اجازه باز توزیع تنشها را به سازه می دهد ولی شکست ترد ناگهانی و فاجعه آمیز است.

شکل پذیری تیر تقویت شده با ورق های FRP در وضعیت خمشی، نسبت به تیر بتن مسلح معمولی کمتر است ولی شکل پذیری بیشتری نسبت به شکست برشی دارد. در نتیجه مقاومت برشی تیر تقویت شده بایستی بیشتر از مقاومت خمشی باشد. هنگامی که مقاومت برشی تیر بتن مسلح معمولی کافی نباشد و یا چنانچه بعد از تقویت خمشی، ظرفیت برشی آن، کمتر از ظرفیت خمشی گردد، تقویت برشی تیر لازم است. روش های مختلفی برای مقاوم سازی برشی تیرها وجود دارد ولی امروزه تقویت برشی با استفاده از نوارها و ورق های FRP مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. علاوه بر مقاومت مطلوب در برابر خوردگی و نسبت مقاومت به وزن زیاد ورق های FRP، این ورق ها از شکل پذیری مطلوبی در مقاطع مختلف برخوردار بوده و تقویت برشی را در موارد مختلف بسیار آسان می سازد.

اما در مقایسه با آزمایش های انجام شده در زمینه تقویت خمشی تیرهای تقویت شده با ورق های FRP، مطالعات صورت گرفته در خصوص مقاومت برشی اعضای بتنی تقویت شده با FRP کافی نبوده و لازم است تحقیقات بیشتری در این زمینه انجام شود.

فصل اول پایان نامه به بهسازی سازه های بتن مسلح و ضرورت تقویت سازه های آسیب دیده می پردازد. همچنین انتخاب روش بهسازی نیز مد نظر است. در فصل دوم به تاریخچه ساخت و استفاده از مواد پلیمری مرکب، انواع آن، مزایا و معایب هرکدام و ساخت رزین ها و اپوکسی ها اشاره می کند.

فصل سوم تقویت برشی تیرهای بتن مسلح با ورقهای FRP، روشهای تقویت برشی، مودهای شکست برشی تیرهای تقویت شده با FRP را بررسی می کند. فصل چهارم به روابط پیشنهادی و آیین نامه ای ارائه شده در مورد ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP اختصاص دارد. فصل پنجم به مدل سازی المانهای بتن مسلح براساس مدل سازی گسترش ترک می پردازد. در این فصل مدل های رفتاری بتن قبل و بعد از بوجود آمدن ترک، مدل سازی بتن تحت تنش کششی، فشاری و برشی، روابط داخلی میان مدل های رفتاری، مدل سازی میلگردهای مسلح کننده بتن و مقایسه آنالیزهای برنامه WCOMD-SJ با نتایج آزمایشگاهی آورده شده است.

فصل ششم به بررسی و مقایسه نمونه های آزمایشگاهی با نتایج تحلیلی با برنامه WCOMD-SJ و اعتبار سنجی نتایج پرداخته شده است. در فصل هفتم نیز مطالعات پارامتریک اعم از تغییرات ضخامت، سختی، نسبت دهانه به عمق (a/d)، مقدار خاموت گذاری و راستای الیاف FRP مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تاثیر چسبندگی ورق FRP در تنش موثر و ظرفیت برشی تیر و تاثیر طول مهاریه پوشش FRP در ظرفیت برشی نیز مد نظر است. فصل هشتم به پیشنهاد روش ساده و عملی در ارزیابی ظرفیت برشی تیر های تقویت شده با FRP و مقایسه با نتایج دیگر محققین اختصاص می یابد. در پایان نیز نتیجه گیری از مطالعه حاضر و پیشنهاداتی برای ادامه مطالعات در این زمینه در فصل نهم ارائه گردیده است.

فهرست

| | |
|----|---|
| ۱ | فصل اول |
| ۱ | بهسازی سازه های بتن مسلح |
| ۱ | (۱-۱) مقدمه |
| ۲ | (۲-۱) دلایل ترمیم و تقویت |
| ۲ | (۳-۱) روشهای ترمیم و تقویت اجزای بتن مسلح |
| ۳ | (۱-۳-۱) ستونها |
| ۳ | (۱-۱-۳-۱) مرمت موضعی |
| ۵ | (۲-۱-۳-۱) ژاکتهای بتن مسلح |
| ۶ | (۳-۱-۳-۱) قفس های ساخته شده از نیمرخ فولادی |
| ۷ | (۴-۱-۳-۱) ژاکتهای فولادی یا FRP |
| ۱۰ | (۲-۳-۱) تیرها |
| ۱۰ | (۱-۲-۳-۱) مرمت موضعی |
| ۱۰ | (۲-۲-۳-۱) ژاکتهای بتن مسلح |
| ۱۳ | (۳-۲-۳-۱) چسباندن ورقهای فولادی یا FRP |
| ۱۳ | (۱-۳-۲-۳-۱) استفاده از ورقهای فولادی خارجی برای مقاوم سازی برشی تیرهای بتن مسلح |
| ۱۳ | (۳-۳-۱) دالهای بتن مسلح |
| ۱۴ | (۱-۳-۳-۱) مرمت موضعی |
| ۱۴ | (۲-۳-۳-۱) افزایش ضخامت یا آرماتورهای یک دال |
| ۱۵ | (۴-۱) انتخاب روش ترمیم و تقویت |
| ۱۶ | فصل دوم |
| ۱۶ | مواد پلیمری مرکب |
| ۱۶ | (۱-۲) مقدمه |
| ۱۷ | (۱-۱-۲) تاریخچه استفاده از مواد مرکب پلیمری |
| ۱۷ | (۲-۲) انواع الیاف |
| ۱۹ | (۱-۲-۲) الیاف شیشه |
| ۲۰ | (۱-۱-۲-۲) انواع مختلف الیاف شیشه |
| ۲۰ | (۲-۱-۲-۲) عوامل موثر براستحکام الیاف شیشه |
| ۲۲ | (۲-۲-۲) الیاف کربن |
| ۲۳ | (۳-۲-۲) الیاف آرامید |
| ۲۳ | (۱-۳-۲-۲) خواص الیاف آرامید |
| ۲۵ | (۳-۲) ماتریسهای مورد استفاده در مواد مرکب |

| | |
|----|--|
| ۲۶ | ۱-۳-۲) ماتریسهای پلیمری مهم |
| ۲۷ | ۱-۳-۲) رزینهای پلی استر |
| ۲۸ | ۱-۳-۲) پخت رزینهای پلی استر |
| ۲۸ | ۲-۱-۳-۲) کاتالیزورهای رزین پلی استر |
| ۲۹ | ۳-۱-۳-۲) شتاب دهنده های رزین پلی استر |
| ۲۹ | ۴-۱-۳-۲) عوامل موثر بر زمان ژل شدن |
| ۳۰ | ۲-۱-۳-۲) رزینهای وینیل استر |
| ۳۰ | ۱-۲-۳-۲) سیستم های پخت رزینهای وینیل استر |
| ۳۰ | ۲-۲-۳-۲) خواص و کاربرد رزینهای وینیل استر |
| ۳۱ | ۳-۱-۳-۲) رزینهای اپوکسی |
| ۳۲ | ۱-۳-۱-۳-۲) عوامل پخت رزینهای اپوکسی |
| ۳۲ | ۲-۳-۱-۳-۲) مزایا و معایب رزینهای اپوکسی نسبت به رزینهای پلی استر |
| ۳۴ | فصل سوم |
| ۳۴ | تقویت برشی تیرهای بتن مسلح با ورقهای FRP |
| ۳۴ | ۱-۳) مقدمه |
| ۳۵ | ۲-۳) روشهای گوناگون تقویت برشی و نحوه انتخاب آن |
| ۳۵ | ۱-۲-۳) شکلهای کلی تقویت برشی |
| ۳۸ | ۲-۲-۳) انتخاب روش تقویتی |
| ۳۹ | ۳-۳) موده های شکست برشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با ورقهای FRP |
| ۳۹ | ۱-۳-۳) کلیات |
| ۴۰ | ۲-۳-۳) شکست برشی همراه با پارگی ورق FRP |
| ۴۱ | ۳-۳-۳) شکست برشی بدون پارگی ورق FRP |
| ۴۱ | ۴-۳-۳) شکست برشی ناشی از جدائی ورق FRP |
| ۴۲ | ۵-۳-۳) شکست در مجاورت بست های مکانیکی |
| ۴۳ | فصل چهارم |
| ۴۳ | محاسبه مقاومت برشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP |
| ۴۳ | ۱-۴) مقدمه |
| ۴۴ | ۲-۴) ظرفیت برشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP |
| ۴۵ | ۳-۴) مدل های چسبیدگی |
| ۴۶ | ۴-۴) روش برش اصطکاک اصلاح شده |
| ۴۸ | ۵-۴) روش میدان فشاری اصلاح شده (MCFT) |
| ۴۸ | ۶-۴) میزان شرکت پذیری FRP در مقاومت برش اعضا |
| ۴۸ | ۱-۶-۴) رابطه پیشنهادی چلال |

| | |
|----|--|
| ۴۹ | روابط پیشنهادی خلیفه و همکاران (۲-۶-۴) |
| ۵۰ | روش آئین نامه کانادا (CSA-S806) (۳-۶-۴) |
| ۵۰ | تحقیقات چن و تنگ (۴-۶-۴) |
| ۵۳ | تحقیقات لو و همکاران (۵-۶-۴) |
| ۵۵ | روابط گروه شیمیایی میتسوبیشی (۶-۶-۴) |
| ۵۷ | رابطه پیشنهادی تالزستان (۷-۶-۴) |
| ۵۸ | رابطه آئین نامه ای JSCE (۸-۶-۴) |
| ۵۹ | مقایسه روابط تئوری با نتایج آزمایشگاهی (۷-۴) |
| ۵۹ | ضوابط آئین نامه کانادا (CSA-S806) در مقاومت برشی اجزاء تقویت شده (۸-۴) |
| ۵۹ | تقویت برشی تیرها (۱-۸-۴) |
| ۵۹ | مقدمه (۱-۱-۸-۴) |
| ۶۰ | ضرایب جزئی ایمنی (۲-۱-۸-۴) |
| ۶۱ | روابط طراحی CSA (۳-۱-۸-۴) |
| ۶۳ | محدودیت‌های طراحی (۴-۱-۸-۴) |
| ۶۳ | حداکثر فواصل نوارهای تقویتی (۱-۴-۱-۸-۴) |
| ۶۳ | حداکثر نیروی برشی نهائی مقاوم مقطع (۲-۴-۱-۸-۴) |
| ۶۳ | حداقل تقویت (۳-۴-۱-۸-۴) |
| ۶۵ | فصل پنجم |
| ۶۵ | مدل سازی المان های بتن مسلح |
| ۶۵ | مقدمه (۱-۵) |
| ۶۶ | شیوه های مدل سازی گسترش ترک (۲-۵) |
| ۶۶ | روش ترک مجزا یا ترک منفرد (۱-۲-۵) |
| ۶۷ | مدل ترک پخشی (۲-۲-۵) |
| ۶۷ | ترک چرخشی (۱-۲-۲-۵) |
| ۶۸ | ترک ثابت دوجهته و چهارجهته (۲-۲-۲-۵) |
| ۶۸ | مدل سازی المان های بتن مسلح (۳-۵) |
| ۶۹ | نوع المان و مختصات محلی بکار رفته در مدل سازی (۱-۳-۵) |
| ۷۲ | مدل های رفتاری (۲-۳-۵) |
| ۷۲ | مدل بتن پیش از بوجود آمدن ترک (۱-۲-۳-۵) |
| ۷۶ | مدل سازی بتن ترک خورده (۲-۲-۳-۵) |
| ۷۶ | مدل سازی بتن تحت تنش کششی (۱-۲-۲-۳-۵) |
| ۷۸ | مدل سازی بتن غیر مسلح تحت تنش کششی (۲-۲-۲-۳-۵) |
| ۸۳ | مدل سازی بتن تحت تنش فشاری (۳-۲-۲-۳-۵) |
| ۸۴ | مدل سازی بتن تحت تنش برشی (۴-۲-۲-۳-۵) |

| | |
|-----|---|
| ۸۶ | ۵-۳-۲-۲-۵) روابط داخلی میان مدل های رفتاری |
| ۸۷ | ۵-۳-۲-۲-۶) مدل سازی میلگردهای مسلح کننده در بتن |
| ۹۳ | ۵-۴) مقایسه آنالیزهای برنامه WCOMD با نتایج آزمایشگاهی |
| ۹۳ | ۵-۴-۱) در سطح المان بتن مسلح |
| ۹۴ | ۵-۴-۲) آنالیز تیرهای بتن مسلح با آرماتورهای متمرکز |
| ۹۶ | فصل ششم |
| ۹۶ | بررسی و مقایسه نمونه های آزمایشگاهی با برنامه WCOMD - SJ |
| ۹۶ | ۶-۱) مقدمه |
| ۹۷ | ۶-۲) مدل تحلیلی |
| ۱۰۰ | ۶-۳) تنش متناظر جداشدگی ورق FRP |
| ۱۰۰ | ۶-۳-۱) مقدمه |
| ۱۰۲ | ۶-۳-۲) مقدار بحرانی مسلح کننده |
| ۱۰۳ | ۶-۳-۳) تنش متناظر با لحظه جداشدن FRP از بتن |
| ۱۰۴ | ۶-۳-۴) طول مهاری FRP (L _e) |
| ۱۰۶ | ۶-۴) تیرهای سری SO و SW |
| ۱۰۷ | ۶-۴-۱) طرز تقویت تیرها با FRP |
| ۱۰۹ | ۶-۴-۲) مدل سازی تیرها با برنامه WCOMD-SJ |
| ۱۱۵ | ۶-۵) تیرهای مورد آزمایش تالزستان |
| ۱۱۶ | ۶-۵-۱) طرز تقویت تیرها با FRP |
| ۱۱۷ | ۶-۵-۲) مدل سازی تیرها با برنامه WCOMD- SJ |
| ۱۲۰ | ۶-۶) تیرهای مورد آزمایش باروش و همکاران |
| ۱۲۱ | ۶-۶-۱) طرز تقویت تیرها با FRP |
| ۱۲۳ | فصل هفتم |
| ۱۲۳ | مطالعات پارامتریک بر روی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP |
| ۱۲۳ | ۷-۱) مقدمه |
| ۱۲۴ | ۷-۲) تیرهای SO ₃ و SO ₄ |
| ۱۲۴ | ۷-۲-۱) تاثیر سختی FRP در ظرفیت برشی |
| ۱۲۴ | ۷-۲-۱-۱) تیر SO ₃ |
| ۱۲۵ | ۷-۲-۱-۲) تیر SO ₄ |
| ۱۲۶ | ۷-۲-۲) تاثیر ضخامت الیاف FRP در ظرفیت برشی |
| ۱۲۶ | ۷-۲-۲-۱) تیر SO ₃ |
| ۱۲۷ | ۷-۲-۲-۲) تیر SO ₄ |
| ۱۲۸ | ۷-۲-۳) تاثیر راستای الیاف FRP در ظرفیت برشی |

| | |
|-----|---|
| ۱۲۸ | SO3 تیر (۱-۳-۲-۷) |
| ۱۲۹ | SO4 تیر (۲-۳-۲-۷) |
| ۱۳۰ | تیرهای SW4 و SW3 (۳-۷) |
| ۱۳۰ | (۱-۳-۷) تاثیر نسبت خاموتگذاری در ظرفیت برشی |
| ۱۳۰ | SW3 تیر (۱-۱-۳-۷) |
| ۱۳۱ | SW4 تیر (۲-۱-۳-۷) |
| ۱۳۲ | (۲-۳-۷) تاثیر سختی FRP در ظرفیت برشی |
| ۱۳۲ | SW3 تیر (۱-۲-۳-۷) |
| ۱۳۳ | SW4 تیر (۲-۲-۳-۷) |
| ۱۳۴ | (۳-۳-۷) تاثیر ضخامت الیاف FRP در ظرفیت برشی |
| ۱۳۴ | SW3 تیر (۱-۳-۳-۷) |
| ۱۳۵ | SW4 تیر (۲-۳-۳-۷) |
| ۱۳۶ | (۴-۳-۷) تاثیر راستای الیاف FRP در ظرفیت برشی |
| ۱۳۶ | SW3 تیر (۱-۴-۳-۷) |
| ۱۳۷ | SW4 تیر (۲-۴-۳-۷) |
| ۱۳۸ | (۴-۷) تغییرات ظرفیت برشی نسبت به تغییرات راستا، سختی و ضخامت |
| ۱۴۲ | (۵-۷) تاثیر تنش ناشی از چسبندگی FRP به بتن |
| ۱۴۳ | (۶-۷) تاثیر ناشی از طول مهاری ورق FRP روی بتن |
| ۱۴۵ | فصل هشتم |
| ۱۴۵ | ارزیابی تیرهای تقویت شده با FRP به روش پیشنهادی و مقایسه با نتایج دیگر محققین |
| ۱۴۵ | (۱-۸) مقدمه |
| ۱۴۶ | (۲-۸) رابطه پیشنهادی برای ظرفیت برشی تیرهای تقویت شده با FRP |
| ۱۴۹ | (۳-۸) روش پیشنهادی در این تحقیق |
| ۱۵۰ | (۴-۸) روش پیشنهادی چلال |
| ۱۵۲ | (۵-۸) روش پیشنهادی CSA-S806 |
| ۱۵۳ | (۶-۸) روش پیشنهادی JSCE |
| ۱۵۵ | (۷-۸) روش پیشنهادی خلیفه و همکاران |
| ۱۵۷ | (۸-۸) روش پیشنهادی تالزستان |
| ۱۵۸ | (۹-۸) مقایسه نتایج روش های پیشنهادی با یکدیگر |
| ۱۶۳ | فصل نهم |
| ۱۶۳ | نتیجه گیری |
| ۱۶۴ | پیشنهاد |

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱) نمودارهای (H- δ) مربوط به قاب اصلی و قاب مرمت شده ۴
- شکل ۲-۱) ترمیم ستون هایی که به طور سطحی آسیب دیده اند ۴
- شکل ۳-۱) ترمیم ستون با آسیب دیدگی شدید ۵
- شکل ۴-۱) آرایش ژاکت های بتن مسلح که برای تقویت ستون به کار می روند ۶
- شکل ۵-۱) ژاکت های به کار رفته در ستون ها ۶
- شکل ۶-۱) محصور کردن ستون با نیم رخ های فولادی ۷
- شکل ۷-۱) جزئیات عمومی ستونی که توسط ژاکت فولادی و پیچ های مهاری آغشته به چسب تقویت شده است ۸
- شکل ۸-۱) جزئیات نمونه های تقویت شده ۹
- شکل ۹-۱) تقویت یک تیر در وجه تحتانی آن ۱۱
- شکل ۱۰-۱) اجرای ژاکت روی چهاروجه یک تیر ۱۲
- شکل ۱۱-۱) اجرای ژاکت در سه طرف مقطع یک تیر ۱۲
- شکل ۱۲-۱) مرمت موضعی در کل ضخامت دال ۱۳
- شکل ۱۳-۱) افزایش ضخامت دال - افزودن میلگردهای جدید ۱۴
- شکل ۱۴-۱) جزئیات اتصال لایه جدید بتنی به بتن قدیمی در یک دال ۱۵
- شکل ۱-۲) منحنی های تنش - کرنش برخی از الیاف های تقویت کننده ۱۹
- شکل ۲-۲) اثر قطر الیاف روی استحکام ۲۰
- شکل ۳-۲) رفتار تنش - کرنش الیاف آرامید در حالت های کششی و فشاری ۲۵
- شکل ۱-۳) شکل های مختلف تقویت برشی ۳۷
- شکل ۲-۳) ترک قطری کششی - برشی همراه با پارگی ورق FRP ۴۰
- شکل ۳-۳) شکست برشی ناشی از جدایی ورق FRP (ورق U شکل) ۴۱
- شکل ۴-۳) شکست برشی ناشی از جدایی ورق FRP (تقویت در طرفین تیر) ۴۱
- شکل ۵-۳) شکست در حالت تقویت ناپیوسته با ورق FRP و U شکل ۴۲
- شکل ۱-۴) سطح مقطع موثر در روش برش اصطکاک اصلاح شده ۴۷
- شکل ۲-۴) ناحیه ترک بحرانی و راستای قرارگیری الیاف ۵۴
- شکل ۳-۴) ضریب کاهش برشی ۵۶
- شکل ۴-۴) راستای قرارگیری الیاف ۵۶
- شکل ۵-۴) طول موثر ورق تقویتی و نمونه ای از تقویت برشی ۶۰
- شکل ۱-۵) المان های به کار رفته در مدل سازی بتن مسلح ۶۹
- شکل ۲-۵) سیستم مختصات محلی ۷۰
- شکل ۳-۵) تغییر سیستم مختصات بتن ترک خورده ۷۰
- شکل ۴-۵) رابطه تنش - کرنش معادل ۷۲

| | |
|-----|--|
| ۷۴ | شکل ۵-۵) کرنش پلاستیک معادل، پارامتر شکست و تنش معادل بر حسب کرنش معادل |
| ۷۵ | شکل ۵-۶) معیار تنش ترک خوردگی در حالت تنش دوبعدی |
| ۷۵ | شکل ۵-۷) معیار کرنش ترک خوردگی |
| ۷۷ | شکل ۵-۸-الف) توزیع تنش در بتن مسلح |
| ۷۷ | شکل ۵-۸-ب) سختی کششی بتن مسلح و میلگرد تنها |
| ۷۷ | شکل ۵-۸-ج) مدل کششی |
| ۷۷ | شکل ۵-۸-د) مدل کششی برای میلگردهای آجدار ($C=0/4$) و برای شبکه جوش شده ($C=0/2$) |
| ۷۷ | شکل ۵-۸-ح) تبدیل کشش به فشار |
| ۷۸ | شکل ۵-۹) رفتار نرم شدگی کششی بتن غیرمسلح |
| ۸۰ | شکل ۵-۱۰) تقسیم بندی بتن به دو ناحیه RC و PL |
| ۸۱ | شکل ۵-۱۱) کشش یک محوره در نمونه بتنی با یک میلگرد |
| ۸۲ | شکل ۵-۱۲) المان مختلط شامل نواحی RC و PL |
| ۸۳ | شکل ۵-۱۳) کاهش پارامتر شکست |
| ۸۴ | شکل ۵-۱۴-الف) مدل برش انتقالی ساده شده برای یک ترک |
| ۸۴ | شکل ۵-۱۴-ب) تنش فشاری مربوط به تنش برشی انتقالی |
| ۸۶ | شکل ۵-۱۵) مدل برش انتقالی برای بارگذاری و باربرداری |
| ۸۷ | شکل ۵-۱۶-الف) از مدل کششی به مدل فشاری |
| ۸۷ | شکل ۵-۱۶-ب) از مدل فشاری به مدل کششی |
| ۸۷ | شکل ۵-۱۷) توزیع کرنش میلگرد داخل بتن |
| ۸۸ | شکل ۵-۱۸) جسم آزاد مثلثی شامل صفحه ترک |
| ۸۹ | شکل ۵-۱۹) رابطه تنش-کرنش برای میلگرد تنها |
| ۹۰ | شکل ۵-۲۰) توزیع تنش فرضی در میلگردهای داخل بتن |
| ۹۱ | شکل ۵-۲۱) مدل فولاد مسلح کننده در بتن ترک خورده |
| ۹۳ | شکل ۵-۲۲) مقایسه نتایج آنالیز و آزمایشگاهی پانل PV22 |
| ۹۴ | شکل ۵-۲۳) مقطع عرضی تیرهای با آرماتورهای متمرکز |
| ۹۵ | شکل ۵-۲۴) مقایسه نتایج عددی و آزمایش تیرها با آرماتورهای متمرکز |
| ۹۷ | شکل ۶-۱) نحوه المان بندی تیرها |
| ۹۷ | شکل ۶-۲) المان بتن تقویت شده با FRP |
| ۹۸ | شکل ۶-۳) تغییر شکل تیر تحت بارگذاری |
| ۹۸ | شکل ۶-۴) تیر ترک خورده تحت بارگذاری |
| ۹۹ | شکل ۶-۵) منحنی تنش-کرنش جدایش FRP از تیر |
| ۱۰۰ | شکل ۶-۶) تنش متناظر با طول مهاری |

| | |
|-----|---|
| ۱۰۱ | شکل ۶-۷) تنش محلی FRP در طول نمونه |
| ۱۰۱ | شکل ۶-۸) تنش چسبندگی محلی بین بتن و FRP |
| ۱۰۵ | شکل ۶-۹) طول مهارى بين بتن و FRP |
| ۱۰۷ | شکل ۶-۱۰) شکل و نوع قرارگیری میلگردها در تیرهای SO و SW |
| ۱۰۸ | شکل ۶-۱۱) نوع بارگذاری و شرایط تکیه گاهی تیرهای SO و SW |
| ۱۰۸ | شکل ۶-۱۲) طرز تقویت تیرها با FRP |
| ۱۱۱ | شکل ۶-۱۳) منحنی نیرو- جابجایی تیر SW3 |
| ۱۱۱ | شکل ۶-۱۴) منحنی نیرو- جابجایی تیر SW4 |
| ۱۱۲ | شکل ۶-۱۵) منحنی نیرو- جابجایی تیرهای سری SO3 |
| ۱۱۳ | شکل ۶-۱۶) منحنی نیرو- جابجایی تیرهای سری SO4 |
| ۱۱۴ | شکل ۶-۱۷) مقایسه ظرفیت برشی تیرهای مورد آزمایش خلیفه و همکاران و تیرهای مورد تحلیل با برنامه WCOMD |
| ۱۱۵ | شکل ۶-۱۸) مشخصات هندسی تیر |
| ۱۱۶ | شکل ۶-۱۹) طرز تقویت تیرها |
| ۱۱۷ | شکل ۶-۲۰) مقایسه نمودار نیرو- جابجایی تیر اصلی R1 در آزمایش و روش تحلیلی |
| ۱۱۸ | شکل ۶-۲۱) مقایسه منحنی نیرو- جابجایی تیرهای مورد آزمایش تالزستان |
| ۱۱۹ | شکل ۶-۲۲) مقایسه ظرفیت برشی تیرهای مورد آزمایش تالزستان و تیرهای تحلیل شده با WCOMD |
| ۱۲۰ | شکل ۶-۲۳) مشخصات هندسی و نحوه تقویت تیر مورد آزمایش باروش |
| ۱۲۱ | شکل ۶-۲۴) مقایسه منحنی نیرو- جابجایی تیرهای سری VBM حاصل از آزمایش با نتایج تحلیلی |
| ۱۲۲ | شکل ۶-۲۵) مقایسه ظرفیت برشی تیرهای مورد آزمایش باروش و همکاران با تیرهای مورد تحلیل با برنامه WCOMD |
| ۱۲۵ | شکل ۷-۱) منحنی نیرو- جابجایی متاثر از تغییرات سختی FRP در تیر SO3 |
| ۱۲۶ | شکل ۷-۲) منحنی نیرو- جابجایی متاثر از تغییرات سختی FRP در تیر SO4 |
| ۱۲۷ | شکل ۷-۳) منحنی نیرو- جابجایی متاثر از تغییرات ضخامت FRP در تیر SO3 |
| ۱۲۸ | شکل ۷-۴) منحنی نیرو- جابجایی متاثر از تغییرات ضخامت FRP در تیر SO4 |
| ۱۲۹ | شکل ۷-۵) منحنی نیرو- جابجایی متاثر از تغییرات راستای FRP در تیر SO3 |
| ۱۳۰ | شکل ۷-۶) منحنی نیرو- جابجایی متاثر از تغییرات راستای FRP در تیر SO4 |
| ۱۳۱ | شکل ۷-۷) منحنی نیرو- جابجایی متاثر از تغییرات خاموتگذاری در تیر SW3 |
| ۱۳۲ | شکل ۷-۸) منحنی نیرو- جابجایی متاثر از تغییرات خاموتگذاری در تیر SW4 |
| ۱۳۳ | شکل ۷-۹) منحنی نیرو- جابجایی متاثر از تغییرات سختی FRP در تیر SW3 |
| ۱۳۴ | شکل ۷-۱۰) منحنی نیرو- جابجایی متاثر از تغییرات سختی FRP در تیر SW4 |
| ۱۳۵ | شکل ۷-۱۱) منحنی نیرو- جابجایی متاثر از تغییرات ضخامت FRP در تیر SW3 |
| ۱۳۶ | شکل ۷-۱۲) منحنی نیرو- جابجایی متاثر از تغییرات ضخامت FRP در تیر SW4 |
| ۱۳۷ | شکل ۷-۱۳) منحنی نیرو- جابجایی متاثر از تغییرات راستای FRP در تیر SW3 |

- ۱۳۸ شکل ۷-۱۴) منحنی نیرو- جابجایی متأثر از تغییرات راستای FRP در تیر SW4
- ۱۳۹ شکل ۷-۱۵) منحنی تغییرات راستا به ظرفیت برشی در تیرهای SO3 و SO4
- ۱۳۹ شکل ۷-۱۶) منحنی تغییرات راستا به ظرفیت برشی در تیرهای SW3 و SW4
- ۱۴۰ شکل ۷-۱۷) منحنی تغییرات ضخامت به ظرفیت برشی در تیرهای SO3 و SO4
- ۱۴۰ شکل ۷-۱۸) منحنی تغییرات ضخامت به ظرفیت برشی در تیرهای SW3 و SW4
- ۱۴۱ شکل ۷-۱۹) منحنی تغییرات سختی به ظرفیت برشی در تیرهای SO3 و SO4
- ۱۴۱ شکل ۷-۲۰) منحنی تغییرات سختی به ظرفیت برشی در تیرهای SW3 و SW4
- ۱۴۲ شکل ۷-۲۱) تغییرات ناشی از τ_{max} در تیر SO3
- ۱۴۳ شکل ۷-۲۲) تغییرات ناشی از τ_{max} در تیر SO4
- ۱۴۳ شکل ۷-۲۳) تغییرات ناشی از طول مهاری در تیر SO3
- ۱۴۴ شکل ۷-۲۴) تغییرات ناشی از طول مهاری در تیر SO4
- ۱۵۸ شکل ۸-۱) مقایسه نتایج روابط پیشنهادی با دیگر محققین
- ۱۵۹ شکل ۸-۲) ظرفیت برشی رابطه پیشنهادی (a) چلال و همکاران (b) خلیفه و همکاران
- ۱۶۰ شکل ۸-۳) ظرفیت برشی رابطه پیشنهادی (c) CSA-S806 (d) ملک و سعادت منش
- ۱۶۱ شکل ۸-۴) ظرفیت برشی رابطه پیشنهادی (e) روش برش اصطکاکی (f) قفل و بست
- ۱۶۲ شکل ۸-۵) ظرفیت برشی رابطه پیشنهادی

فهرست جداول

| | |
|-----------|---|
| ۱۸ | جدول ۱-۲) خواص مکانیکی مهتمترین الیاف تقویت کننده و تعدادی از مواد دیگر |
| ۲۱ | جدول ۲-۲) ترکیب درصد و خواص مکانیکی انواع مختلف الیاف شیشه |
| ۲۳ | جدول ۳-۲) خواص چند نمونه الیاف کربن تجاری |
| ۲۴ | جدول ۴-۲) خواص الیاف آرامید |
| ۳۰ | جدول ۵-۲) خواص مکانیکی و فیزیکی رزینهای وینیل استر در حالت خالص |
| ۳۱ | جدول ۶-۲) مقایسه رزینهای وینیل استر با درصدهای مختلف وزنی الیاف شیشه |
| ۳۶ | جدول ۱-۳) شکل چسباندن ورق FRP |
| ۳۷ | جدول ۲-۳) توزیع الیاف |
| ۳۷ | جدول ۳-۳) جهت الیاف |
| ۳۸ | جدول ۴-۳) مزایا و معایب شکل‌های مختلف چسباندن ورق های FRP |
| ۳۹ | جدول ۵-۳) مزایا و معایب انواع مختلف توزیع الیاف |
| ۳۹ | جدول ۳-۶) مزایا و معایب جهات مختلف قرارگیری الیاف |
| ۹۳ | جدول ۱-۵) مشخصات پانل PV22 |
| ۱۰۹ | جدول ۱-۶) مشخصات مصالح |
| ۱۱۰ | جدول ۲-۶) مقایسه نتایج آزمایش و تحلیل ها |
| ۱۱۶ | جدول ۳-۶) مشخصات مصالح |
| ۱۲۱ | جدول ۴-۶) مشخصات مصالح |
| ۱۵۰ و ۱۴۹ | جدول ۱-۸) محاسبه ظرفیت برشی ورق FRP با روش پیشنهادی تحقیق |
| ۱۵۱ و ۱۵۰ | جدول ۲-۸) محاسبه ظرفیت برشی ورق FRP با روش پیشنهادی چلال |
| ۱۵۳ و ۱۵۲ | جدول ۳-۸) محاسبه ظرفیت برشی ورق FRP با روش پیشنهادی CSA-S806 |
| ۱۵۴ و ۱۵۳ | جدول ۴-۸) محاسبه ظرفیت برشی ورق FRP با روش پیشنهادی JSCE |
| ۱۵۶ و ۱۵۵ | جدول ۵-۸) محاسبه ظرفیت برشی ورق FRP با روش پیشنهادی خلیفه و همکاران |
| ۱۵۸ و ۱۵۷ | جدول ۶-۸) محاسبه ظرفیت برشی ورق FRP با روش پیشنهادی تالزستان و همکاران |

فصل اول

بهسازی سازه های بتن مسلح

۱-۱) مقدمه

با توجه به هزینه قابل ملاحظه نوسازی مجدد سازه ها، در سال های اخیر مسئله تقویت و ترمیم سازه های ضعیف و خسارت دیده، در سطح وسیعی مطرح شده است. تقویت به معنی افزایش مقاومت و باربری اعضای ضعیف در مقابل بارهای وارده و ترمیم به مفهوم افزایش مقاومت و باربری اعضای صدمه دیده می باشد. برحسب مقاومت مورد نظر، میزان آسیب وارده، نوع اعضا، نحوه اتصال آنها و همچنین امکان دسترسی به مصالح و مسائل اقتصادی طرح، روش های گوناگونی جهت مرمت و تقویت مطرح شده که می توان به استفاده از پیش تنیدگی خارجی، ژاکت فولادی یا بتنی، یا صفحات الیاف پلیمری مرکب (FRP) اشاره نمود. در این فصل، پس از ذکر دلایل نیاز سازه های بتنی به ترمیم و تقویت، روشهای متداول ترمیم و تقویت اجزاء بتن مسلح تشریح خواهد شد.

۲-۱) دلایل ترمیم و تقویت

با ارزیابی شرایط ساختمانهای موجود، دلایل ضعف سازه ها را می توان به شرح زیر دسته بندی نمود [۲،۱]:

- ۱- خطاهای طراحی: شامل عدم توجه به اصول مبانی طراحی ساختمان های مقاوم در برابر زلزله، اشتباه در تحلیل و طراحی، تهیه نقشه ها، مدارک و جزئیات اجرایی.
- ۲- خطاهای اجرایی: از قبیل اشکال در قالب بندی، میلگردبندی، تولید و اجرای بتن، قالب برداری و عمل آوری بتن که اغلب از عدم وجود سیستمهای کنترل کیفی، نظارت و یا وجدان کاری در کارگاه ناشی می شود.
- ۳- تغییر در کاربری سازه و اعمال بارهایی بیش از بارهای پیش بینی شده در هنگام طراحی.
- ۴- خوردگی فولاد و تخریب شیمیایی بتن: از قبیل خوردگی ناشی از کربناتاسیون، نفوذ کلر به داخل بتن، تهاجم سولفاتها و اسیدها.
- ۵- تغییر آئین نامه ها (استانداردهای بارگذاری و طراحی): بررسی زلزله های اخیر نشان می دهد که سازه هایی که مطابق آئین نامه های قدیمی ساخته شده اند آسیب پذیر بوده و عمدتاً نیاز به تقویت دارند.
- ۶- آسیب دیدگی سازه ها ناشی از بلایای طبیعی یا حوادث: زلزله، باد و عوامل دیگری نظیر آتش سوزی، انفجار و غیره

۳-۱) روش های ترمیم و تقویت اجزاء بتن مسلح

اعضای سازه ای بسته به مقاومت لرزه ای مورد نظر، میزان آسیب دیدگی و نوع اتصالات، با روش های مختلفی از قبیل تزریق رزین، جایگزینی قطعات جدا شده، بکارگیری پیش تنیدگی خارجی، بتن پاشی، چسباندن ورق های مختلف روی سطوح، ژاکتهای بتن مسلح یا قفسهای فلزی، مرمت یا تقویت می شوند.

کلید موفقیت عملیات ترمیم و تقویت، ایجاد پیوستگی مطلوب بین بتن قدیمی و جدید است که با اعمال روش های زیر تحقق می یابد.

زبرکردن سطوح بتنی قدیمی.

پوشاندن سطوح قدیمی با انواع رزین ها از جمله اپوکسی قبل از بتن ریزی جدید.

جوش دادن میلگردها.

استفاده از میلگردهای انتظار.

شکل پذیری عضو ترمیم شده با محصور کردن صحیح بتن توسط خاموتها و تنگهایی با فواصل محدود، ژاکتهای فولادی، کامپوزیت های پلیمری و نظایر آن بهبود می یابد. باید در نظر داشت که تغییر در سطح مقطع اعضای سازه ای، موجب تغییر در سختی اجزاء مختلف گردیده و منجر به باز توزیع تنشها می شود.

قفسهایی^۱ فلزی که از نبشی ها و بست های^۲ فولادی ساخته شده اند فقط برای مرمت ستونها به کار می روند، اما مرمت اتصالات بین ستونها و تیرها با این روش ممکن نیست. چسباندن ورقهای فلزی یا FRP^۳ روی بتن روش ساده ای است. در این روش بدون تغییر سختی سازه، ناحیه کششی تقویت می گردد.

در صورت استفاده از دو روش اخیر باید اعضای تقویت شده را در مقابل آتش سوزی با وسایل ویژه ای ایمن کرد. اما اگر اعضاء با ژاکت های بتن مسلح تقویت شوند، لزومی به انجام این کار نخواهد بود [۳، ۲، ۱].

۱-۳-۱) ستونها

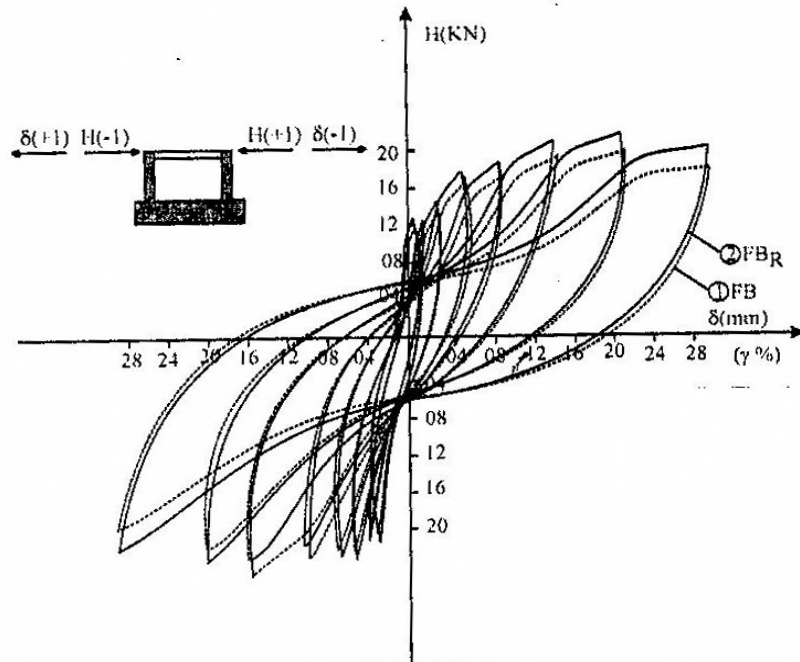
برخی آسیب های ایجاد شده در ستونها به شرح زیر می باشند [۳، ۱]:
ترکهای ریز (افقی یا مورب) بدون خرد شدن بتن یا گسیختگی میلگردها.
خردشدگی بتن، شکستن تنگها و کمانش میلگردها.
بسته به درجه آسیب دیدگی، راهکارهای مختلفی را می توان اعمال کرد. تزریق زرین، برداشتن و جایگزین کردن قطعات و بکاربردن ژاکت، از جمله این راهکارها هستند.

۱-۳-۱-۱) مرمت موضعی

تزریق زرین و ملاتهای زرینی فقط برای مرمت ستونهایی که بدون خرد شدن بتن یا آسیب دیدگی میلگردها دارای ترک ریز شده و یا پوسته پوسته شده اند، به کار می رود. میزان مرمت را می توان از مقایسه نمودارهای نیروی افقی - تغییر مکان جانبی ($H-\delta$) ستون اصلی و ستونی که با زرین اپوکسی مرمت شده است، کنترل کرد. (شکل ۱-۱) (ساریانیس^۴ و استیلیانیدیس^۵، ۱۹۹۰). نتایج چنین مقایسه ای بسیار امیدوار کننده است و تأثیر این نوع مرمت را نشان می دهد، که با تزریق زرین اپوکسی مرمت شده می باشد.

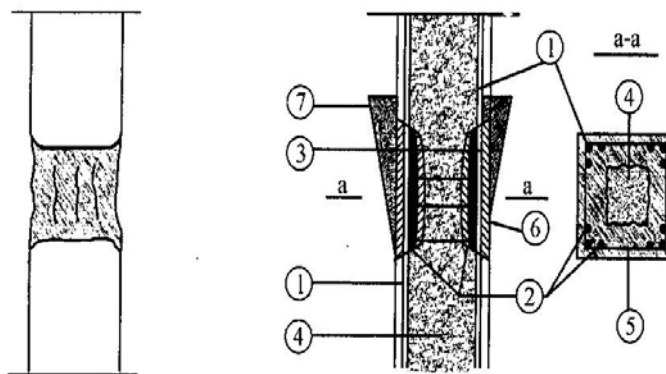
برداشتن و جایگزین کردن ستونهای با آسیب دیدگی شدید، که در آنها خرد شدن بتن، پارگی تنگها و کمانش میلگردها طولی مشاهده می شود، نیز امکان پذیر است.

البته پیش از انجام چنین کاری، همیشه یک سیستم تکیه گاهی موقت برای تحمل بارهای ستون ایجاد می گردد. لذا، چنانچه گسیختگی بتن صرفاً سطحی باشد، تنها به برداشتن جزئی بتن و مرمت آن اکتفا می شود (شکل ۱-۲).



۱- قاب اصلی ۲- قاب مرمت شده

شکل ۱-۱- نمودارهای (H-δ) مربوط به قاب اصلی و قاب مرمت شده [۱]



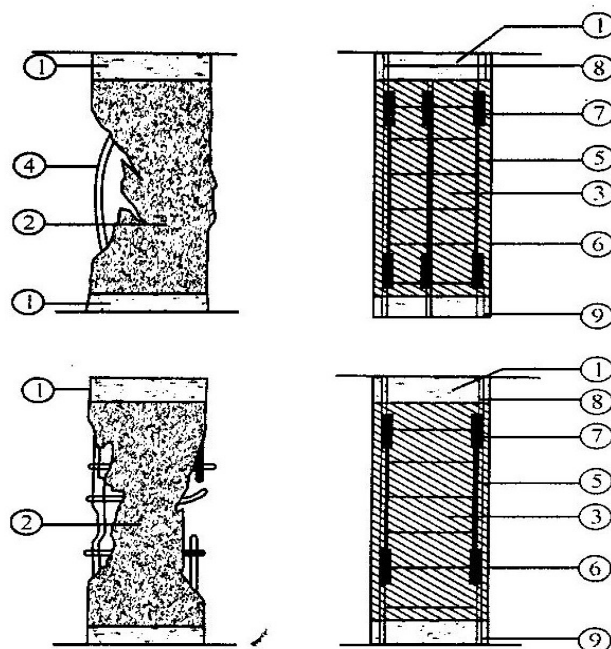
۱- میلگردگذاری موجود ۲- میلگردگذاری اضافه شده ۳- تنگهای اضافه شده ۴- بتن موجود ۵- بتن جدید

۶- جوشکاری ۷- قالب موقت برای بتن ریزی

شکل ۱-۲- ترمیم ستون هایی که به طور سطحی آسیب دیده اند. [۱]

در غیراین صورت، اگر گسیختگی ستون کلی باشد، باید بتن قدیمی را کاملاً برداشت و پس از میلگردگذاری طولی با جوشکاری مناسب و اتصال آن به میلگردهای قدیمی و میلگردگذاری عرضی نزدیک به هم، بتن ریزی کرد (شکل ۱-۳).

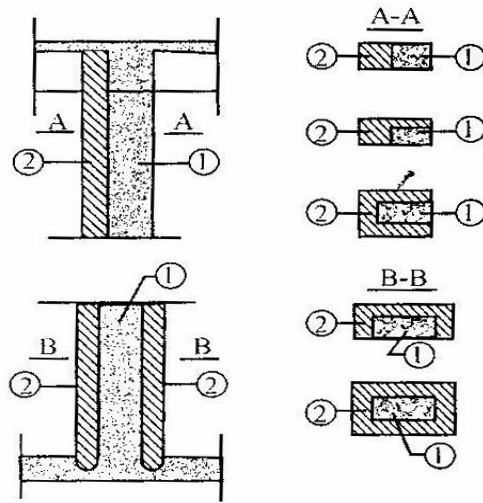
لازم به ذکر است که در حالت اول، پیوستگی مناسب بین بتن قدیمی و بتن جدید کاملاً ضروری است. در حالت دوم، در بسیاری از مواقع، پس از انجام عملیات ترمیم موضعی یک ژاکت بتنی اجرا می شود.



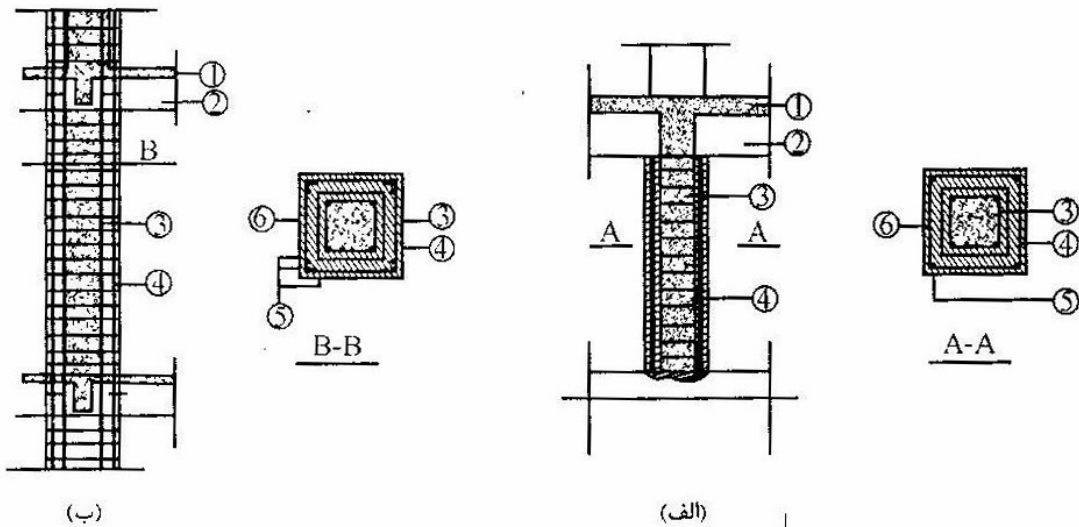
۱- بتن موجود و آسیب ندیده ۲- بتن موجود و آسیب دیده ۳- بتن جدید ۴- میلگردهای کمانه کرده ۵- میلگرد گذاری اضافه شده ۶- تنگهای افزوده شده ۷- جوشکاری ۸- تنگهای موجود ۹- میلگردگذاری موجود
شکل ۱-۳- ترمیم ستون با آسیب دیدگی شدید [۱]

۱-۳-۲ ژاکت های بتن مسلح

ژاکتهای بتن مسلح زمانی به کار می روند که ستونها دچار آسیب دیدگی جدی و یا مقاومت لرزه ای ناکافی باشند. در صورت امکان، ژاکتها دورتا دور ستونها اجرا می شوند و در غیر این صورت فقط در یک یا چند ضلع ستون اجرا می شود (شکل ۱-۴). در حالتی که اجرای ژاکت بتن مسلح فقط به ارتفاع خالص طبقه محدوده می شود، مقاومت محوری و برشی ستون افزایش می یابد، ولی مقاومت خمشی در اتصالات افزایش پیدا نمی کند. بنابراین، توصیه می شود که ژاکتها از سقف و دالهای کف رد شوند (شکل ۱-۵).



شکل ۱-۴- آرایش ژاکت های بتن مسلح که برای تقویت ستون ها به کار می روند. [۱]



(الف) اجرای ژاکت در ارتفاع یک طبقه

(ب) توسعه ژاکت به طبقات فوقانی و تحتانی

۱- دال ۲- تیر ۳- ستون موجود ۴- زره ۵- میلگردگذاری طولی اضافه شده ۶- تنگهای افزوده شده.

شکل ۱-۵- ژاکت های به کار رفته در ستونها [۱]

۳-۱-۳-۱) قفس های ساخته شده از نیمرخ های فولادی

این راهکار معمولاً کمتر مورد استفاده قرار می گیرد. قفس از چهار نبشی فولادی با حداقل ابعاد مقطع $L 50 \times 50 \times 5$ میلی متر تشکیل شده است. نبشی های مذکور با تسمه های فولادی با بعد حداقل 25×4 میلی متر به یکدیگر متصل می شوند (شکل ۱-۶).

قبل از جوشکاری، نبشی های فوق الذکر به کمک نبشی های عرضی و بستهای پیش کشیده روی گوشه ستون ها محکم نگه داشته می شوند (شکل ۱-۶).