۲-۲- راهکارهای بهسازی شالوده و پی

۲-۲-۱- معرفی

بارهای ساختمان از طریق شالوده به خاک زیر آن یعنی پی منتقل می‌گردد. از این رو نقش شالوده و پی در ایمنی ساختمان مهم می‌باشد.

معمول‌ترین موارد آسیب‌پذیری شالوده و پی به قرار زیر است:

الف- آسیب‌پذیری شالوده

- وجود نیروی کششی بلند کننده
- عدم کفایت ظرفیت خمشی یا برشی (برش خمشی یا برش سوراخ‌کننده) مقطع شالوده
- تهاجم مواد شیمیایی مضر موجود در خاک و آب زیرزمینی به بتن شالوده
- عدم کفایت مقاومت جانبی برای تحمل نیروهای جانبی وارد بر شالوده
- وجود نیروی فشاری یا کششی بیش از ظرفیت سازه‌ای در شمع‌ها

ب- آسیب‌پذیری پی

- وقوع تنش فشاری بیش از ظرفیت باربری پی در زیر شالوده
- وجود نیروی فشاری یا کششی بیش از ظرفیت ژئوتکنیکی سازه‌ای در شمع‌ها
- وجود نشست‌های زیاد و غیرقابل قبول در پی
- وجود پتانسیل روانگرایی، ماسه سریع و تورم در خاک زیر شالوده
- عدم پایداری ساختگاه سازه، مخصوصاً برای ساختمان‌هایی که بر روی زمین‌های شیبدار احداث شده‌اند.

روند مطالعات ارزیابی شرایط پی و شالوده شامل موارد زیر می‌باشد:

- تحقیق اسناد و بایگانی مدارک طراحی ساختمان برای گزارش مکانیک خاک
- بررسی خاک‌ها در قالب نمونه‌گیری و انجام آزمایش‌های مرتبط، اندازه‌گیری سطح آب زیرزمینی و میزان فشار آب حفره‌ای
- برآورد ابعاد شالوده ساختمان و شالوده دیوارها. در صورت لزوم بعضی از شالوده‌ها تحت گمانه‌زنی قرار گرفته و در این گمانه‌ها میزان زوال مصالح را بررسی می‌کنند.
- بررسی آثار نشست پی شامل شکل‌گیری ترک‌ها و کج شدن دیوارها، برآمدگی مناطق مجاور و مسیرهای قائم و افقی پی
- کسب اطلاعات لازم از هندسه، پیکربندی و نقشه‌های اجرایی ساختمان و شالوده و بارگذاری
- مدلسازی و تحلیل
- ارزیابی
- ارائه طرح تقویت

۲-۲-۲- مشکلات مقاوم‌سازی شالوده

همان‌گونه که قبلاً اشاره‌شد، علاوه بر هزینه بالای بهسازی شالوده‌ها، این کار در زمان بهره‌برداری از ساختمان، بسیار مشکل است.

در هنگام مقاوم‌سازی شالوده، با مشکلات زیر روبرو هستیم:

۱- لزوم تخلیه کلیه و یا قسمتی از فضاهای طبقه همکف یا زیرزمین
۲- تخریب دال کف زمین در داخل ساختمان و سنگ فرش بیرون از آن
۳- فضای بسیار محدود در طول عملیات مقاوم‌سازی به علت وجود پایه‌ها و تکیه‌گاه‌های موقتی
۴- ارتفاع محدود برای تجهیز ساختمان
۵- صدا و لرزش‌های ساختمان

۲-۲-۳- انواع راهکارهای رفع عیوب شالوده

برای رفع موارد عیوب شالوده می‌توان از راهکارهای مختلفی به صورت مجزا و یا در ترکیب با یکدیگر استفاده نمود؛ به طور کلی تعمیر و تقویت شالوده‌ها را می‌توان به کمک یکی از روش‌های زیر انجام داد:

۱- تقویت سازه‌ای شالوده موجود (بهسازی سازه‌ای)
۲- بهبود شرایط پی (بهسازی ژئوتکنیکی)
۳- کاهش بار وارد بر فونداسیون از طریق سبک کردن ساختمان یا افزایش عناصر مقاوم جانبی

مقاوم‌سازی لرزه‌ای شالوده شامل بهسازی سازه‌ای شالوده ضعیف و یا احداث شالوده جدید می‌باشد، ولی در بعضی از موارد لازمست شرایط خاک زیر شالوده (پی) را بهبود بخشید.

۲-۲-۴- راهکارهای بهسازی شالوده و پی

با توجه به نوع ضعف موجود در شالوده و پی، راهکارهای مختلفی برای تقویت آنها وجود دارد که عبارتند از:

الف- بهسازی سازه‌ای شامل:
- افزایش ابعاد شالوده
- افزودن شناژ به شالوده موجود
- تقویت خمشی و برشی شالوده با کابل‌های پیش‌تنیده
- افزایش مقاومت شمع‌های موجود

ب- بهسازی ژئوتکنیکی شامل:
- تزریق (اختلاط مکانیکی)
- ریزشمع

- احداث شمع
- تقویت از زیر شالوده (پی‌بندی)

۲-۲-۴-۱- راهکارهای بهسازی شالوده

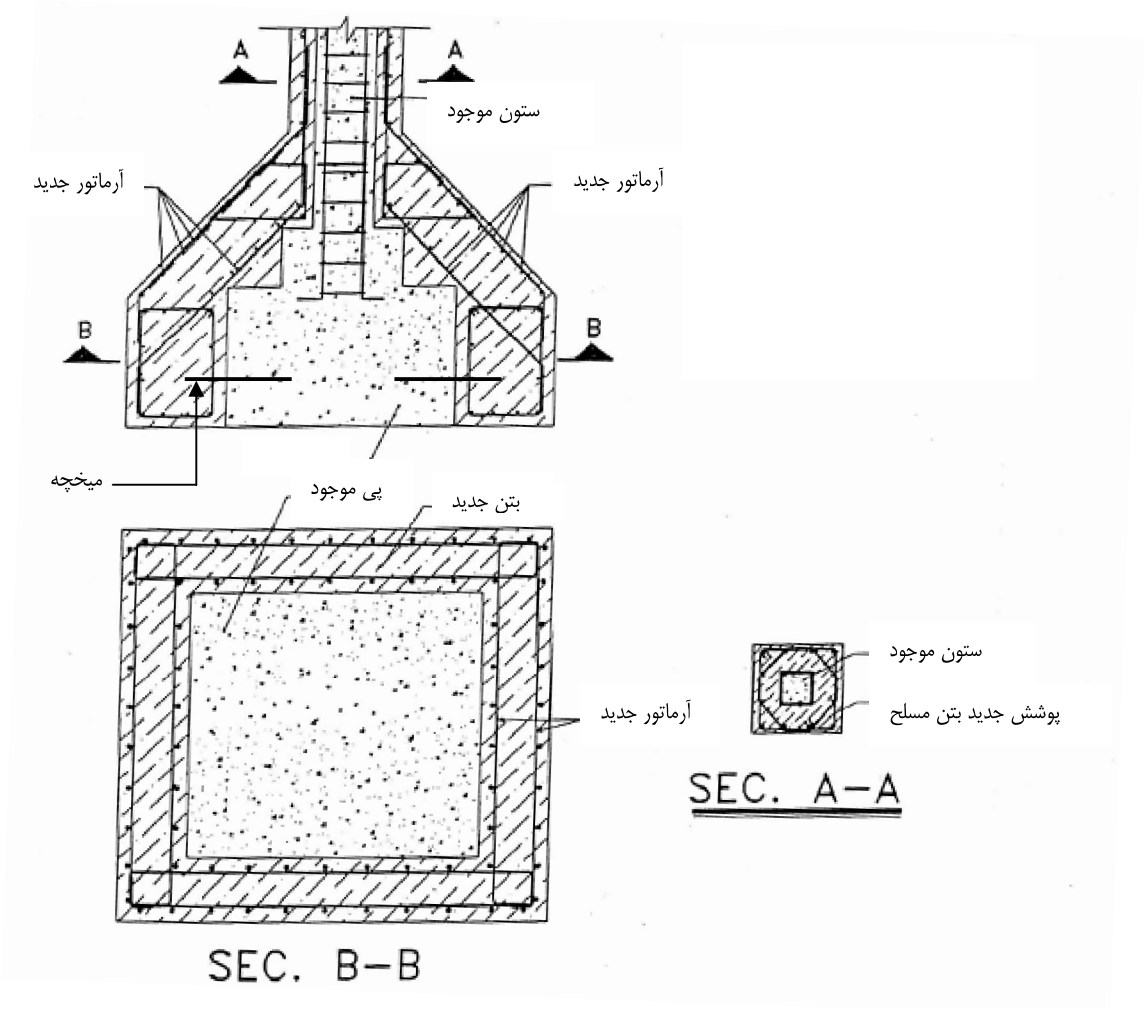
I- افزایش ابعاد شالوده

با افزایش ابعاد شالوده می‌توان سطح تماس بر پی را افزایش داد و از تنش‌های اعمالی بر پی کاست که این اقدام منجر به افزایش ظرفیت باربری شالوده می‌شود. همچنین با افزایش ابعاد شالوده و به دنبال آن کاهش تنش موجود در پی، نشست‌های پی خاک نیز کاهش می‌یابد. در شکل‌های ۲-۲-۱ و ۲-۲-۲ نمونه‌ای از این روش نشان داده شده است.

دو حالت افزایش ابعاد شالوده وجود دارد:

۱- افزایش ابعاد شالوده و ستون متصل به آن (شکل ۲-۲-۱)

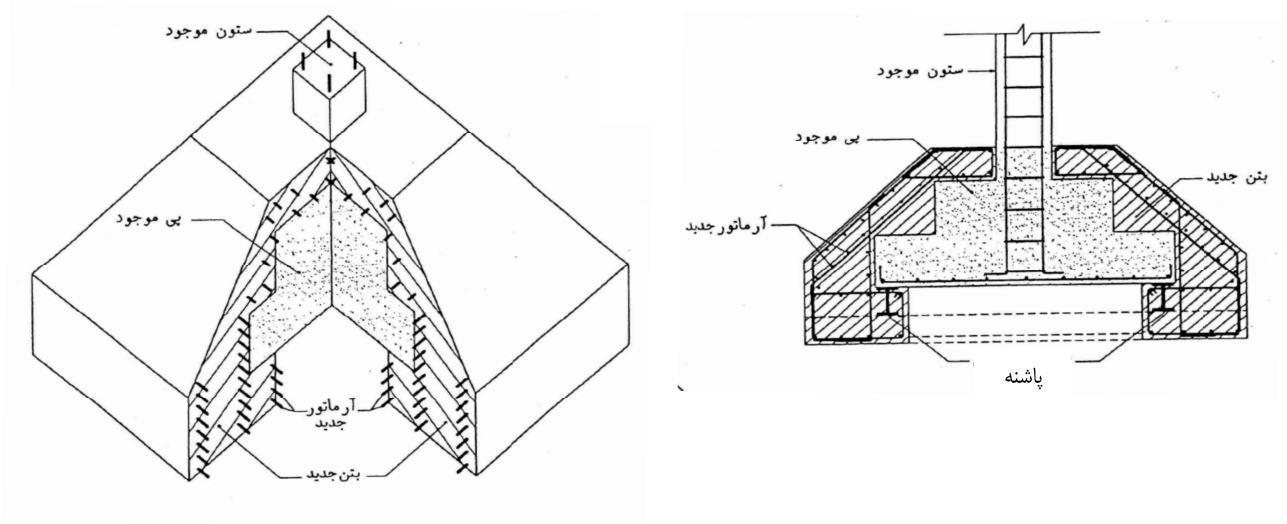
۲- افزایش ابعاد شالوده به تنهایی (شکل ۲-۲-۲)



شکل ۲-۲-۱- افزایش ابعاد شالوده و ستون متصل به آن

در شرایط مقاوم‌سازی شالوده و ستون مطابق شکل ۲-۲-۱، برای افزایش مقاومت شالوده موجود باید ابعاد قسمت زیرین شالوده را افزایش داد. در این روش فشار خاک اضافه شده باید به صورت یکنواخت به شالوده اعمال گردد. کمربند محیطی شالوده باید بار قسمت‌های فوقانی سازه رابه خاک زیر آن منتقل نماید. در این حالت باید به دنبال پیوستگی کامل بین روکش بتنی و بتن شالوده باشیم که این امر با تمیز و مضرس کردن سطح بتن قدیم و یا استفاده از اتصالات مکانیکی به صورت میخچه امکان‌پذیر است.

در حالتی که تنها ابعاد شالوده افزایش پیدا کرده و ستون مقاوم‌سازی نشده باشد، بار اعمالی به قسمت‌های تقویت شده باید مستقیماً به شالوده موجود منتقل گردد. این امر با استفاده از پاشنه یکپارچه‌ای که در محیط و زیر شالوده موجود قرار گرفته، محقق می‌گردد. در این راستا از آرماتورگذاری مناسبی باید در پاشنه مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۲-۲-۲).



شکل ۲-۲-۲- بهسازی شالوده بوسیله افزایش ابعاد هندسی

مراحل اجرای راهکار افزایش ابعاد شالوده به شرح زیر می‌باشد:

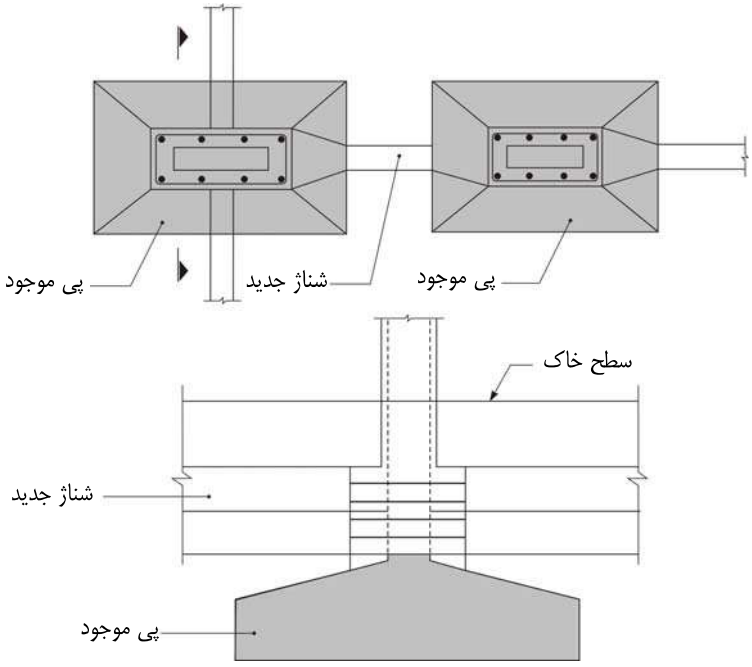
۱- خالی‌کردن اطراف شالوده از تراز روی آن تا تراز زیر بتن مگر به اندازه عرضی بیشتر ازعرض موردنیاز مقاوم‌سازی
۲- مضرس کردن سطح بتن در بالا و وجوه عمودی شالوده
۳- ایجاد سوراخ‌های افقی در اطراف شالوده برای کاشت شاخک (میخچه). (در صورت لزوم)
۴- اجرای بتن مگر اضافی در ناحیه افزایش ابعاد
۵- تمیز و مضرس کردن سطوح تماس اجرای چسب پلیمری بر روی سطوح نمایان شالوده
۶- اجرای آرماتورهای اضافی برای بتن مسلح جدید مطابق نقشه‌های اجرایی
۷- اجرای بتن جدید
۸- جداکردن قالب‌ها و مراقبت از شالوده با پوشاندن سطح بتن با گونی‌های خیس (هرگز نباید شالوده را مستقیماً با آب خیس نمود، زیرا منجر به شستن لایه‌های زیر آن می‌شود)
۹- مقاوم‌سازی ستون (در صورت لزوم)

۱۰- پرکردن مجدد شالوده ترجیحاً با خاک‌های درشت دانه در لایه‌های مختلفی که کاملاً متراکم شده باشند.

۱۱- کامل کردن کف و سنگ فرش روی شالوده

II- افزودن شناژ به شالوده

یکی از راهکارهای بهسازی شالوده در برابر لغزش، به هم بستن شالوده‌ها و ایجاد مشارکت کلیه شالوده‌ها در تحمل بارهای جانبی می‌باشد. به همین منظور از شناژ برای بستن شالوده‌ها استفاده می‌گردد (شکل ۲-۲-۳ و ۲-۲-۴).

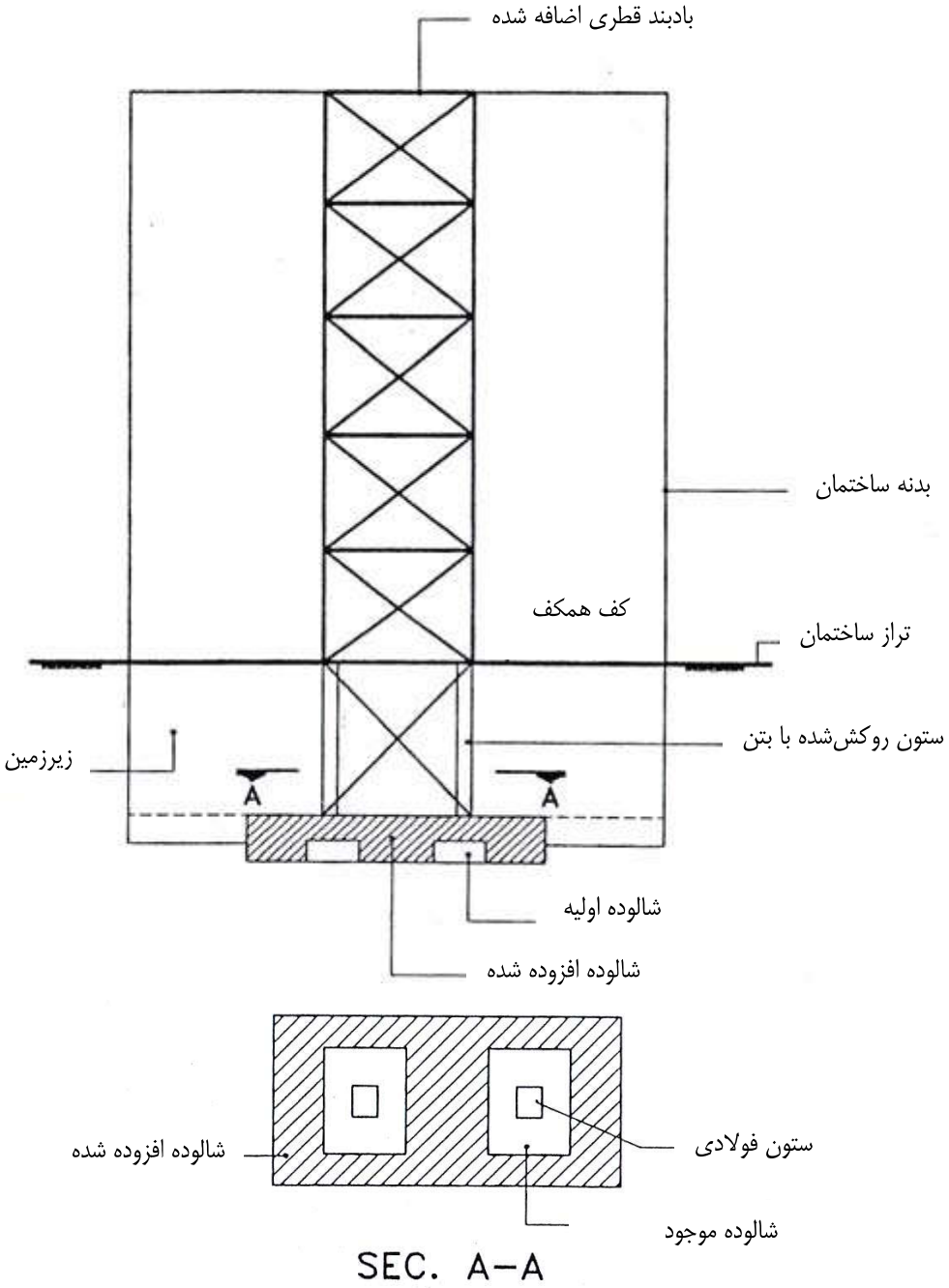


شکل ۲-۲-۳- به هم بستن شالوده‌ها با شناژ

شکل ۲-۲-۴- به هم بستن شالوده‌ها با شناژ

III- یکپارچه‌سازی شالوده

این نوع بهسازی معمولاً در مواردی مورد توجه قرار می‌گیرد که بادبند یا دیوار برشی جدید بین دو ستون احداث شود. در این نوع بهسازی علاوه بر افزایش ظرفیت برشی و خمشی شالوده، مقاومت جانبی برای تحمل نیروهای جانبی وارد بر شالوده نیز افزایش می‌یابد (شکل ۲-۲-۵)، شکل ۲-۲-۶ نیز نشان‌دهنده تصاویری از مراحل اجرایی یکپارچه کردن شالوده‌هاست.



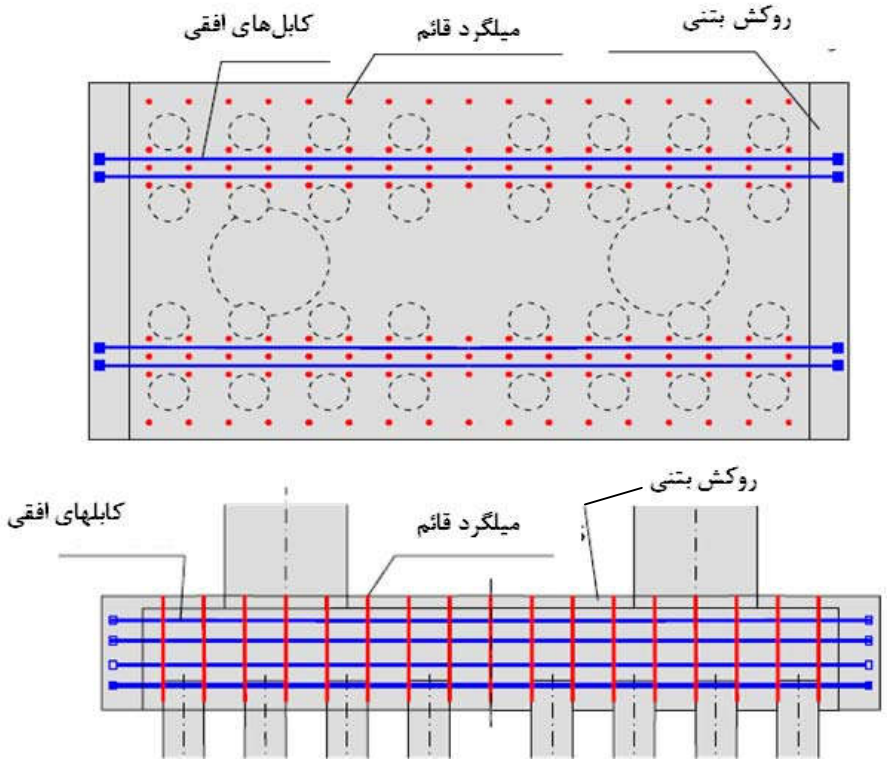
پلان تقویت شالوده برای دهانه بادبندی شده

شکل ۲-۲-۵- یکپارچه‌سازی شالوده

شکل ۲-۲-۶- یکپارچه‌سازی شالوده

IV- بهسازی شالوده با کابلهای پیش‌تنیده

یکی از راهکارهای بهسازی و افزایش ظرفیت خمشی و برشی شالوده، اعمال نیروی پیش‌تنیدگی به مقطع می‌باشد. معمولاً وقتی افزایش عمق شالوده از بالا به دلیل معماری ممکن نباشد، ظرفیت خمشی مثبت و منفی مقطع را می‌توان با عبور کابلهای پیش‌تنیده، در حفره‌های تعبیه شده سراسری در طول شالوده یا در بتن جدید روی وجوه آن و پیش‌تنیده کردن آنها، افزایش داد. نیروهای پیش‌تنیدگی فوق در دو امتداد عمودی و افقی به شالوده اعمال می‌شوند. نیروهای پیش تنیدگی قائم باعث افزایش ظرفیت برشی و نیروهای پیش تنیدگی افقی باعث افزایش ظرفیت برشی و خمشی به طور همزمان می‌شوند. پیش تنیدگی افقی بوسیله کابل‌ها و مفتول‌های متداول و پیش تنیدگی قائم با استفاده از مصالح FRP صورت می‌گیرد (شکل ۲-۲-۷).



شکل ۲-۲-۷- اعمال پیش تنیدگی افقی و قائم برای بهسازی شالوده

V- افزایش مقاومت شمع‌های موجود

در ساختمانهای احداث شده برروی شمع، شمع‌ها ممکن است نتوانند به صورت مناسبی در برابر بارهای جانبی مقاومت کنند؛ همچنین شمع ها ممکن است در محل اتصال به سر شمع دچار مشکل شده باشند.

نحوه افزایش مقاومت شمع به شرح زیر است:

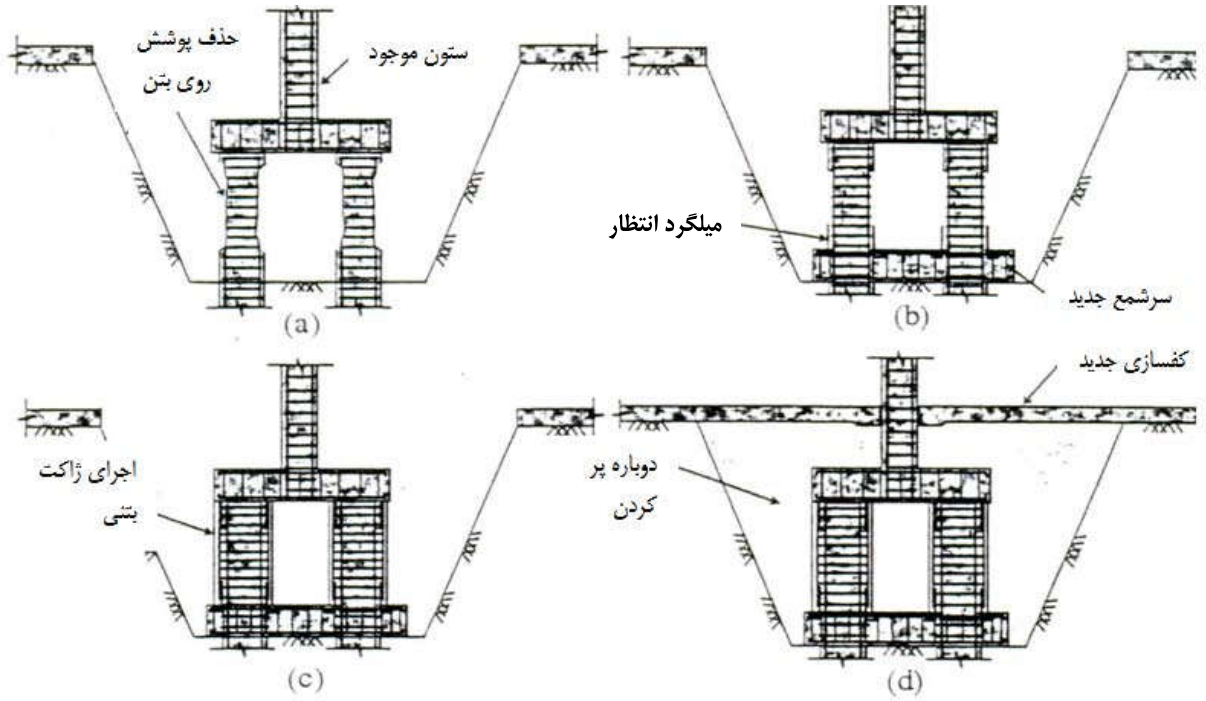
۱- کندن زمین تا سطحی که خرابی شمع مشهود باشد.

۲- لایه‌برداری ازسطح شمع تا قسمت‌های داخلی آن به شکلی که خرابی وخوردگی کاملاً ازسطح شمع برداشته شود. کلاهکی مانند شکل ۲-۲-۸ در زیر آن باید اجرا شود تا از پیوستگی آرماتورهای اضافی با شمع موجود اطمینان حاصل شود.

۳- اجرای آرماتورهای دور شمع و بتن ژاکت دور آن که بر اساس نتایج تحلیل سازه، طراحی شده باشد.

۴- پرکردن مجدد شالوده با خاک دانه‌ای متراکم

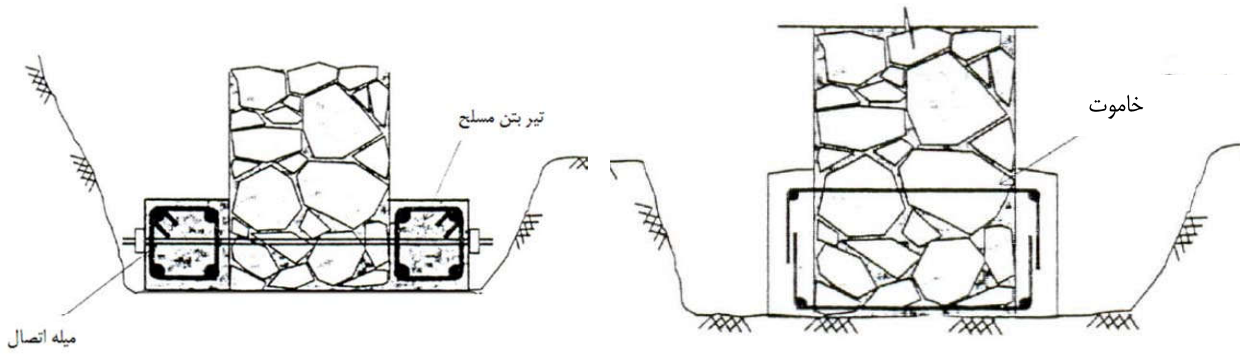
۵- اجرای کف



شکل ۲-۲-۸- افزایش مقاومت شمع‌های موجود

VI- تقویت شالوده‌های بنایی

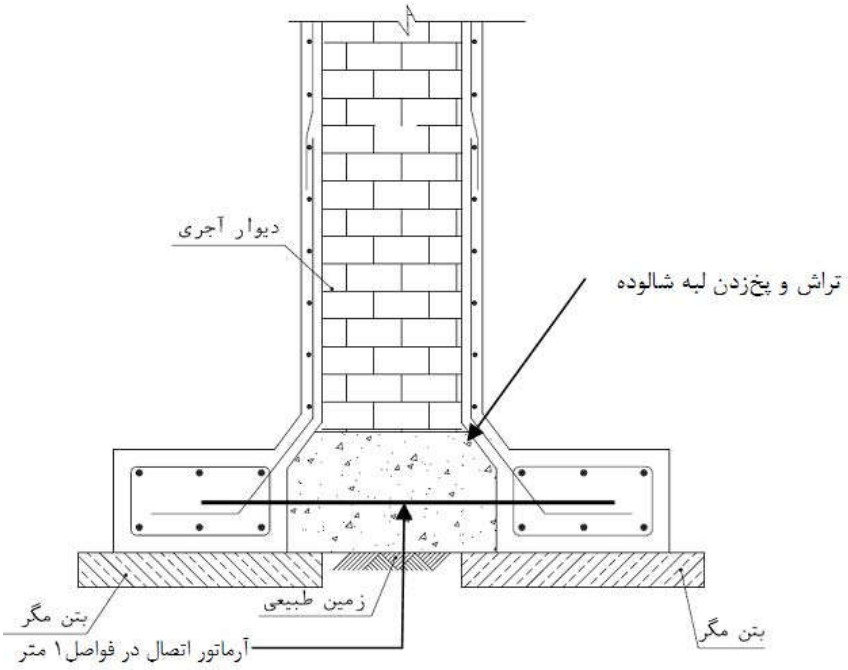
شالوده‌های بنایی را می‌توان با اضافه نمودن عرض آنها به کمک آرماتور و بتن مانند شکل ۲-۲-۹ مقاوم‌سازی نمود. در ابتدا، با خالی کردن خاک اطراف دیوار، دو سمت آن نمایان می‌گردد. سوراخ‌هایی در فاصله ۰/۵ تا ۱ متر ایجاد می‌شود. داخل سوراخ‌ها آرماتور قرار داده و پس از پاک کردن تمام مصالح ضعیف، رویه دیوار را با بتن می‌پوشانند. بجای بتن معمولی از شاتکریت نیز می‌توان استفاده نمود. پوشش بتن میلگردها نیز باید حداقل ۴۰ میلیمتری باشد تا از خوردگی میلگردها جلوگیری شود (شکل ۲-۲-۹-الف). روش دیگر برای مقاوم‌سازی شالوده‌های سنگ قلوه‌ای استفاده از تیرهای بتن مسلح در دو سمت دیوار می‌باشد (شکل ۲-۲-۹-ب) که در فواصلی معین به یکدیگر بسته می‌شوند.



(ب) (الف)

شکل ۲-۲-۹- افزایش مقاومت شالوده سنگ قلوه‌ای با بتن مسلح

در مواردی که بنا به دلایلی دیوار بنایی با روش بتن‌پاشی تقویت شده باشد و شالوده نیز نیاز بـه تقویـت داشـته باشـد مطـابق شکل ۲-۲-۱۰ می‌توان با همین روش شالوده را تقویت نمود.



شکل ۲-۲-۱۰- افزایش مقاومت شالوده با بتن مسلح

۲-۲-۴-۲- راهکارهای بهسازی پی (بهسازی ژئوتکنیکی)

در روش بهسازی ژئوتکنیکی سعی بر افزایش باربری زمین زیر شالوده به کمک بهبود شرایط خاک و یا انتقـال نیـرو یـا اضـافه نیروی شالوده به لایه‌های تحتانی، بدون افزایش ابعاد هندسی شالوده می‌باشد.

I- بهبود شرایط خاک با استفاده از تزریق مواد افزودنی

این روش اختلاط در جای خاک با مواد افزودنی از قبیل سیمان، آهک و... بـه روش تزریـق اسـت. هـدف از اخـتلاط خـاک، دست‌یابی به پارامترهای ژئوتکنیکی اصلاح شده از قبیل مقاومت فشاری، مقاومت برشی و یـا نفوذپـذیری اسـت. اخـتلاط خـاک بـرای محدود کردن و یا ثابت نمودن مواد شیمیایی مضر در خاک نیز کاربرد دارد.

معمولاً سیمان بصورت دوغاب (ترکیب با آب) با خاک مخلوط می‌شود. هر چند امکان استفاده از سیمان بـصورت خـشک نیـز مقدور است، برحسب نوع خاک حجم دوغاب بین ۲۰ تا ۳۰ درصد حجم خاک انتخاب می‌شود.

افزودنی‌ها شامل مواد زیر می‌شوند:

سیمان، خاکستر آتشفشانی، سرباره کوره، آهک، سایر مواد شیمیایی

ساخت دوغاب طبق مراحل زیر انجام می‌شود:

- سیستم اختلاط مرکزی، با میکسرهای دور بالا برای اختلاط

- محل ذخیره موقت دوغاب همراه با همزن‌های دور پایین
- سیستم پمپاژ

خاکهای غیرچسبنده معمولاً ساده‌تر از خاکهای چسبنده مخلوط می‌شوند. به خاکهای نباتی مقادیر قابل ملاحظه‌ای از مواد افزودنی باید اضافه نمود و قبل از شروع عملیات اجرایی لازم است از عملکرد سیستم اختلاط در آزمایشگاه اطمینان حاصل کرد.

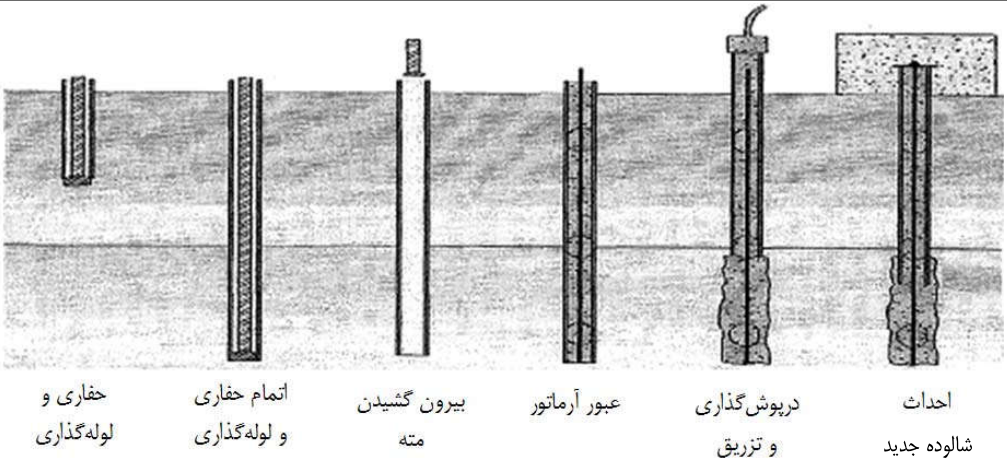
با اختلاط خاک در محل می‌توان انواع متفاوت خاکها را اصلاح نمود. روش اصلاح بسته به میزان انرژی اختلاط و نوع مواد افزودنی متفاوت است. در خاک‌های نرم این روش در مقایسه با سایر روش‌های اصلاح خاک از اقتصادی‌ترین شیوه‌های بهبود است. در این روش با اختلاط دوغاب با خاک، مصالحی ساخته می‌شود که با گذشت زمان سخت‌تر شده و مقاومت آن افزایش می‌یابد و می‌تواند بعنوان مصالح مهندسی با خصوصیات ژئوتکنیکی بهتر از خاک محل در طراحی‌ها استفاده شود.

I- اجرای ریز شمع (Micro Pile)

ریزشمع‌ها، شمع‌هایی با قطر ۱۰۰ تا ۲۰۰ میلیمتر هستند که می‌توانند به صورت عمودی یا مایل در اطراف و جسم شالوده ایجاد شوند. در صورتیکه به علت محدودیت‌های فضایی در نزدیکی شالوده موجود نتوان از شمع برای افزایش ظرفیت باربری پی استفاده نمود می‌توان از ریز شمع‌ها به جای شمع استفاده کرد. با اجرای ریز شمع‌ها بدلیل نفوذ دوغاب سیمان در خاک، خواص مکانیکی خاک بهبود یافته و ظرفیت باربری آن افزایش می‌یابد. همچنین ریزشمع‌ها در عمقی بیشتر از عمق شالوده نفوذ کرده و بارها را به عمقی بیشتر منتقل می‌کنند.

روش اجرای ریزشمع مشتمل بر ۴ مرحله حفاری، لوله‌کوبی، تزریق و تسلیح به شرح زیر است (شکل ۲-۲-۱۱):

- در صورتیکه امکان کوبش لوله‌های ریزشمع نباشد، باید حفاری سوراخ به قطر ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلیمتر انجام شود. عملیات حفاری به روشهای مختلف نظیر حفاری دورانی انجام می‌شود.

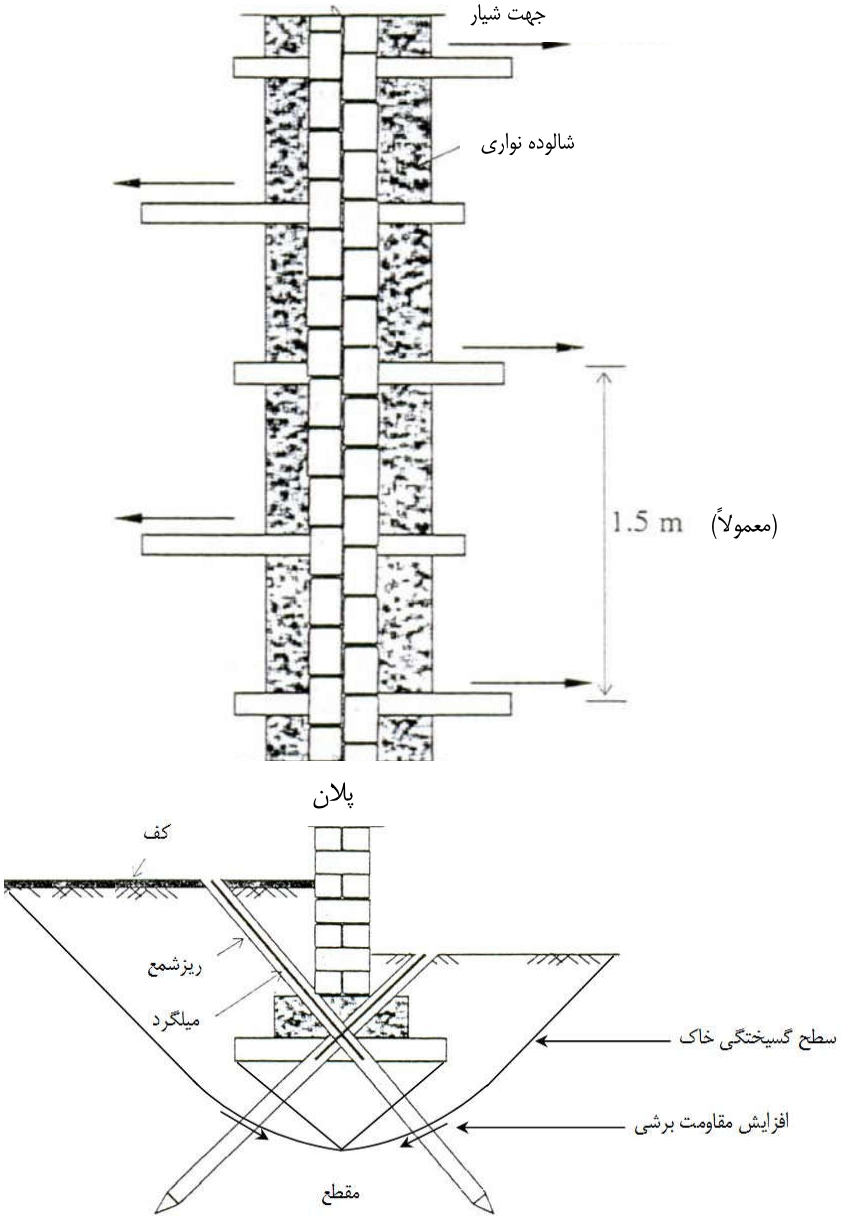


شکل ۲-۲-۱۱- مراحل اجرای ریزشمع

- قراردادن یاکوبش لوله‌های مشبک فولادی به قطر ۱۵۰ تا ۲۰۰ میلیمتر در محل گمانه‌های حفاری شده. در این راستا ابتدا لوله نوک تیزی کوبیده شده و سپس لوله‌های متوالی به آن متصل شده و کوبیده می‌شوند. در صورتیکه در ازای ۳۰ ضربه متوالی لوله‌کوب، نفوذ لوله بیش از ۱۰ سانتیمتر نباشد، عملیات متوقف می‌شود. لوله‌های ریز شمع دارای سوراخهای به قطر

حدود ۸ تا ۱۰ میلیمتر هستند. درصورت انجام حفاری، کوبیدن لوله لازم نیست و لوله‌ها درون سوراخ حفاری شده فرو برده می‌شوند.

- اطراف لوله‌های مشبک با سنگدانه‌های شنی به قطر حدود ۱۰ میلیمتر بعنوان یک لایه فیلتر پر می‌شود.
- قراردادن آرماتور لازم بصورت میلگرد تک یا گروهی.
- درپوش گذاری (فلنج) جهت تامین اتصال مناسب بین ریز شمع و بتن شالوده.
- انجام تزریق دوغاب سیمان تحت فشار: فشار تزریق در مراحل مختلف تزریق، در اعماق مختلف و متناسب با جنس زمین و شرایط ژئوتکنیکی پی متغیر بوده و به حداکثر ۱۰ اتمسفر محدود می‌گردد. نسبت آب به سیمان در محدوده ۰/۵ تا ۱/۵ و مقدار سیمان مصرفی معمولاً حدود ۱۰۰ کیلوگرم به ازاء هر متر ریز شمع است.



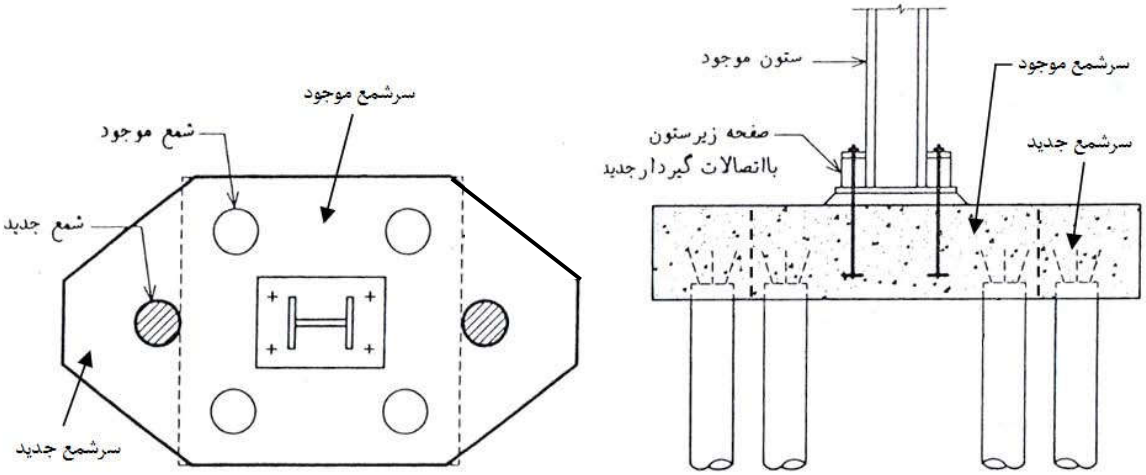
شکل ۲-۲-۱۲- افزایش مقاومت ژئوتکنیکی پی با استفاده از ریز شمع

در شکل ۲-۲-۱۳ تصویری از اجرای ریزشمع نشان داده شده است.

شکل ۲-۲-۱۳- استفاده از ریز شمع برای بهسازی شالوده و پی

II- احداث شمع

به منظور افزایش ظرفیت باربری ژئوتکنیکی و سازه‌ای شمع‌های موجود، می‌توان با احداث شمع‌های جدید و اتصال آنها به سرشمع موجود، به ظرفیت فشاری، کششی و خمشی گروه شمع موجود اضافه نمود (شکل ۲-۲-۱۴).



شکل ۲-۲-۱۴- افزایش باربری ژئوتکنیکی با استفاده از اجرای شمع

III - انتقال بار شالوده به لایه‌های باربر تحتانی به کمک شمع (پی‌بندی کردن)

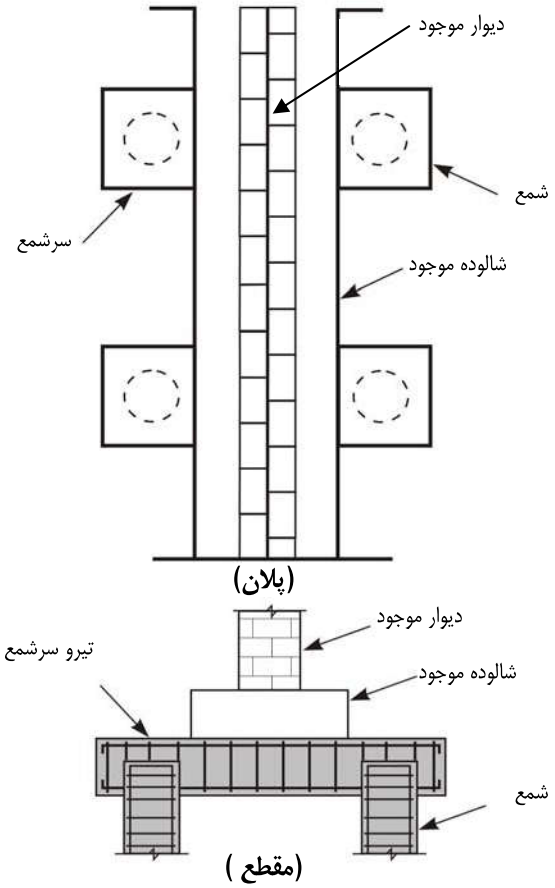
در صورتیکه شالوده موجود بر روی خاکی با ظرفیت کم احداث شده باشد، با استفاده از این روش می‌توان بارهای روسازه را به لایه‌های تحتانی خاک که دارای شرایط مناسبتری می باشند، منتقل نمود.

مراحل اجرای شمع زیر شالوده

مراحل اجرای شمع زیر شالوده مطابق زیر می‌باشد:

۱. کندن پیرامون شالوده از روی زمین تا قسمت زیرین شالوده

شکل ۲-۲-۱۵- مراحلی از احداث شمع های جدید و اتصال آن به شالوده



شکل ۲-۲-۱۶- نحوه قرارگیری شمع‌ها زیر شالوده نواری

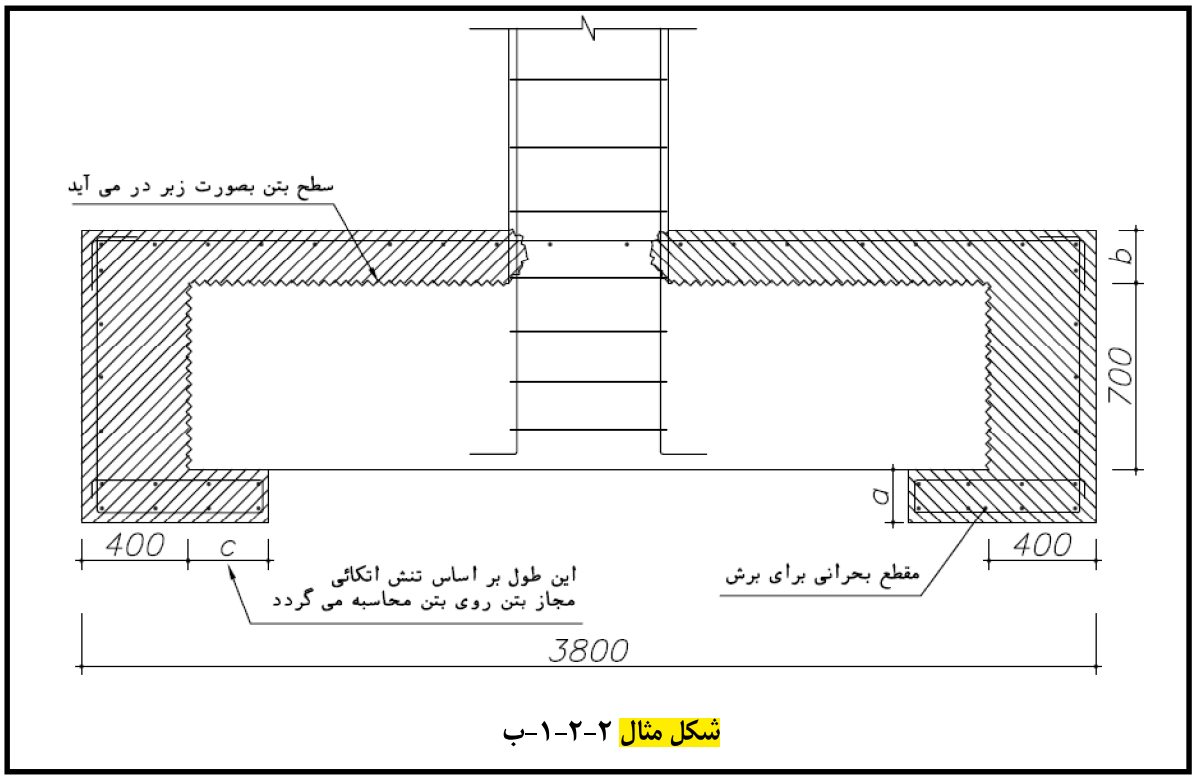
تعیین ضخامت a:

ضخامت a باید مقداری باشد تا قادر به حمل بار اضافه شده باشد.

$$V_u = 1.5 \times 120 = 180 ton$$

$$v_c = \frac{180 \times 10^3}{4 \times 300 \times (a-5)} = 6 \rightarrow a - 5 = \frac{180 \times 10^3}{4 \times 300 \times 6}$$

$$a = 30 cm$$



شکل مثال ۲-۲-۱-ب

تعیین ضخامت b:

برای تعیین ضخامت b باید:

الف: ضخامت کل برای انتقال برش سوراخ کننده کافی باشد.

ب: آرماتور موجود برای تحمل خمش شالوده کافی باشد.

الف: کنترل ضخامت کل برای انتقال برش سوراخ کننده:

$$P_u = 1.25 \times 145 + 1.5(70 + 120) = 466.25 ton$$

$$V_c = 2 v_c b_o d$$

$$466.25 \times 10^3 = 2 \times 6 \times \left[60 + (60 + b)\right] 4(60 + b)$$

$$466.25 \times 10^3 = 48(60 + b)(120 + b)$$

$$b = 13.02 cm$$

۲-۳- راهکارهای بهسازی دال

دال‌ها عملاً وظیفه تحمل بارهای قائم را دارا می‌باشند ولی چون عملکرد دیافراگم افقی را نیز دارند، باید با اعضای مقاوم جانبی سازه اتصال داشته و از سختی و مقاومت کافی برخوردار باشند.

آسیب‌های دال معمولاً در قسمت‌های نامنظم آن مانند محل برخورد با راه پله، دیوار برشی و یا در نزدیکی بازشوهای کف مشاهده می‌شوند.

اصلاح دال‌ها نسبت به سایر اعضای سازه ساده‌تر می‌باشد و در صورتی که دال به هر دلیلی مقاومت لازم در برابر بارهای وارد بر آن را نداشته باشد می‌توان از روش‌های بسیار ساده‌ای برای بهسازی آن استفاده کرد.

۲-۳-۱- انواع راهکارهای تقویت دال

با توجه به نوع ضعف موجود در دال، راهکارهای مختلفی برای تقویت آن وجود دارد که عبارتند از:

۱- تعمیر موضعی،
۲- افزایش ضخامت دال (از بالا یا پایین)،
۳- اضافه کردن تیرک فولادی،
۴- اضافه نمودن نوارهای فولادی در وجوه دال،
۵- استفاده از مصالح FRP در وجوه دال،
۶- مقاوم‌سازی اتصال دال به دیوار برشی،
۷- بهبود عملکرد دیافراگمی دال.

۲-۳-۱-۱- تعمیر موضعی

برای تعمیر ترک‌های موجود در بتن، مواد پلیمری اپوکسی یا دوغاب سیمان را می‌توان در داخل ترک‌ها تزریق نمود.

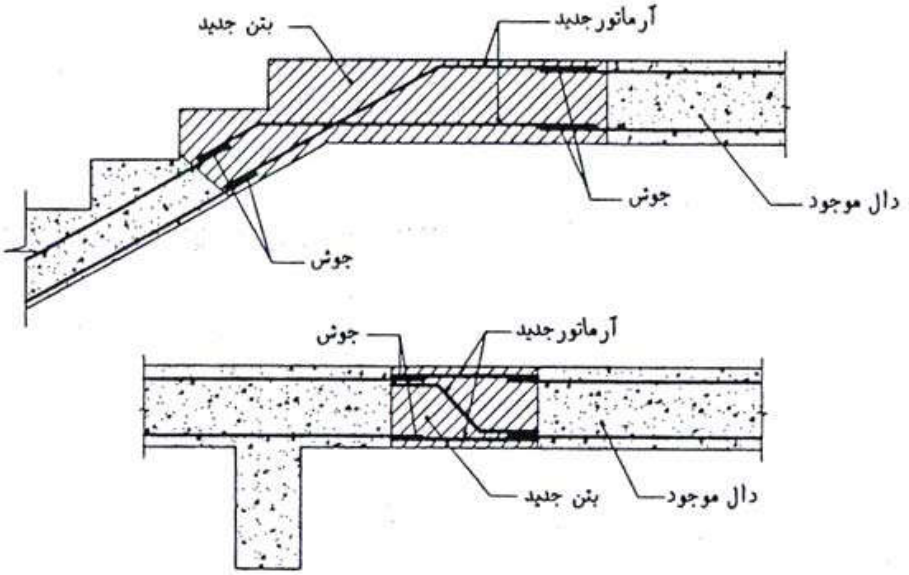
برای خردشدگی بتن و کمانش و شکست میلگردها باید از راهکارهای تعویض استفاده نمود.

تعمیر دال را می‌توان مطابق شکل ۲-۳-۱ انجام داد. بدین گونه که بعد از جدا نمودن مصالح آسیب دیده، آرماتورهای جدید جایگذاری و به آرماتورهای موجود جوش می‌گردند. مشخصات بتن جدید باید شبیه به بتن موجود باشد. در مکان‌هایی که خوردگی شدید باشد، آرماتورهای جدید جایگذاری شده نباید نو و بدون خوردگی باشند، چرا که آرماتورهای جدید و قدیم با یکدیگر تشکیل پیل الکتریکی می‌دهند که این امر منجر به خوردگی شدید آرماتورها می‌گردد.

۲-۳-۱-۲- افزایش ضخامت دال

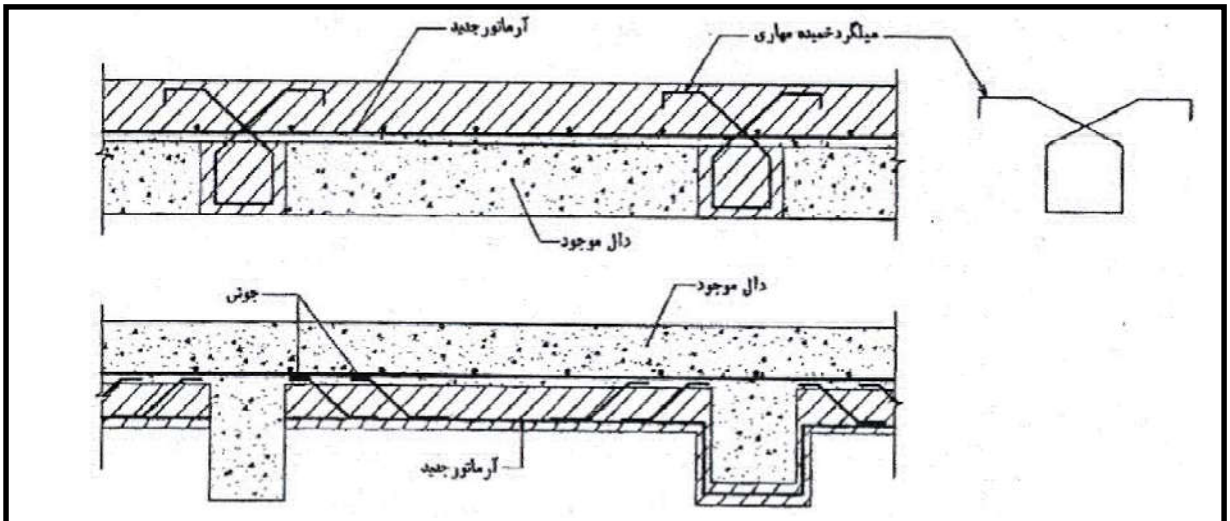
در مواردی که مقاومت و سختی دال کم باشد، با افزایش ضخامت آن می‌توان این عیب را رفع نمود. بتن و میلگردهای جدید بر روی سطح و یا زیر دال موجود می‌تواند اجرا گردد (شکل ۲-۳-۲).

در روشی که افزایش ضخامت از قسمت فوقانی آن صورت می‌گیرد، مقاومت خمشی نیز افـزایش مـی‌یابـد، زیـرا عـلاوه بـر افزایش عمق مؤثر، آرماتورهای منفی نیز اضافه می‌گردند.



شکل ۲-۳-۱- تعمیر موضعی دال‌های کف و راه‌پله

در روش دیگر که افزایش ضخامت از قسمت زیرین دال می‌باشد، مقاومت خمشی به علت افزایش آرماتورهای کششی اضافه می‌گردد.



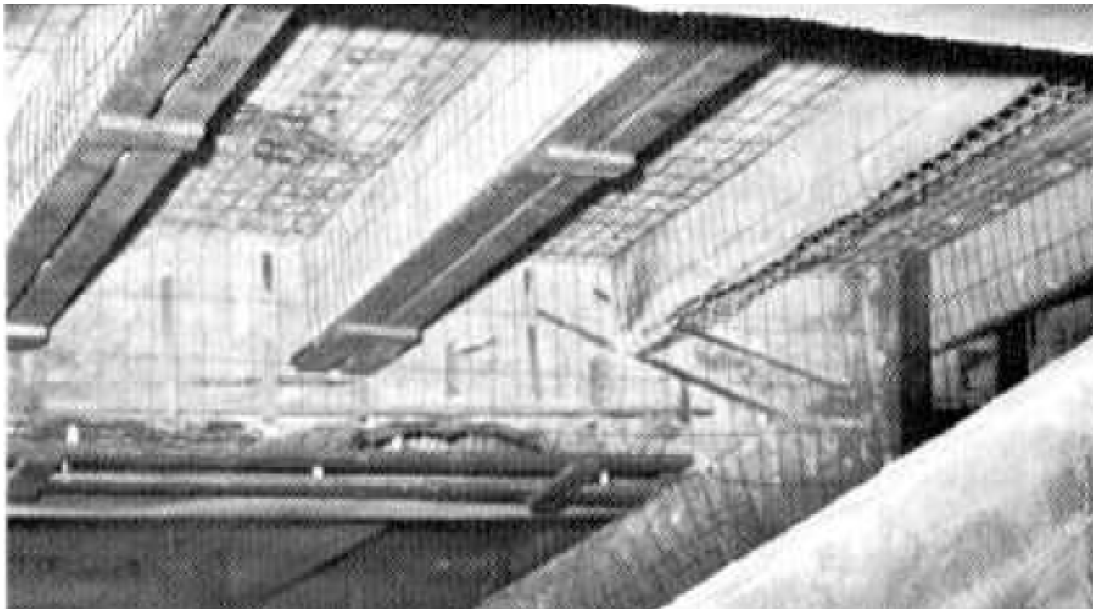
شکل ۲-۳-۲- افزایش ضخامت دال

با بتن‌ریزی معمولی می‌توان ضخامت دال را از قسمت فوقانی افزایش داد، ولی برای افزایش ضخامت دال از قسمت تحتانی آن بهتر است از روش بتن پاشی[1] استفاده نمود.

[1] Shotcrete

با افزایش ضخامت از روی دال، سختی مورد نیاز برای عملکرد دیافراگمی کف نیز افزایش یافته و بـه طـور کلـی ایـن روش نسبت به روش افزایش ضخامت از قسمت تحتانی دال، روش متداول‌تر و آسان‌تری می‌باشد. (شکل ۲-۳-۳)

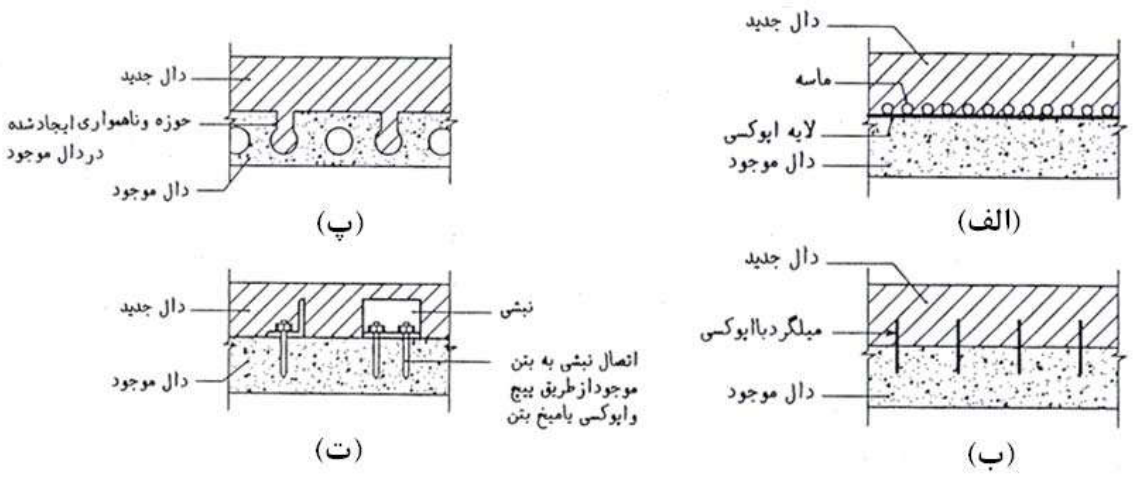
اگر افزایش ضخامت دال از قسمت تحتانی آن صورت گیرد، برای بهبود عملکرد دیافراگمی باید تیرهـا نیـز بـا ژاکـت بتنـی مقاوم‌سازی شوند.



شکل ۲-۳-۳- افزایش ضخامت دال از قسمت تحتانی با شاتکریت

برای یکپارچه نمودن دال موجود با بتن مسلح جدید، بکارگیری وصله برشی لازم است. برای اجـرای وصـله برشـی مناسـب می‌توان روش‌های زیر را بکار برد:

- سطح زبر، که با خرده سنگ و چسب اپوکسی ایجاد شده باشد (شکل ۲-۳-۴-الف).



شکل ۲-۳-۴- روش‌های متداول درگیر نمودن بتن جدید و قدیم در راهکار افزایش ضخامت دال

- میلگرد میخچه‌ای فولادی (شکل ۲-۳-۴-ب).
- بتن‌های اضافی که در داخل فضاهای خالی ایجاد شده در دال اصلی قلاب می‌شوند (شکل ۲-۳-۴-پ).
- پروفیل نبشی که با میخچه فلزی اجرا می‌شود و میخچه‌ها با چسب اپوکسی یا بصورت رول‌پلاک به بتن قدیم متصل می‌شود. وجود نبشی منجر به یکپارچه شدن بتن قدیم و جدید می‌گردد (شکل ۲-۳-۴-ت).

زبر نمودن سطح بتن اصلی بصورت کاملاً مشخصی چسبندگی بین بتن اصلی و جدید را افزایش می‌دهد. این عمل را می‌توان با ماسه‌پاشی[1]، جت آب و یا تراشیدن سطح بتن انجام داد.

۲-۳-۱-۳- اضافه کردن تیرک فولادی

از روش‌های سنتی و بسیار موثر تقویت دال، اضافه نمودن تیرک فولادی می‌باشد. از مزایای آن می‌توان به سادگی اجرا، عدم افزایش وزن دال، افزایش ارتفاع موثر دال، کاهش ارتعاش کف، ایجاد خیز معکوس برای رفع افتادگی و افزایش سختی دیافراگم کف اشاره نمود (شکل ۲-۳-۵). اضافه کردن تیرک فولادی باید به گونه‌ای انجام شود که با رفتار طبیعی دال هماهنگ باشد.

برای تیرک فولادی آرایش‌های متفاوتی می‌توان در نظر گرفت:

الف – آرایش موازی که در این حالت تیرک‌ها بصورت یکطرفه عمل می‌نمایند.

ب – آرایش متقاطع که تیرک ها عمود بر یکدیگر بصورت (+) در زیر دال قرار داده می‌شوند.

شکل ۲-۳-۵- اضافه کردن تیرک فولادی

مراحل اجرای تیرک فولادی مطابق زیر می‌باشد:

۱- نصب صفحه تکیه‌گاهی برای اجرای تیرک فلزی.

[1] Sandblast

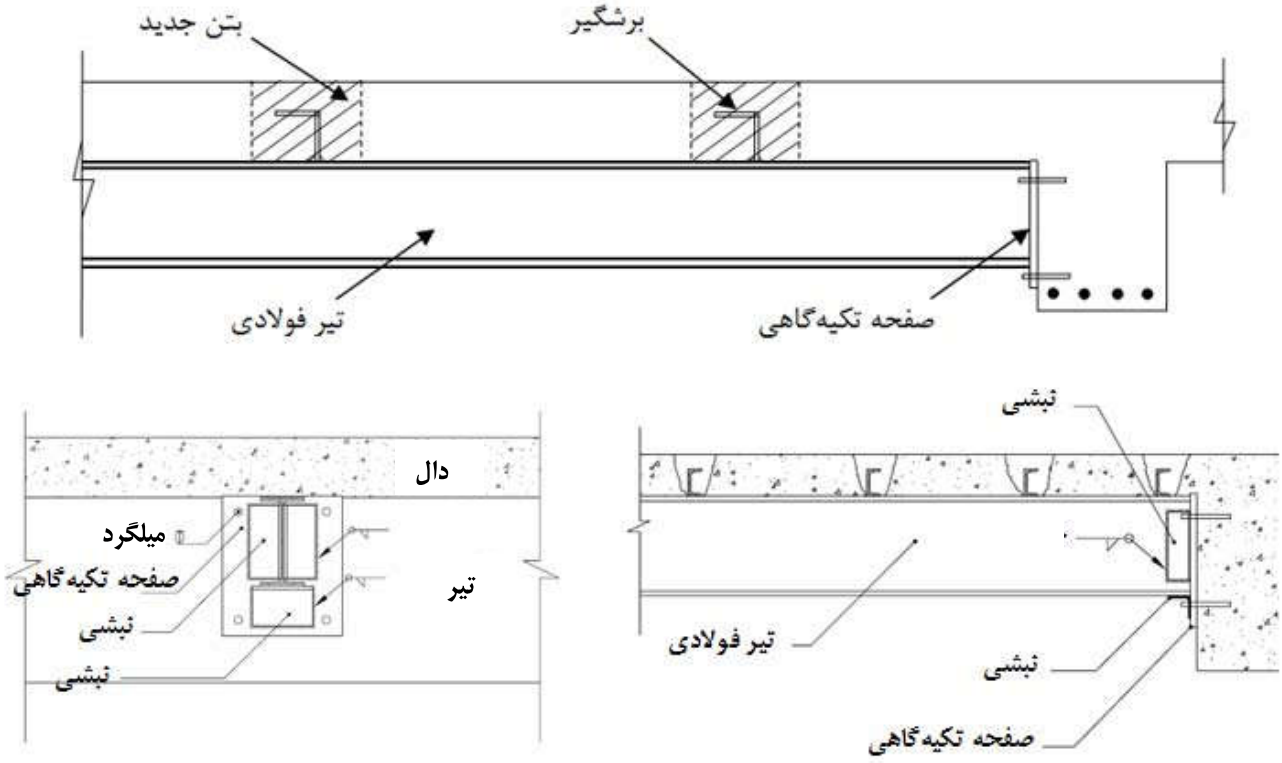
۲- نصب تیرک فلزی در محل.

۳- جک زدن زیر تیرک بطوریکه آنرا محکم به دال بچسباند و حتی خیز اولیه‌ای در دال ایجاد نماید. در این حالت باربرداری کامل یا ناقص از دال صورت می‌گیرد.

۴- نصب اتصالات برشگیر و بتن ریزی در اطراف آن.

۵- تکمیل اتصال تکیه‌گاهی تیرک.

جزئیات اجرایی تیرک فولادی در شکل ۲-۳-۶ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳-۶- جزئیات اجرایی تیرک فولادی

۲-۳-۱-۴- اضافه نمودن نوارهای فولادی

یکی دیگر از روش‌های افزایش مقاومت دال، اضافه نمودن ورق‌های فولادی از طریق چسباندن و یا بولت کردن آنها در وجوه افقی دال می‌باشد. در شکل ۲-۳-۷ تقویت دال با ورق‌های فولادی نشان داده شده است. در این روش مقاومت خارج از صفحه دال به شکل کاملاً محسوسی افزایش می‌یابد.

بر خلاف روش افزایش ضخامت دال، این روش منجر به افزایش وزن سازه نمی‌گردد و همچنین مشکلاتی را که روش مقاوم‌سازی با تیر فولادی برای معماری ساختمان ایجاد می‌نماید، ندارد. زیرا ضخامت ورق فولادی نسبت به ارتفاع تیرک فولادی بسیار کم می‌باشد.

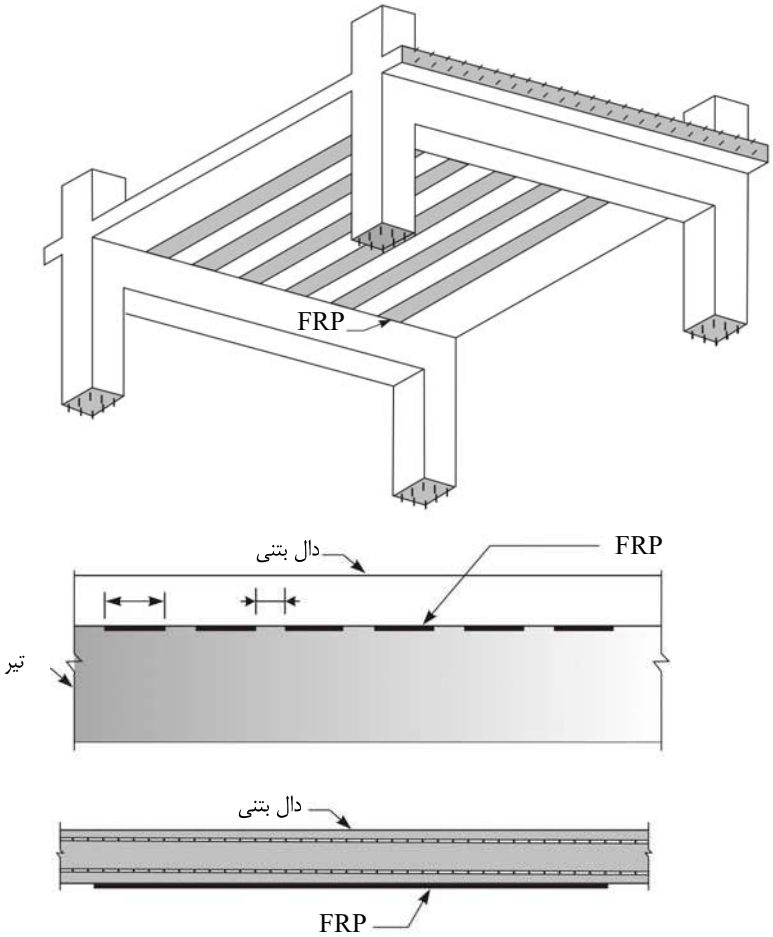
شکل ۲-۳-۷- تقویت دال‌ها با استفاده از ورق‌های فولادی

۲-۳-۱-۵- استفاده از مصالح FRP

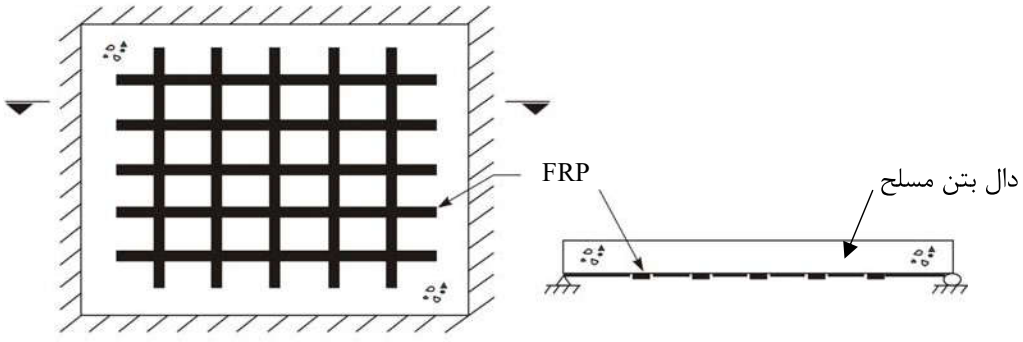
از دیگر راه‌های تقویت خمشی دال‌ها بطور موضعی، استفاده از مصالح FRP می‌باشد. بکارگیری مصالح پلیمری مسلح شده با الیاف بجای مصالح سنتی و شیوه‌های موجود روشی است که امروزه در دنیا متداول می‌باشد. مصالح FRP ضمن سبکی از مقاومت کششی بالائی برخوردار می‌باشند. با وجود قیمت بالای مصالح FRP، نحوه اجرای آن بسیار آسان و ارزان می‌باشد.

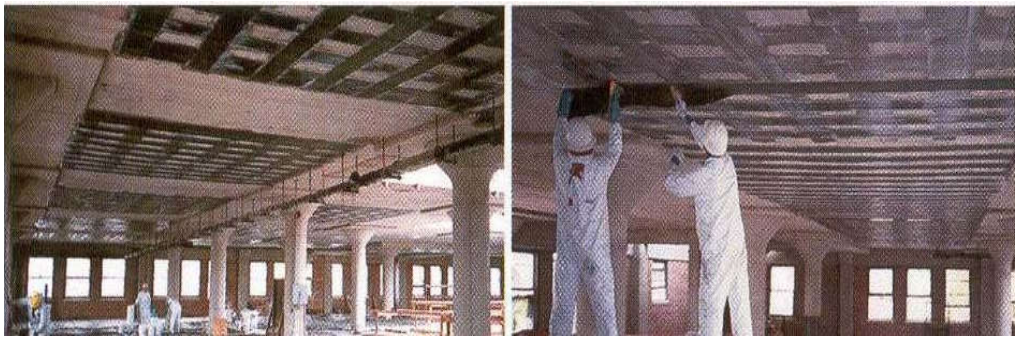
برای مقاوم‌سازی دال‌ها، مصالح مرکب FRP را می‌توان بصورت نوارها و یا صفحاتی بر روی سطوح تحت کشش اجرا نمود. همانگونه که در شکل ۲-۳-۸ نشان داده شده است، دال‌های یک طرفه با تکیه‌گاه ساده را می‌توان با چسباندن نوارها یا صفحات FRP در سطوح تحتانی آنها و در راستای طولی، مقاوم‌سازی نمود.

در دال‌های دو طرفه مقاوم‌سازی با نوارهای FRP مطابق شکل ۲-۳-۹ در هر دو جهت صورت گیرد. البته اگر دال دارای تکیه‌گاه گیردار باشد، نوارهای FRP را باید در قسمت فوقانی دال نیز اجرا نمود.



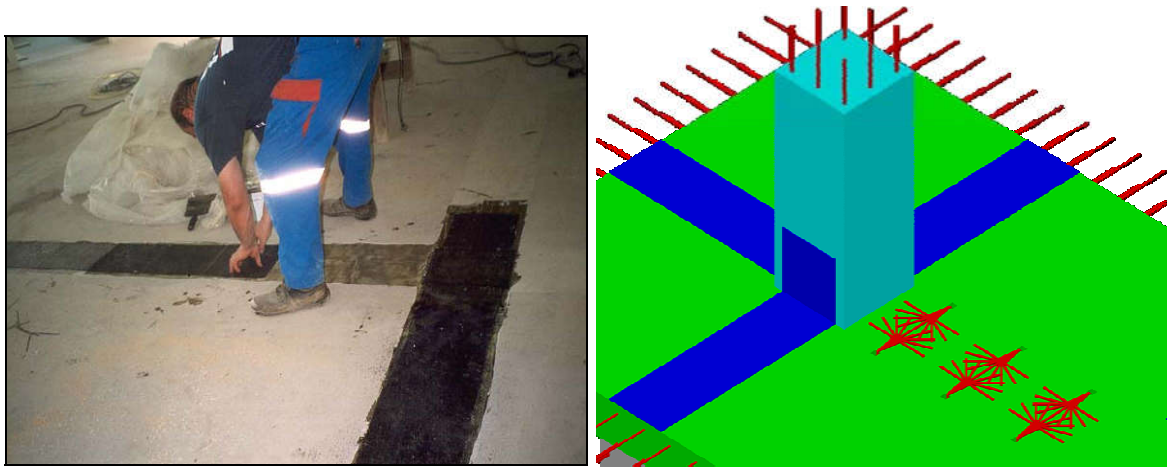
شکل ۲-۳-۸- تقویت خمشی دال با نوارهای FRP در جهت اصلی



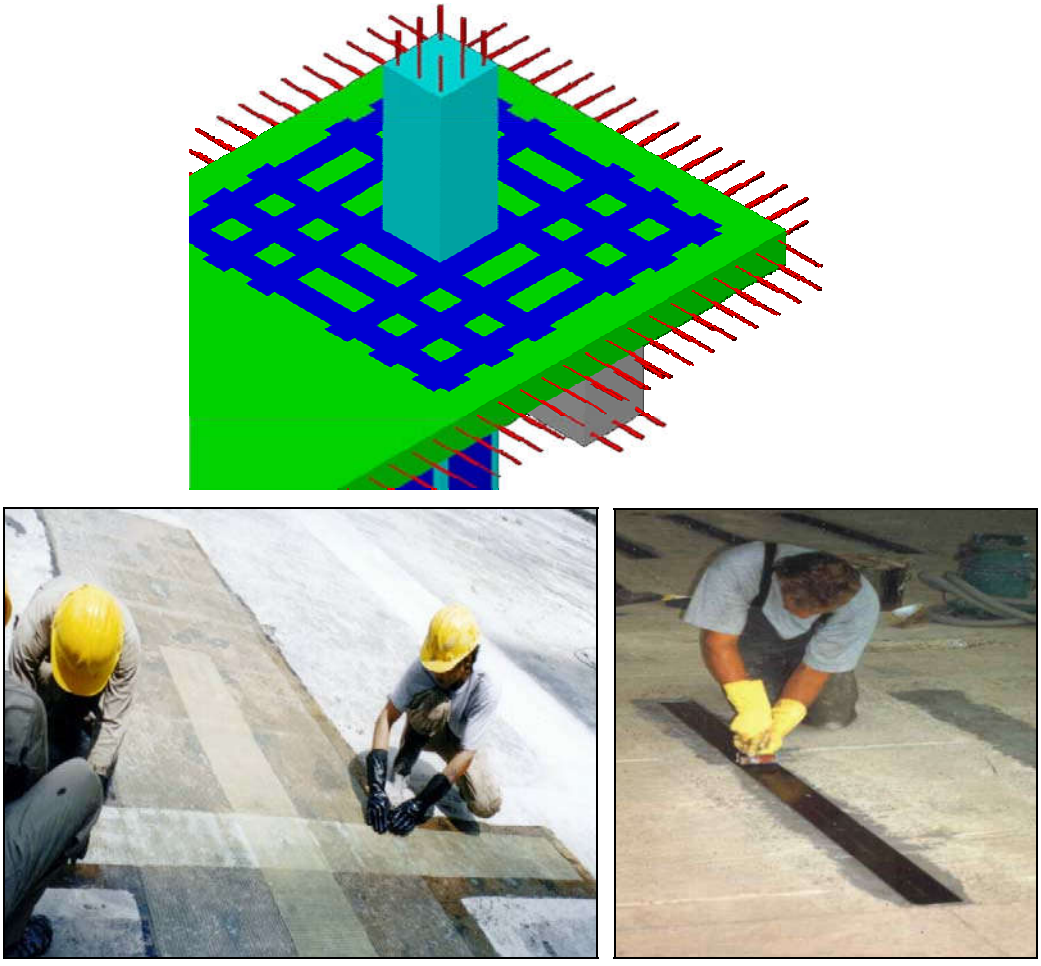


شکل ۲-۳-۹- تقویت دال با نوارهای FRP در دو جهت

در صورت وجود تکیه‌گاه گیردار در لبه‌های دال و ایجاد لنگر منفی در مقطع آن، می‌توان مطابق شکل ۲-۳-۱۰ و ۲-۳-۱۱ از نوارهای FRP در وجه فوقانی دال استفاده نمود.

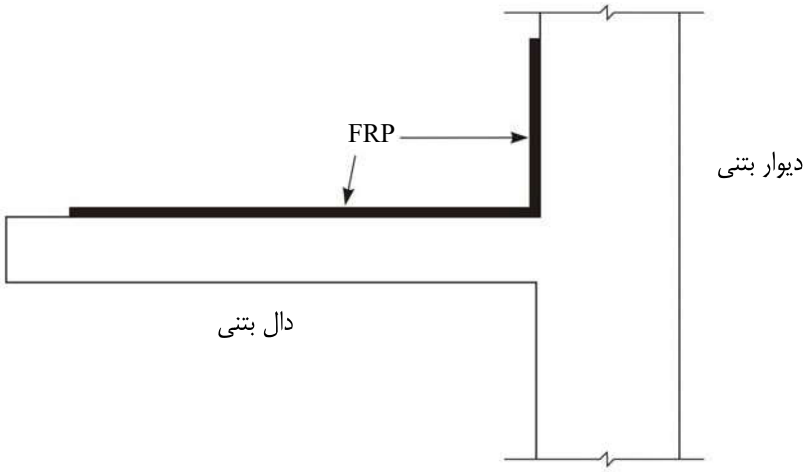


شکل ۲-۳-۱۰- تقویت دال با استفاده از نوارهای FRP در نواحی لنگر منفی



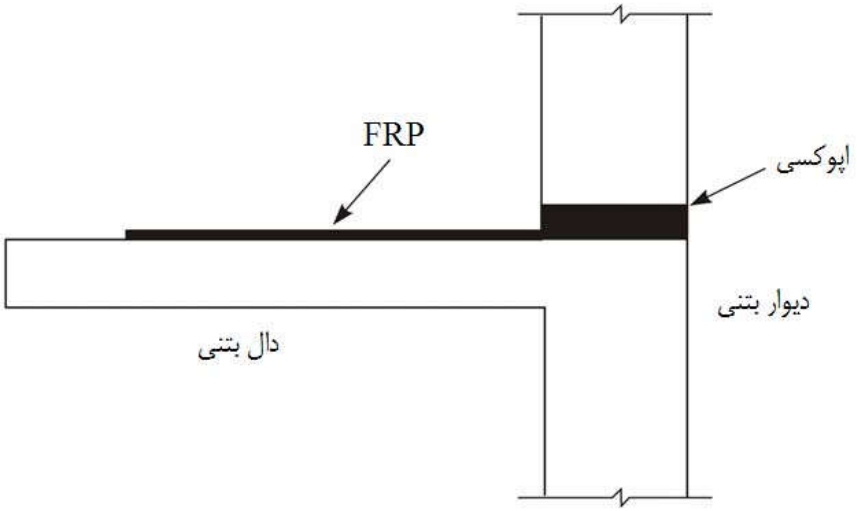
شکل ۲-۳-۱۱- مقاوم‌سازی دال در لنگرهای منفی بوسیله FRP

در دال‌هایی که بصورت طره‌ای به دیوار برشی متصل شده باشند، برای مهاربندی و مقاوم‌سازی اتصال دال بـه دیـوار برشـی می‌توان نوار یا صفحه FRP را تا قسمتی از سطح دیوار بالا برده تا به آن چسبانده شود (شکل ۲-۳-۱۲).



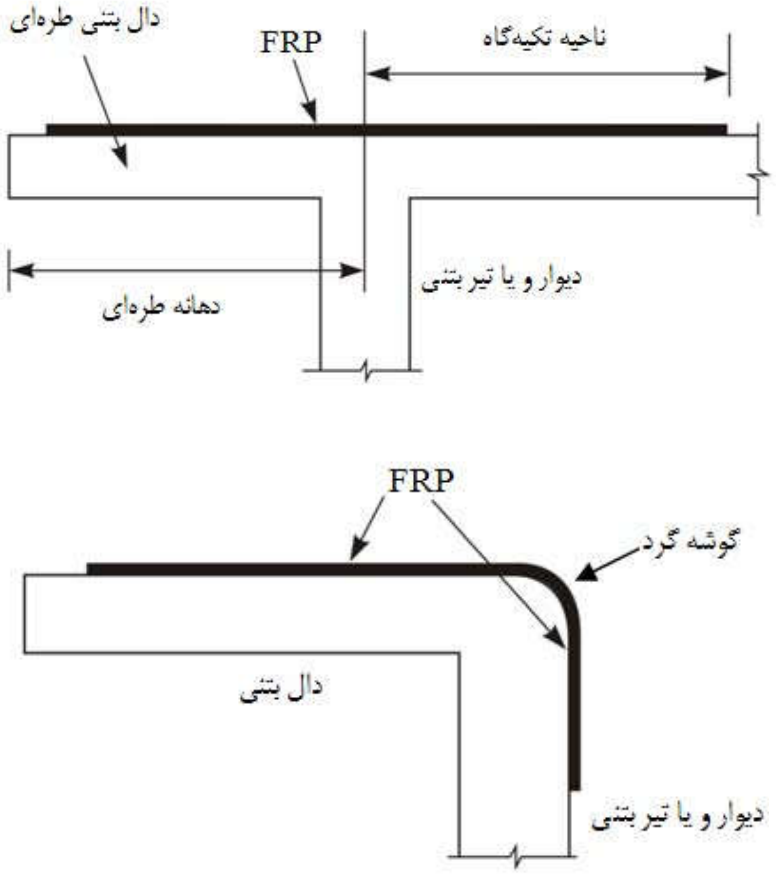
شکل ۲-۳-۱۲- تأمین طول مهاری با امتداد FRP به روی دیوار

راه موثرتر برای مهاربندی قسمت‌های طره‌ای، هدایت نوارهای FRP به درون سوراخ‌هایی است کـه از قبـل در دیـوار تعبیـه شده باشد (شکل ۲-۳-۱۳).

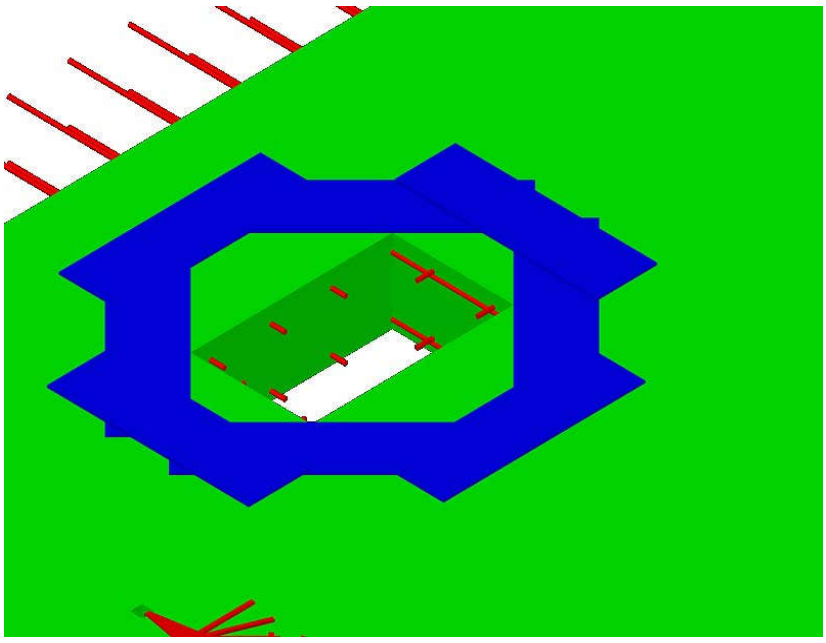


شکل ۲-۳-۱۳- تأمین طول مهاری با امتداد FRP در داخل اتصال

سایر روش‌های تأمین طول مهاری FRP روی دال‌ها در شکل ۲-۳-۱۴ نشان داده شده است. اطراف بازشوهای دال را نیز می‌تـوان بانوار و یا صفحات FRP تقویت نمود. نمونه‌ای از این روش در شکل ۲-۳-۱۵ نشان داده شده است.



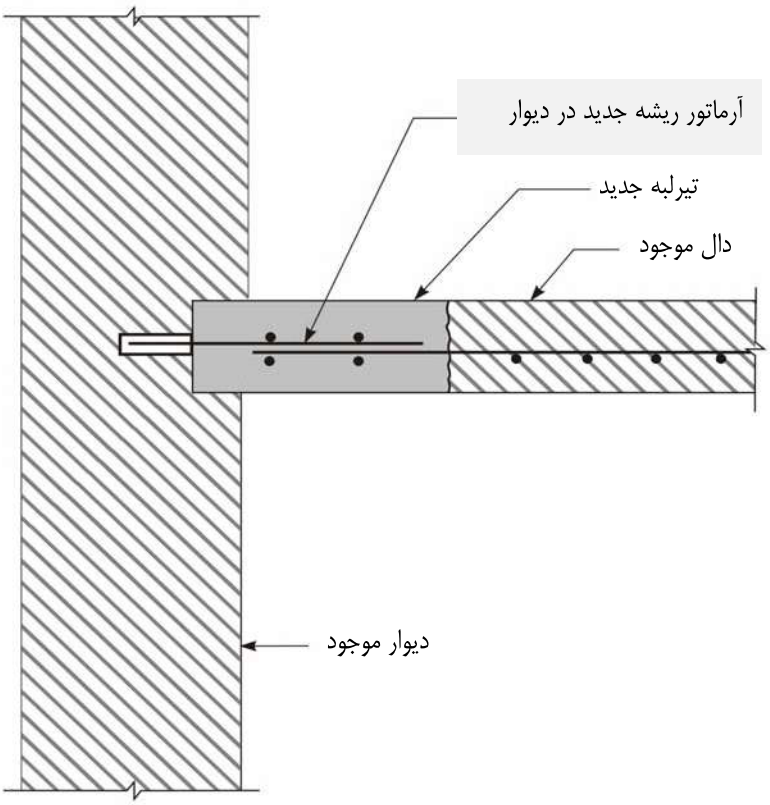
شکل ۲-۳-۱۴- سایر روش‌های تأمین طول مهاری با امتداد FRP روی دال‌ها



شکل ۲-۳-۱۵- تقویت اطراف بازشوهای دال با FRP

۲-۳-۱-۶- مقاوم‌سازی اتصال دال به دیوار برشی

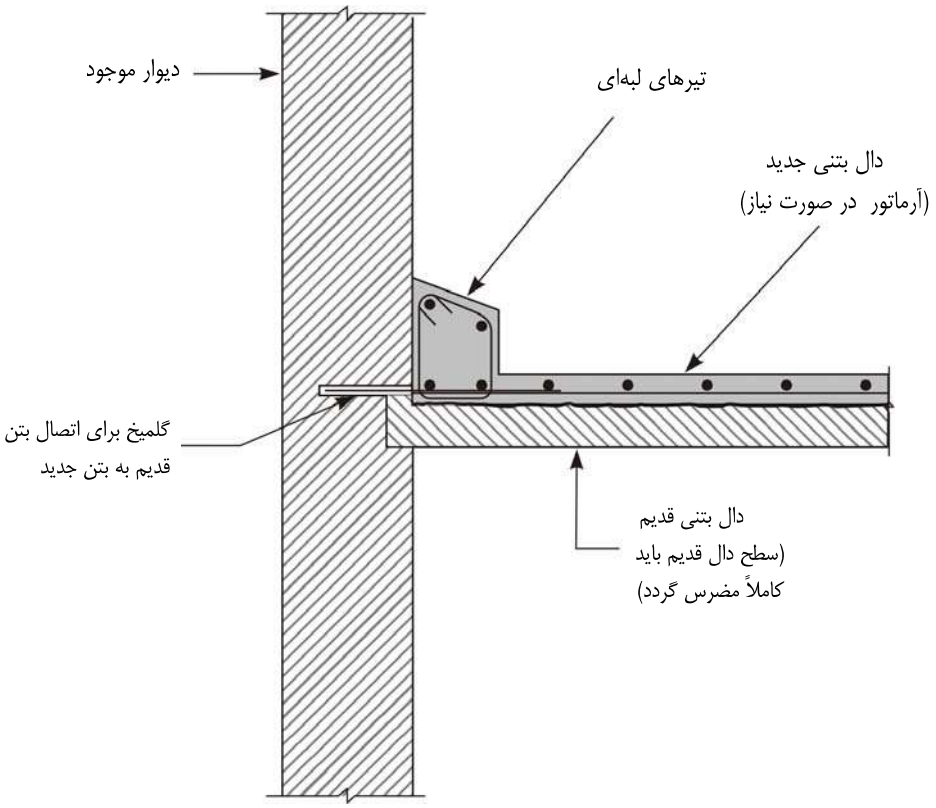
همان گونه که در قسمت‌های قبلی نیز بدان اشاره شد، آسیب‌های دال بیشتر در قسمت‌های نامنظم آن، مانند محل اتصال دال به دیوار برشی مشاهده می‌شوند. از سویی بدلیل اینکه دال‌ها باید به عنوان دیافراگم افقی با تمام المان‌های مقاوم جانبی نیز اتصال داشته باشند، لذا وجود اتصالی قوی بین دال و دیوار برشی ضروری است. بهسازی اتصال دال به دیوار را می‌توان به کمک میلگردهای اتصال (میلگرد ریشه) مطابق شکل ۲-۳-۱۶ انجام داد.



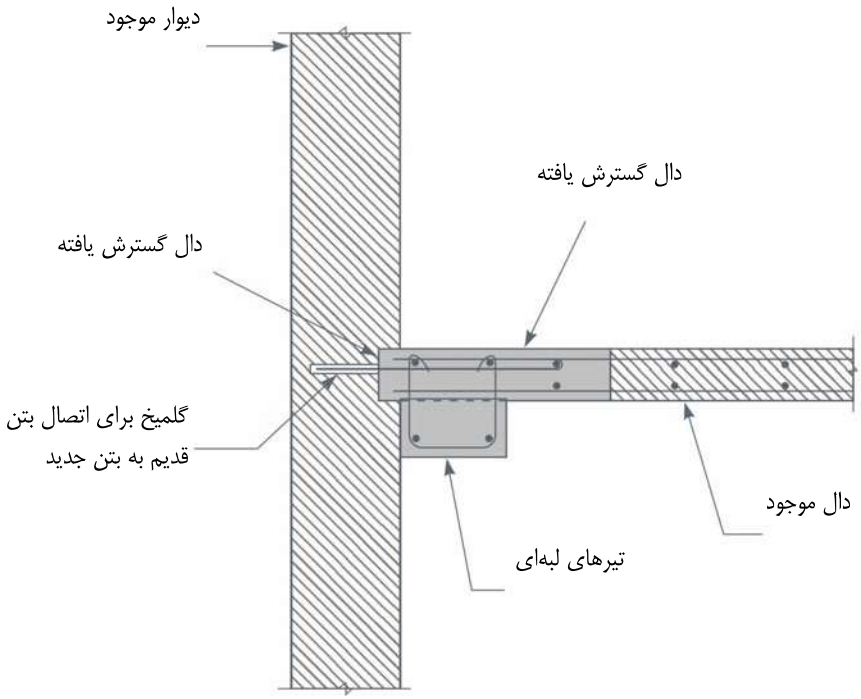
شکل ۲-۳-۱۶- بهسازی دال با اضافه کردن تیر لبه‌ای

پس از ایجاد شکاف در دال و قسمت‌هایی از دیوار، سوراخ‌هایی در دیوار تعبیه می‌گردند به گونه‌ای که بتوان میلگردهای ریشه را از طریق این سوراخ‌ها توسط چسب اپوکسی به دیوار متصل نمود. سپس شکاف موجود با بتن قوی منبسط شونده‌ای پر می‌گردد تا از عملکرد صحیح اتصال اطمینان حاصل گردد.

یکی دیگر از روش‌های تقویت اتصال دال به دیوار برشی اضافه کردن تیرهای لبه‌ای و تقویت در نواحی مرزی می‌باشد. در این روش می‌توان قسمت مرزی دال و دیوار را تخریب و با کاشت آرماتور، تیرهای لبه‌ای ایجاد نمود. تیر لبه‌ای را می‌توان در قسمت فوقانی دال (شکل ۲-۳-۱۷) و یا تحتانی آن (شکل ۲-۳-۱۸) اجرا نمود.

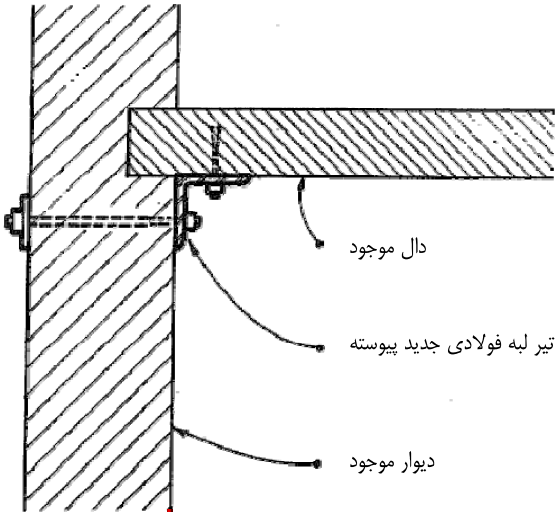


شکل ۲-۳-۱۷- بهسازی دال با اضافه کردن تیر لبه‌ای از بالا



شکل ۲-۳-۱۸- بهسازی دال با اضافه کردن تیر لبه‌ای از پایین

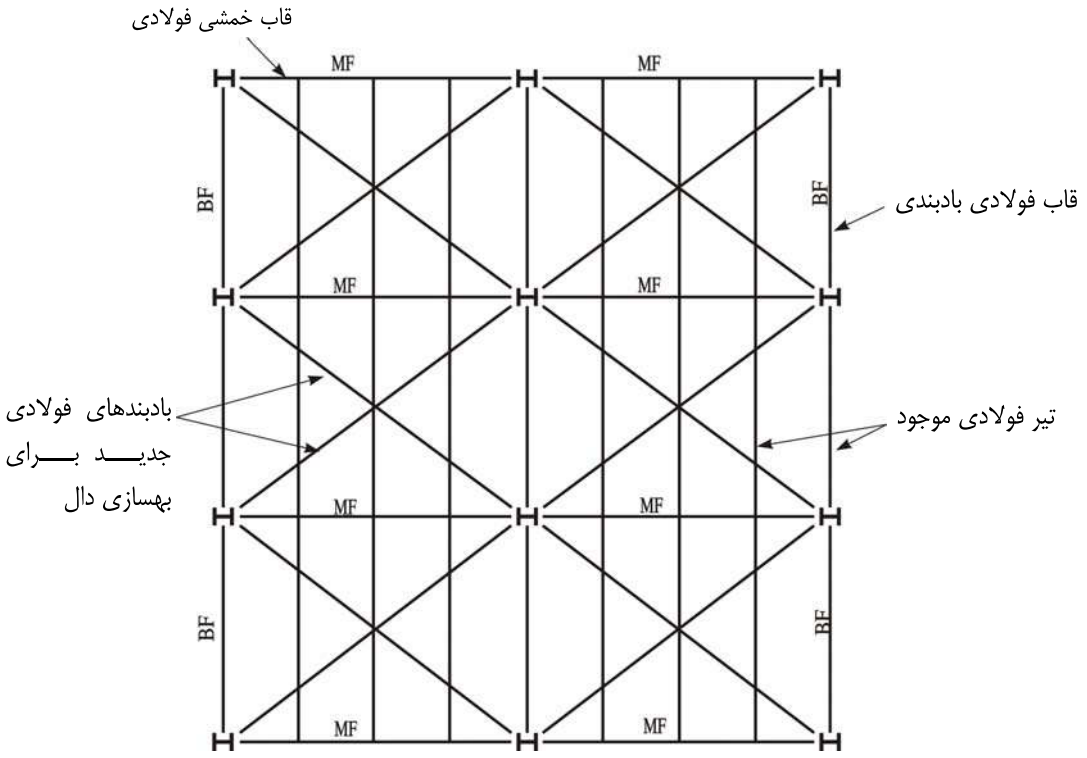
روش دیگر برای مقاوم‌سازی اتصال دال به دیوار برشی، پیچ نمودن نبشی در محل تماس دال با دیوار می‌باشد. این روش برای سیستم‌های پیش‌ساخته نیز بسیار مناسب می‌باشد (شکل ۲-۳-۱۹).



شکل ۲-۳-۱۹- بهسازی اتصال دال و دیوار پیش ساخته

۲-۳-۱-۷- بهبود عملکرد دیافراگمی دال

از مواردی دیگری که می‌توان در بهسازی دال‌ها به آن اشاره کرد، تقویت دال برای بهبود عملکرد دیافراگمی آن می‌باشد. دال‌ها علاوه بر تحمل بار قائم، وظیفه انتقال بارهای جانبی را نیز بر عهده دارند. بدین منظور می‌توان راهکارهایی مانند اضافه نمودن مهاربند افقی برای اصلاح سختی دیافراگم و یا بهسازی بازشوهای موجود در دال را بکار گرفت (شکل ۲-۳-۲۰).



شکل ۲-۳-۲۰- بهسازی دیافراگم‌ها بوسیله مهاربندهای افقی

۲-۴- راهکارهای بهسازی تیرها

تیرها عموماً بصورت افقی و یا شیبدار در سازه قرار می‌گیرند و بارهای قائم وارده بر محور خود را به ستون‌ها منتقل می‌نمایند. در سازه‌های با قاب خمشی، تیرها علاوه بر تحمل بارهای ثقلی باید بارهای جانبی ناشی از زلزله را نیز تحمل نمایند.

در زلزله‌های شدید ستون‌ها نباید آسیبی ببینند و مفصل‌های خمیری خمشی و برشی باید به تیرها و یا بادبندها منتقل شوند بدین منظور به هنگام مقاوم‌سازی، همواره تیر مقاوم‌سازی شده نباید قویتر از ستون متصل به آن باشد.

معایب تیرها بر اثر طراحی نادرست، جزئیات ناقص، ساخت نامناسب و کیفیت پایین مصالح می‌باشد.

بر اساس نوع تیر (بتنی یا فولادی) و معایب آن روش‌های متعددی برای بهسازی تیرها وجود دارد که در ادامه به آن پرداخته شده است. عوامل مؤثر در انتخاب طرح مقاوم‌سازی تیر عبارتند از:

- میزان دسترسی به تیر در محل (دسترسی به کل محیط تیر)،
- وضعیت بارهای وارده (بارهای یکنواخت، بارهای متناوب و رفت و برگشتی)،
- میزان افزایش مقاومت برشی و خمشی مورد نیاز،
- دسترسی به انواع مصالح برای مقاوم‌سازی،
- ملاحظات اقتصادی.

در برخی موارد ارزانترین روش، بهترین انتخاب است اما گاهی اوقات کار باید در کوتاهترین زمان ممکن تمام شود. در بعضی از موارد ابعاد هندسی مقاطع نباید بزرگ شود و گاهی نیز از مصالحی باید استفاده نمود که دوام بالا و مقاومت خوبی در برابر خوردگی دارند.

۲-۴-۱- تیرهای بتن مسلح

شکست‌های برشی و خمشی، دو حالت عمده شکست در تیرهای بتن مسلح می‌باشند. شکست خمشی عموماً نسبت به شکست برشی، ارجح است زیرا رفتار شکل‌پذیرتری از خود نشان می‌دهد. شکست نرم امکان پخش مجدد تنش را فراهم می‌آورد و به کاربران و حاضران در محل نیز فرصت بیشتری برای پی‌بردن به وضعیت بحرانی تیر می‌دهد.

همچنین خرابی تیر بتن مسلح می‌تواند به علت تهاجم یون‌های شیمیایی صورت بگیرد. در شکل ۲-۴-۱ خرابی تیرها در اثر تهاجم یون‌های شیمیایی و تأثیر نیروهای لرزه‌ای نشان داده شده است.

برای تقویت تیرهای بتن مسلح می‌توان از راهکارهای زیر استفاده نمود:

۱- روکش بتن مسلح

۲- روکش فولادی

۳- روکش FRP

۴- پیش‌تنیدگی خارجی

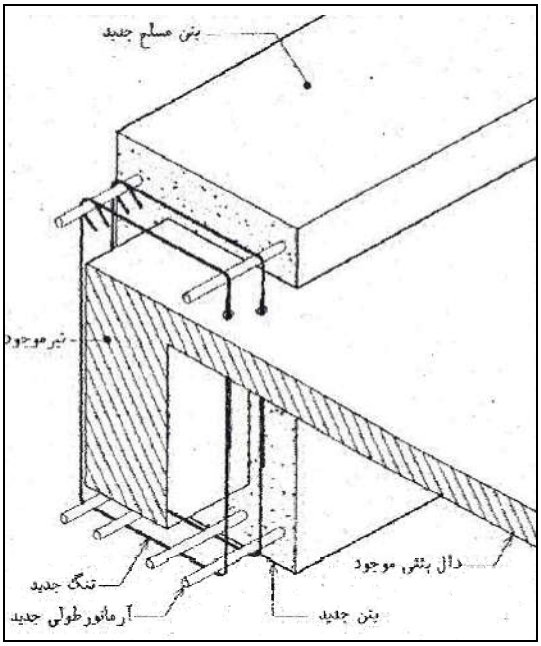
هر یک از روش‌های فوق به تفکیک در زیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

شکل ۲-۴-۱- نمونه‌هایی از آسیب‌دیدگی تیرهای بتنی

۲-۴-۱-۱- روکش بتن مسلح

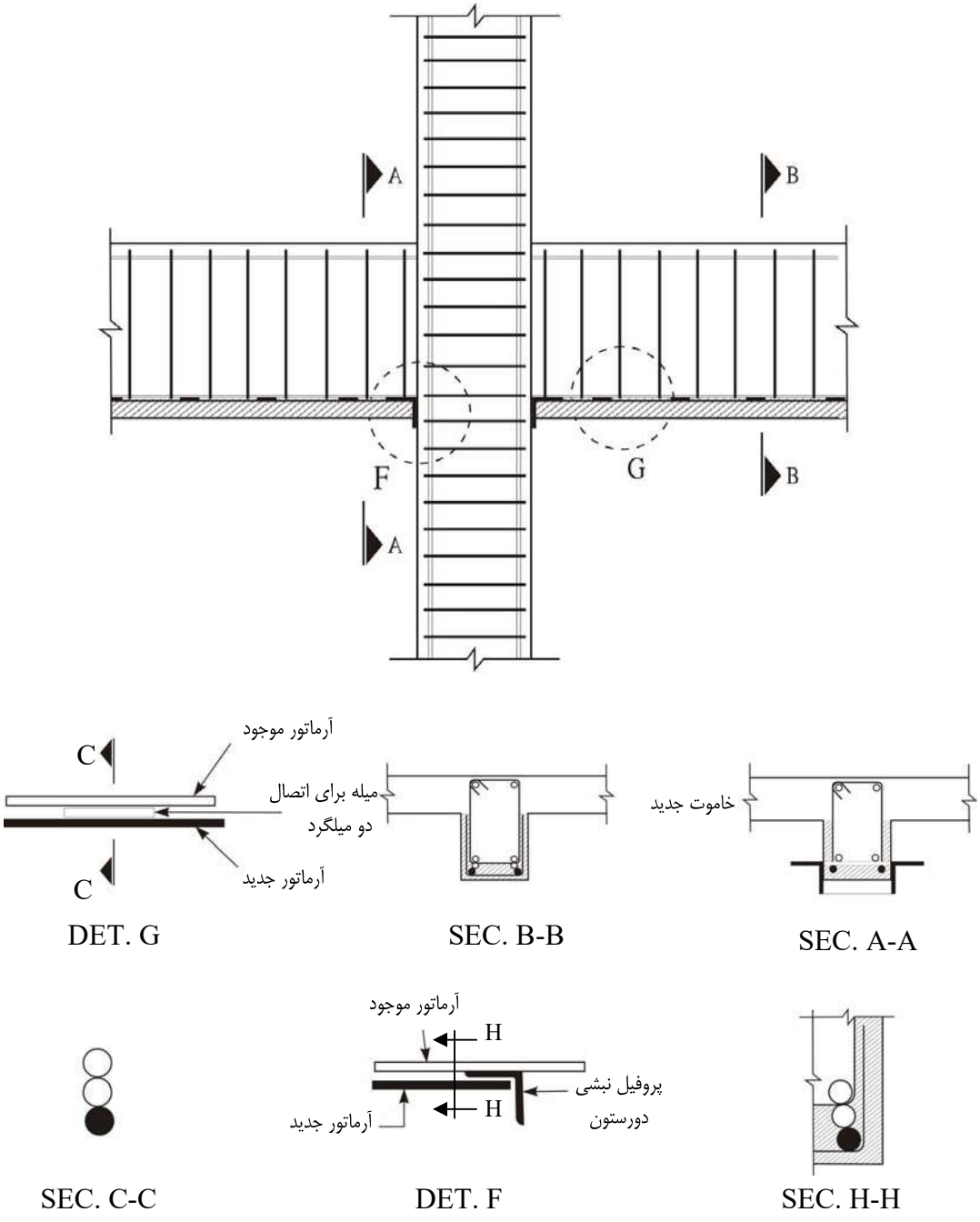
در تیرها می‌توان از روکش بتنی در سه و یا چهار وجه تیر برای بهسازی و افزایش مقاومت آن استفاده نمود. با این روش می‌توان ناحیه کششی و فشاری تیر را با روکش‌های بتنی جدید تقویت کرد.

برای تکمیل مکانیسم انتقال نیرو بین مصالح قدیم و جدید، زبر نمودن سطح بتن قدیمی و جوش دادن میلگردهای اتصال با آرماتورهای جدید و قدیم ضروری می‌باشد. اجرای روکش بتنی در هر چهار وجه تیر موثرترین روش برای مقاوم‌سازی تیرهای بتنی می‌باشد. در این شیوه ضخامت بتنی که به وجه بالایی تیر افزوده می‌گردد باید در ضخامت سقف گم شود. اجرای تنگ‌ها نیز از طریق سوراخهایی که در فواصل نزدیک به هم در دال سقف ایجاد می شود امکان پذیر می‌باشد. نمونه‌ای از روکش بتنی در چهار وجه تیر در شکل ۲-۴-۲ نشان داده شده است.

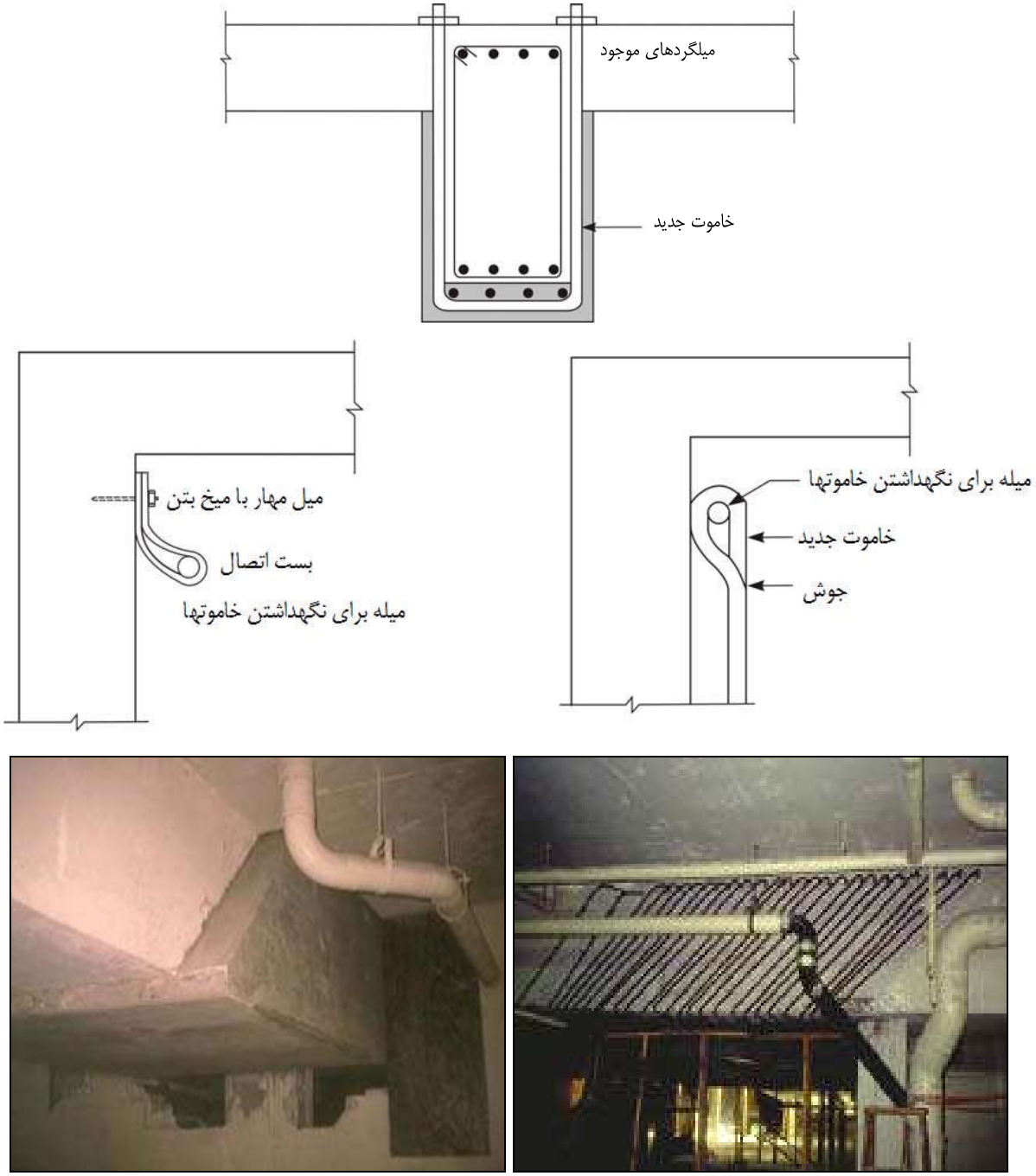


شکل ۲-۴-۲- اجرای روکش بتنی برای افزایش مقاومت تیرهای بتنی

اجرای روکش بتنی در سه وجه تیر برای افزایش ظرفیت خمشی و برشی تیر در برابر بارهای قائم انجام می‌شود، اما به دلیل آنکه در این حالت، افزایش ظرفیت باربری مقاطعی از تیر که در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها قرار دارند امکان پذیر نیست، تیر را نمی‌توان در مقابل بارهای جانبی زلزله تقویت نمود. موفقیت این روش مستلزم مهار مناسب خاموت‌ها از ضلع های بالایی روکش است. به دلیل آنکه استفاده از قالب و ریختن بتن از بالای تیر امکان پذیر نیست تنها راه ممکن استفاده از بتن پاشی می‌باشد. نمونه‌ای از روکش بتنی در سه وجه تیر در اشکال ۲-۴-۳ و ۲-۴-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴-۳- اجرای روکش بتنی در سه وجه تیر



شکل ۲-۴-۴- استفاده از روکش بتنی در مقاوم‌سازی تیرها

مثال ۲-۴-۱

تیر دو سر ساده زیر برای نیروی گسترده نهایی ۱۰۰ KN/m طراحی شده و فواصل تیرها از یکدیگر ۳ متر می‌باشد. در صورتی که بخواهیم آن را برای بار متمرکز اضافی نهایی ۳۰۰ کیلونیوتن افزایش باربری دهیم، مطلوب است طرح تقویت تیر بتن مسلح با روکش بتنی:

تقویت برای برش

از آنجا که با افزایش بار و عدم عملکرد کامل یکپارچه بین بتن قدیم و جدید، احتمال ترک در بتن می‌رود، از مقاومت V_c در طراحی صرفنظر می‌شود.

تقویت $V_u = 380 - V_s$ (خاموت) =380-149.5=230.5KN

$$V_s = 230.5 + \frac{2.7 \times 6}{2} = 238.6\,KN$$

$$\frac{A_v}{s} = \frac{V_s}{0.85 f_y d} = \frac{238.6 \times 10^3}{0.85 \times 400 \times 630} = 1.114$$

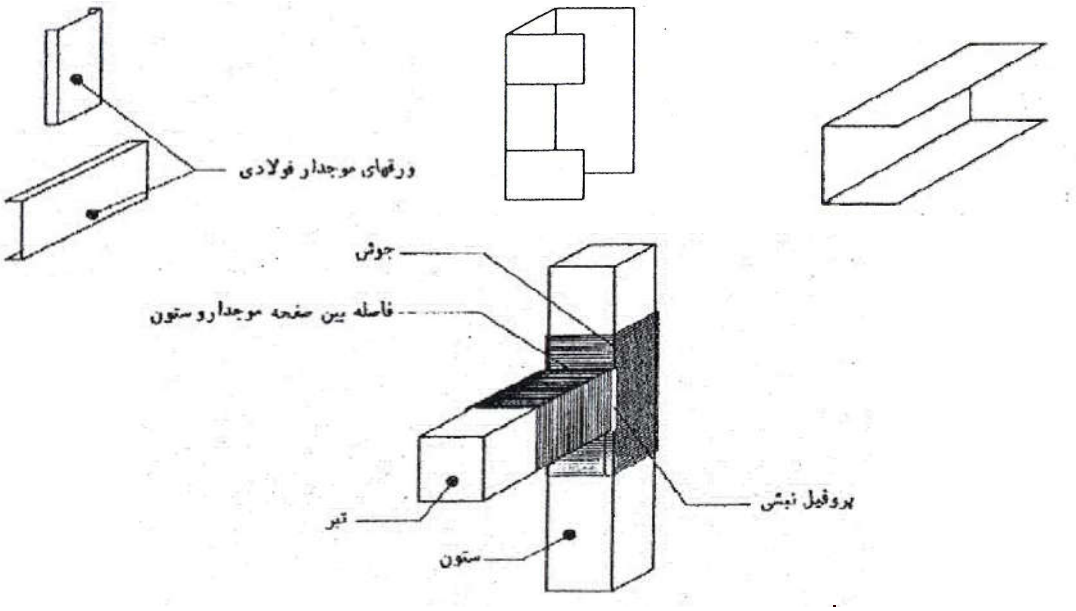
$$s = 200mm \rightarrow A_v = 222.8\,mm^2$$

$$\Phi 12/200 \qquad A_v = 226mm^2 > 222.8\,mm^2$$

جزئیات تقویت در شکل ۲-۴-۱-ث مثال نشان داده شده است.

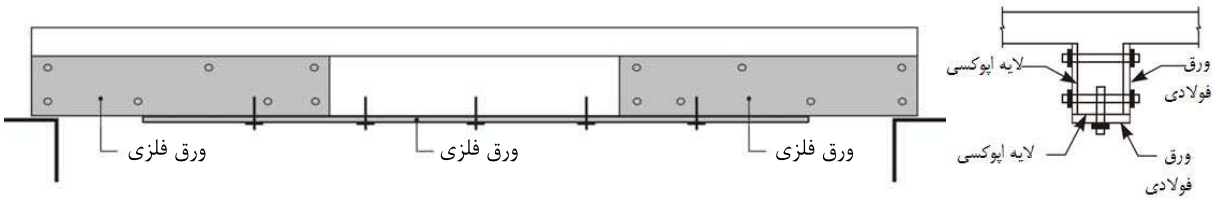
۲-۴-۱-۲- روکش فولادی

برای تقویت خمشی تیرها می‌توان ورق‌هایی به ضخامت کم را با رزین اپوکسی به وجه کششی تیر چسباند. چسباندن ورق به وجه قائم تیرها در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها موجب افزایش ظرفیت برشی و چسباندن ورق به بال تحتانی موجب افزایش ظرفیت خمشی تیر می‌گردد (شکل ۲-۴-۵). در صورت نیاز به استفاده از ورقه‌هایی با ضخامت بیشتر باید از پیچ‌ها و بولت‌های مهاری برای انتقال برش استفاده نمود. در این حالت نیز توصیه می‌شود ابتدا ورق فولادی با چسب اپوکسی چسبانده شده و بعد پیچ‌ها به صورت میانگذار یا کاشته شده مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۲-۴-۶).

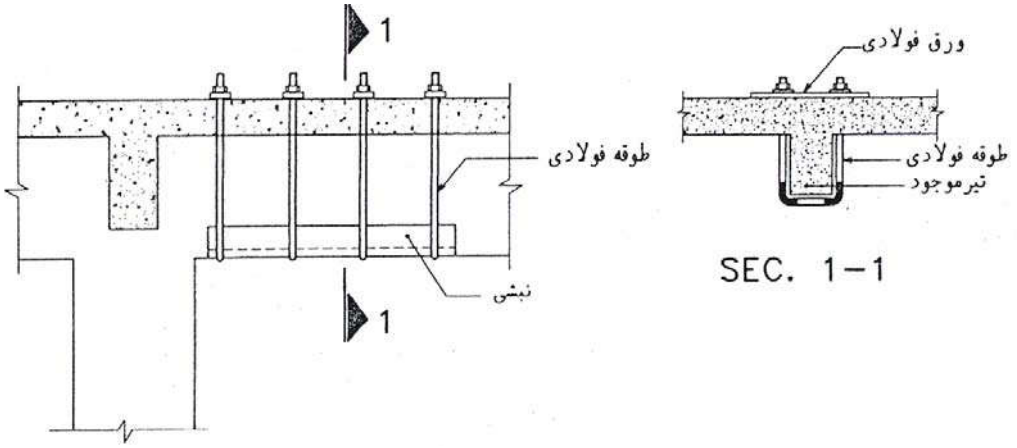


شکل ۲-۴-۵- تقویت خمشی و برشی تیرها با چسباندن ورق‌های فولادی با ضخامت کم با چسب اپوکسی

مطابق شکل ۲-۴-۷ می‌توان بجای استفاده از ورق‌های فولادی که در وجوه تیر نصب می‌شوند از قفس‌های فولادی بصورت نبشی و رکابی استفاده نمود.



شکل ۲-۴-۶- تقویت خمشی و برشی تیرها با ورق فولادی



شکل ۲-۴-۷- تقویت خمشی و برشی تیرها با قفس فولادی شامل نبشی و رکابی

مثال ۲-۴-۲

مطلوب است طرح تقویت تیر بتن آرمه مثال ۲-۴-۱ با روکش فولادی:

الف: تقویت با روکش فولادی

- **کنترل برش**

ابتدا ظرفیت برشی موجود تعیین می‌گردد:

$$V_c = 121 KN$$

$$V_s = \frac{A_v}{s}(\varphi_s f_y)d = \frac{157}{200}(0.85\times 400)\times 560\times 10^{-3} = 149.5 KN$$

$$V_c + V_s = 121 + 149.5 = 270.5 KN$$

۲-۴-۱-۳- استفاده از مصالح FRP

مقاوم‌سازی اعضای بتنی با مصالح کامپوزیتی FRP روش نسبتاً جدیدی به شمار می‌رود. مصالح FRP خواص فیزیکی مناسبی دارند که می‌توان به مقاومت کششی بالا و ضخامت و وزن کم اشاره نمود.

مصالح FRP را می‌توان برای افزایش مقاومت خمشی، مقاومت برشی و مقاومت پیچشی تیر بکار برد که در ادامه به آن اشاره می‌گردد. در هنگام استفاده از مصالح FRP باید سطح بتن و سطح FRP را آماده نمود.

آماده کردن سطح بتن:

برای جلوگیری از کنده شدن صفحه FRP و چسب از روی سطح بتن، این سطح باید به نحو مناسبی قبل از چسب زدن آماده‌سازی گردد. در این راستا تمام موارد ناصافی و ناهمواری باید صاف و هموار گردد. وقتی یک لایه نازک FRP بر روی سطح ناهموار بتنی چسبانده شود، قسمتهای FRP که روی ناهمواری‌ها قرار گرفته دچار کشش می‌گردد و تمایل به صاف شدن دارند و این سبب ایجاد تنش‌های جداکننده می‌گردد که ممکن است پس از رسیدن به حد معینی به از بین رفتن چسبندگی در این نقاط منتهی شود.

آماده‌سازی سطح FRP:

اگر سطح صفحه FRP به طور مناسب آماده نشود، به عنوان مثال اگر ذرات آلودگی و چربی از سطح FRP برداشته نشود، ممکن است جدایی اتصال در سطح نوار FRP با چسب رخ دهد.

چسب:

در حال حاضر چسب‌های بسیار قدرتمندی در دسترس می‌باشد که می‌توانند در چسباندن و استفاده از نوارها و الیاف FRP مورد استفاده قرار گیرند به گونه‌ای که مقاومت آنها از مقاومت بتن بیشتر است و به همین دلیل در اغلب حالات شکست در بتن رخ می‌دهد وشکست در لایه چسب به ندرت رخ می‌دهد. تنها در صورت استفاده از چسب نامناسب و یا اجرای غلط و نامطلوب، امکان بروز مشکل در لایه چسب وجود دارد. این مشکل در سطح مشترک چسب و FRP و یا در سطح مشترک بتن و چسب رخ می‌دهد.

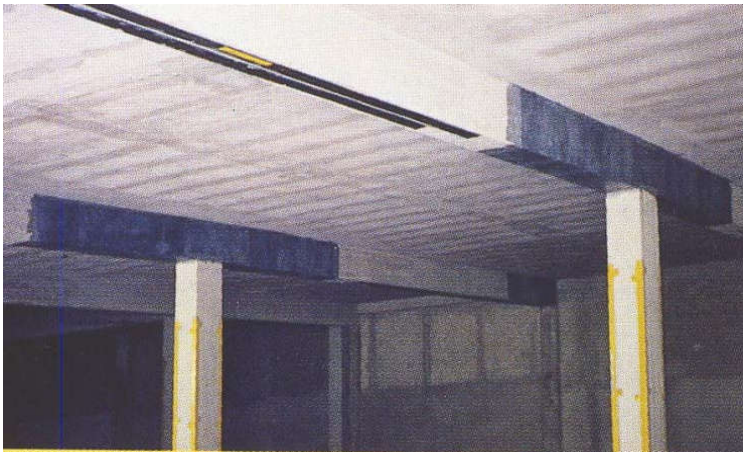
۲-۴-۱-۳-۱- تقویت خمشی تیر با مصالح FRP

در این بخش به نحوه محاسبه تقویت خمشی تیر بتنی با اضافه نمودن FRP پرداخته می‌شود. برای نمونه تقویت مقاطع مستطیلی و T شکل بررسی شده‌اند. مفاهیم اساسی ارائه شده می‌تواند برای هر شکل هندسی دیگر نیز مورد استفاده قرار گیرد.

اتصال مصالح FRP به ناحیه کششی بتن به طوری که راستای الیاف آن در جهت طولی یک عضو خمشی باشد، باعث افزایش مقاومت خمشی آن عضو می‌گردد. مباحث این بخش افزایش مقاومت خمشی اعضای قاب خمشی شکل‌پذیر مقاوم در برابر زلزله را که انتظار تشکیل مفصل پلاستیک در آن باشد، در بر نمی‌گیرد. در طراحی این حالات باید رفتار قاب تقویت شده با در نظر گرفتن کاهش

قابل توجه چرخش و انحنا در قسمت‌های تقویت شده مورد بررسی قرار گیرد. همچنین در این وضعیت تاثیر بارهای متناوب بر مصالح FRP نیز باید بررسی شود.

نمونه‌ای از روش‌های تقویت خمشی تیر با مصالح FRP در شکل ۲-۴-۸ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴-۸- کاربرد مصالح FRP در مقاوم‌سازی

۲-۴-۱-۳-۱-۱- فرضیات

فرضیات زیر در محاسبات تقویت خمشی مقطع بتنی با استفاده از سیستم FRP بکار می‌روند:

- محاسبات طراحی بر اساس ابعاد واقعی موجود، نحوه استقرار میلگردها و خصوصیات مصالح عضو تقویت شده می‌باشد.
- کرنش در بتن و مصالح FRP متناسب با فاصله آنها از محور خنثی است. به عبارتی شکل مقطع قبل و بعد از بارگذاری تغییر نمی‌کند.
- هیچ نوع لغزش نسبی بین FRP و بتن رخ نمی‌دهد.
- تغییر شکل برشی در لایه چسب، با توجه به ضخامت خیلی کم آن، نادیده گرفته می‌شود.
- حداکثر کرنش فشاری بتن ۰/۰۰۳ فرض می‌گردد.
- از مقاومت کششی بتن صرفنظر می‌شود.
- رابطه تنش – کرنش FRP تا نقطه شکست آن، به صورت الاستیک خطی فرض می‌شود.

البته باید توجه داشت که بعضی از فرض‌های فوق رفتار دقیق تقویت خمشی با FRP را منعکس نمی‌کند و استفاده از آنها به خاطر سادگی محاسبات می‌باشد. برای مثال در لایه چسب به سبب لغزش نسبی FRP و بتن، تغییر شکل برشی وجود دارد. به هر حال عدم صحت دقیق فرضیه‌ها تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقاومت خمشی عضو تقویت شده با FRP نخواهد گذاشت.

۲-۴-۱-۳-۱-۲- مقاومت برشی مقطع

هنگامی که از مصالح FRP برای افزایش مقاومت خمشی عضوی استفاده می‌شود، عضو باید بتواند نیروی برشی مربوط به افزایش ظرفیت خمشی مقطع را تحمل کند.

۲-۴-۱-۳-۱-۳- کرنش لایه زیرین بتن موجود

درصورتی که قبل از نصب مصالح FRP، تمامی بارهای روی عضو شامل وزن آن و یا نیروی پیش‌تنیدگی از روی عضو برداشته نشود، باید کرنش اولیه موجود در سطح کششی بتن در نظر گرفته شود. این کرنش به عنوان کرنش اولیه است و باید از کرنش موجود در FRP جدا گردد. میزان کرنش اولیه در لایه زیرین بتن ، ε_{bi}، می‌تواند با استفاده از تحلیل الاستیک عضو با در نظر گرفتن تمامی بارهای وارده در حین نصب FRP تعیین شود. توصیه می‌گردد که این تحلیل بر پایه خصوصیات مقطع ترک خورده انجام شود.

۲-۴-۱-۳-۱-۴- ضرایب جزئی ایمنی

ضرایب جزئی ایمنی مصالح فولاد و بتن براساس ضوابط مندرج در آیین نامه بتن ایران "آبا" در نظر گرفته می‌شوند. ضریب جزئی ایمنی مصالح FRP، ϕ_{frp}، صرفنظر از نوع بارگذاری، به نوع آن و شرایط محیطی کار بستگی دارد. این مقدار از ضرب عدد ۰/۸۵ در مقادیر متناسب با جدول ۲-۵-۱ (بخش بهسازی ستون‌ها) که ضرایب کاهش محیطی نامیده می شود، به دست می‌آید.

۲-۴-۱-۳-۱-۵- بررسی معایب مقاوم‌سازی خمشی تیرها با مصالح FRP

بررسی‌های تجربی گوناگونی در مورد تقویت خمشی تیر با استفاده از ورقه‌ها و صفحات FRP صورت گرفته است. در تمام این ارزیابی‌ها، تیر تقویت شده باربری نهایی بیشتری در مقایسه با حالت تقویت نشده نشان می‌دهد. با این وجود، افزایش مشابه در بار تسلیم تیر گزارش نشده است. بطور کلی مودهای گسیختگی عضو بتن مسلح تقویت شده در خمش با تقویت کننده‌های FRP چسبیده از خارج عضو، می‌تواند به حالت‌های ذیل تقسیم شود:

الف) شکست به علت گسیختگی FRP در اثر کشش ناشی از خمش

ب) شکست ترد به علت خرد شدن بتن فشاری تیر در اثر فشار ناشی از خمش در وجه فوقانی تیر

پ) شکست برشی

ت) جدا شدن پوشش بتن از تیر

ث) از بین رفتن مقاومت برشی چسب و جدا شدن FRP از چسب

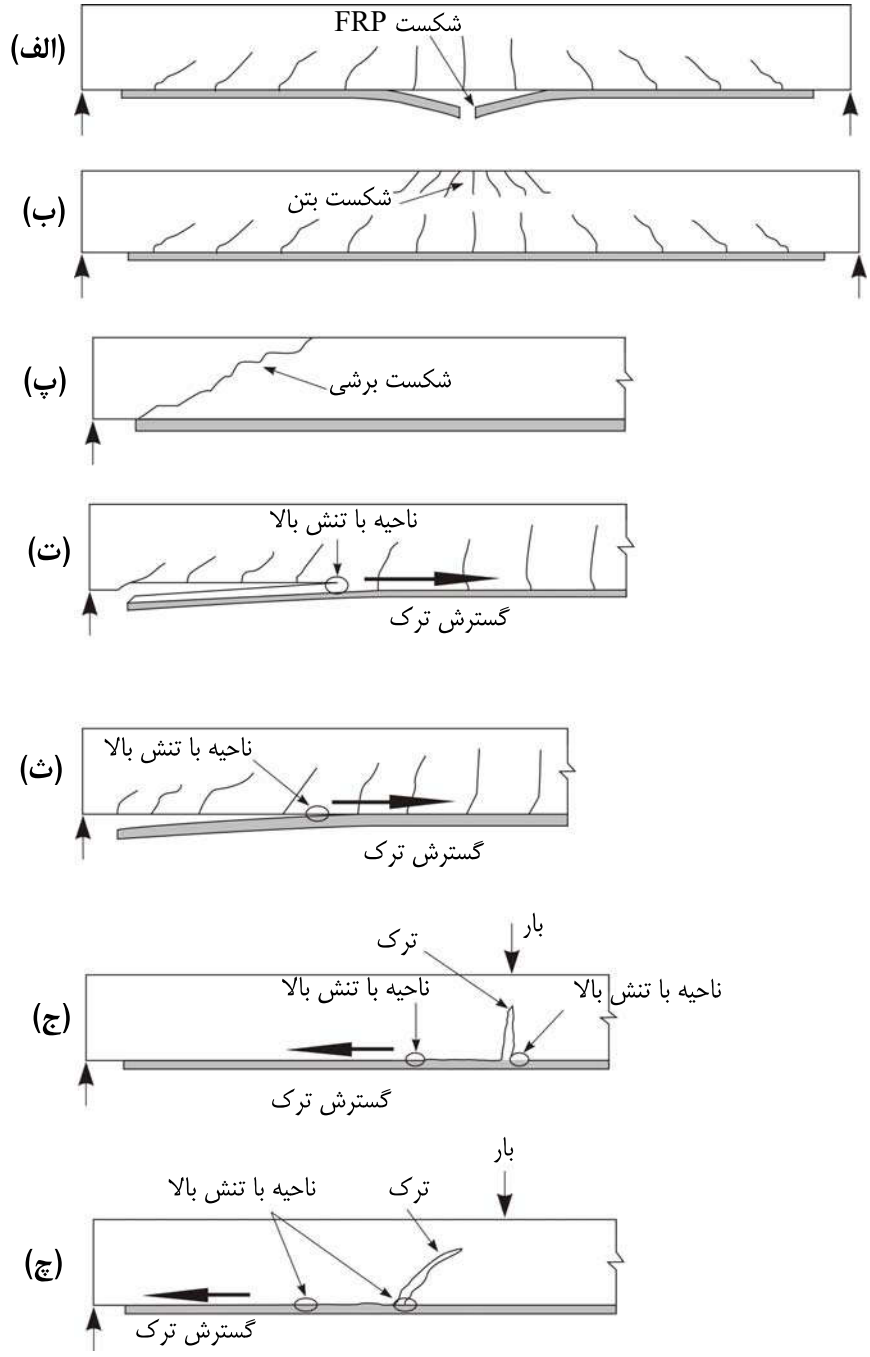
ج) گسستن چسبندگی به صورت موضعی ناشی از بروز ترک‌های خمشی در میانه دهانه تیر و انتشار این روند

چ) از بین رفتن موضعی چسبندگی در سطح تماس FRP و بتن در اثر بروز ترکهای مایل برشی در طول دهانه و انتشار این روند گسستگی.

بصورت خلاصه‌تر حالت‌های (ت) و (ث) را از حالات شکست چسبندگی در انتهای لایه چسبانده شده به حساب می‌آورند. به طریق مشابه حالت‌های (ج) و (چ) را شکست چسبندگی در سطح مشترک بتن و FRP ناشی از بروز ترک خوردگی در طول دهانه می‌نامند.

تمام حالات شکست نشان داده شده در شکل ۲-۴-۹ به جز حالات (ج) و (چ) که رشد و انتشار ترک خوردگی بتن و جدا شدن صفحه چسبانده شده از روی بتن بصورت تدریجی رخ می‌دهد، حالات شکست ترد و ناگهانی می‌باشند. اینکه شکست مقاوم‌سازی در

یک تیر طبق کدامیک از این حالات صورت پذیرد، به عوامل متعددی نظیر مشخصات فولاد خمشی و برشی داخل مقطع، ابعاد هندسی، خصوصیات مصالح مصرف شده و لایه چسب به کار رفته بستگی دارد.



الف) گسیختگی FRP ب) خرد شدن بتن فشاری

پ) گسیختگی برشی ت) ورقه شدن پوشش بتن

ث) جدایش در فصل مشترک FRP و بتن در انتها

ج) جدایش در فصل مشترک ناشی از ترک خمشی

چ) جدایش در فصل مشترک ناشی از ترک برشی

شکل ۲-۴-۹- مودهای گسیختگی تیر بتنی تقویت شده با صفحه FRP

شکست خمشی:

اگر دو انتهای صفحه FRP چسبانده شده به خوبی مهار شده باشند، ممکن است تیر وقتی تحت حداکثر خمش قابل تحمل خود قرار می‌گیرد دچار گسیختگی مصالح FRP (بدلیل کشش ناشی از خمش) شود (حالت الف) و یا اینکه بتن قسمت فشاری مقطع تیر خرد گردد (حالت ب).

عموماً گسیختگی کششی صفحه FRP بلافاصله پس از جاری شدن فولاد کششی داخل بتن رخ می‌دهد. هر چند ممکن است بدلیل زیاد بودن مقدار پوشش بتن (کاور) وقتی FRP دچار گسیختگی کششی شود، هنوز فولاد به حد جاری شدن نرسیده باشد. بطور کلی افزایش مقاومت و کاهش شکل‌پذیری دو پیامد مقاوم‌سازی تیرهای بتنی با استفاده از مصالح FRP می‌باشد. همچنین اگر از مقادیر زیاد FRP جهت مقاوم‌سازی استفاده شود، شکست در اثر خرد شدن بتن قسمت فشاری مقطع باعث کاهش شدیدتر مقدار شکل‌پذیری خواهد شد.

شکست برشی:

تیر مقاوم‌سازی شده ممکن است به صورت ترد و ناگهانی در اثر برش دچار شکست شود. در حالتی که تیرهای بتن مسلح فقط در برابر بارهای خمشی مقاوم‌سازی شده باشند و افزایش مقاومت برشی در آنها دیده نشده باشد شکست در اثر برش می‌تواند تهدیدی جدی برای این گونه تیرهای مقاوم‌سازی شده باشد. در چنین شرایطی ظرفیت برشی تیر بتنی به تنهایی باید در مقابل نیروهای برشی مقاومت کند و نوار FRP چسبانده شده به وجه تحتانی سهم بسیار اندکی در تحمل نیروهای برشی دارد.

مقاوم‌سازی برشی تیرهای بتنی نیز باید به موازات مقاوم‌سازی خمشی انجام گیرد تا شکست برشی مانع از ارائه حداکثر مقاومت خمشی تیر نگردد و تیر به حالت خمشی (تحت اثر خمش) به نقطه شکست برسد، هر چند شکست خمشی تیرهای بتن مسلح تقویت شده با FRP ترد می‌باشد ولی نسبت به شکست برشی تیر رفتار شکل‌پذیرتری از خود نشان می‌دهد.

شکست در حالت کنده شدن انتهای نوار مقاوم کننده:

تیر مقاوم‌سازی شده در برابر خمش وقتی تحت بارگذاری قرار می‌گیرد قبل از اینکه به حداکثر مقاومت خمشی مورد انتظار برسد، ممکن است دچار شکست زودرس ناشی از کنده شدن صفحه چسبانده شده از بتن گردد. بررسی‌های عملی نشان می‌دهد متداول‌ترین حالت جدا شدن صفحه از بتن، کنده شدن پوشش بتن می‌باشد. این حالت یا در انتهای صفحه و یا در نزدیکی انتها رخ می‌دهد و منجر به جدا شدن صفحه همراه با قسمتی از پوشش بتن از بقیه مقطع می‌گردد.

جدا شدن و کنده شدن پوشش بتن:

این حالت متداول‌ترین حالت شکست زودرس است و بدلیل اینکه شکست مذکور دور از سطح چسبندگی بتن و FRP رخ می‌دهد، نمی‌توان آن را دقیقاً حالت شکست چسبندگی نامید. این حالت اغلب به علت تمرکز تنش‌ها در انتهای صفحه مقاوم‌کننده می‌باشد. اصطلاح «جدا شدن پوشش بتن» در ظاهر دقیق‌ترین توصیف از این حالت شکست می‌باشد.

عموماً کنده شدن پوشش بتن در این گونه شکست‌ها بدلیل بروز ترک‌خوردگی در انتهای صفحه چسبانده شده و یا نزدیکی آن، بدلیل تمرکز تنش‌های برشی و نرمال ناشی از تمام شدن ناگهانی صفحه مقاوم‌کننده رخ می‌دهد. وقتی ترک در بتن در نزدیکی انتهای

صفحه چسبانده شده، شکل می‌گیرد، رشد آن ترک به صورت عمقی بوده و تا سطح میلگردهای کششی تیر نفوذ می‌کند و پس از رسیدن به این عمق، انتشار و گسترش آن در جهت موازی میلگردهای طولی خواهد بود. که این روند سبب جدا شدن پوشش بتن خواهد شد.

جدا شدن صفحه چسبانده شده از سطح تماس با بتن:

این حالت شکست به علت از بین رفتن اتصال بین چسب و سطح بتن می‌باشد. این حالت شکست به دلیل بوجود آمدن تنشهای بزرگ برشی در محل و یا نزدیکی انتهای صفحه چسبانده شده رخ می‌دهد آن هم زمانی که این تنشها از حد تحمل المان ضعیف‌تر که معمولاً بتن می‌باشد فراتر رود. در این حالت معمولاً لایه نازکی از بتن همراه با چسب از بقیه قسمتها جدا می‌شود این به معنای آنست که لایه بسیار نازکی از سطح بتن در مجاورت سطح تماس با چسب، محل بروز شکست می‌باشد و شکست در خود چسب رخ نمی‌دهد. البته در صورت استفاده از چسب نامرغوب و یا نامناسب و یا پرداخت غیر مناسب سطح بتن، ریسک بروز چنین شکستی افزایش می‌یابد.

شکست چسبندگی ناشی از ترک خوردگی بتن در طول دهانه تیر:

گاهی اوقات ممکن است از بین رفتن چسبندگی به صورت موضعی و در اثر وقوع ترک‌های خمشی و برشی بتن در طول دهانه تیر و دور از دو انتهای صفحه چسبانده شده رخ دهد و پس از آن جدا شدگی به سمت انتهای صفحه، رشد و انتشار یابد. در این مورد نیز جدا شدن صفحه چسبانده شده، بدلیل کنده شدن لایه نازکی از بتن مجاور سطح صورت می‌گیرد. در این نوع شکست معمولاً لایه نازکی از بتن پس از شکست مقطع همچنان به سطح صفحه جدا شده، چسبیده است.

این حالت شکست بیشتر در تیرهای با مقطع کم عمق روی می‌دهد و عموماً دارای رفتار شکل‌پذیرتری نسبت به حالات دیگر شکست می‌باشد.

از بین رفتن چسبندگی به دلیل بروز ترک‌های خمشی در طول دهانه:

وقتی ترک بزرگی در بتن رخ می‌دهد، تنش‌های کششی در محل ترک‌خوردگی به صفحه FRP منتقل می‌گردد که در نتیجه تنش‌های بزرگی در سطح تماس FRP و بتن در مجاورت محل ترک خوردگی، بوجود می‌آید. با افزایش مقدار بارهای وارده تنش‌های تماسی و کششی در صفحه FRP در این محل افزایش می‌یابد. هنگامی که این مقادیر به حد بحرانی خود می‌رسند، جدا شدن صفحه و بتن از این محل آغاز می‌گردد و سپس این روند به سمت یکی از دو انتهای صفحه چسبانده شده که عموماً انتهای نزدیک‌تر می‌باشد، پیشرفت می‌کند.

در شرایط از بین رفتن چسبندگی در محل بروز ترک‌های خمشی، عامل محرک، فاصله گرفتن افقی دو لبه ترک از یکدیگر می‌باشد، زیرا اصولاً ترک‌های خمشی در راستای عمود بر محور طولی تیر رخ می‌دهد اما در شرایطی که ترک‌ها از ترکیب خمش و برش بوجود آمده‌اند، وضعیت قرارگیری آنها مایل می‌باشد و بنابراین دو لبه ترک نسبت به یکدیگر جابجایی قائم هم دارند که این امر عامل اصلی بوجود آمدن تنش‌های بزرگ که سبب کنده شدن FRP از بتن (بصورت موضعی) می‌شوند، می‌باشد. البته لازم به ذکر