بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی عمران

مقاوم سازی دال‌های تخت برای برش منگنه‌ای با استفاده از میله و شبکه‌ی FRP و FRP بادبزنی و مقایسه‌ی آن با سایر روش‌ها

رساله دکتری مهندسی عمران - سازه

محمد حسن میثمی

استاد راهنما

دکتر داود مستوفی نژاد

۱۳۹۱

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

پدر، مادر، همسر و فرزندانم

مهـــــــــدی و شـــــادی

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

سیستم سازه‌ای دال تخت عبارتست از دال‌هایی با ضخامت یکسان که به طورمستقیم بر روی ستون‌ها قرار می-گیرند، بدون این که در آن‌ها تیر و یا سر ستون وجود داشته باشد، شکل ۱-۱. استفاده از سیستم‌های سازه‌ای دال تخت برای ساختمان‌های با کاربری دفتری، مسکونی و پارکینگ‌ها متداول است.

از جمله خصوصیت دال‌های تخت، سهولت در اجرا و کاربرد فراوان در سازه‌های با دهانه‌های تا ۹ متر می‌باشد که دامنه‌ی وسیعی از سازه‌ها را در بر می‌گیرد. برخلاف خصوصیت فوق، دال تخت به علت نداشتن شبکه‌ی تیر در محل اتصال آن به ستون، در محل انتقال برش دچار مشکل برش ناشی از عمل کرد منگنه‌ای می‌شود که اگر با لنگر نامتعادل نیز همراه شود، وضعیت نامساعدتر خواهد شد. به همین دلیل برای رفع این کمبود ظرفیت، راه‌های مختلفی از قبل ارائه شده و هم اکنون نیز اجرا می‌شود؛ از جمله: استفاده از سر ستون و کتیبه در اطراف ستون، استفاده از گل میخ و یا کلاهک برشی فولادی در ناحیه‌ی اتصال که از روش‌های کاربردی قدیمی هستند.

در حال حاضر با حضور مصالح جدید در عرصه‌ی صنعت ساخت و ساز (کامپوزیت‌ها)، کاربرد آن‌ها در تقویت وضعیت‌های گوناگون سازه توسط محققان بررسی شده که نتایج خوبی نیز حاصل شده است. از جمله می‌توان

کامپوزیت‌ها را به‌عنوان تقویت کننده‌های برشی در سازه‌ها مورد استفاده قرار داد؛ و لذا به منظور رفع کمبود ظرفیت برشی در ناحیه‌ی اتصال دال به ستون در دال‌های تخت، باید به دنبال راه‌کارهایی گشت که بتوان از آن‌ها عمل کرد برشی اخذ کرد. در این راستا روش‌های ارائه شده در این پیشنهادیه به همین منظور تعریف شده است.

شکل ۱-۱ سازه دال تخت [۱]

در این پیشنهادیه تحصیلی سعی می‌شود روش‌های جدیدی برای مقابله با برش منگنه‌ای در ناحیه‌ی اتصال تعریف شود که در ادامه جهت تبیین اهداف و روش‌های دست یابی به اختصار توضیح داده می‌شوند.

۱-۲ اهداف

درحال حاضر با حضور مصالح جدید در عرصه‌ی صنعت ساخت و ساز (کامپوزیت ها)، کاربرد آن‌ها در تقویت وضعیت‌های گوناگون سازه توسط محققان بررسی شده که نتایج خوبی نیز حاصل شده است. نهایتاً به منظور رفع کمبود برش در ناحیه اتصال دال به ستون در دال‌های تخت باید به دنبال راه‌کارهایی گشت که بتوان از آن‌ها عمل کرد برشی اخذ کرد و لذا روش‌های ارائه شده جهت فعالیت در این رساله دکتری در این راستا تعریف شده است.

به صورت کلی با استفاده از کامپوزیت‌ها و روش‌های جدید پیشنهادی برای مقابله با برش منگنه‌ای در ناحیه‌ی اتصال، اهداف زیر را دنبال می‌کنیم :

۱- بررسی روش‌های جدید تقویت و تعمیر با استفاده از کامپوزیت‌هایFRP .
۲- افزایش ظرفیت برشی ناحیه اتصال در دال‌های تازه ساز با FRP نسبت به حالت بدون FRP.
۳- افزایش مقاومت دال‌های موجود دارای کمبود ظرفیت از جهت برش منگنه‌ای.

۱-۳ روش دست یابی

با توجه به شناختی که از عمل کرد برش منگنه‌ای در دال‌های تخت و ضعف بتن برای انتقال این برش به ستون داریم، با بررسی روش‌های متداول در مقابله با این ضعف می‌توان استنباط کرد که روش‌های ارائه شده در این گزارش از نظر رفتاری ماهیت برشی از خود نشان خواهند داد و لذا بسیار امیدوارانه، مطمئن از پاسخ گو بودن آن‌ها برای اهداف تعیین شده خواهیم بود.

در این مرحله برای تحقیقات در پیش رو، روش دست یابی زیر را برای انجام آزمایش پیش بینی می‌کنیم:

۱- بررسی مقدماتی براساس آئین‌نامه‌های طراحی برای جهت کنترل پاسخ گو بودن روش‌های پیشنهادی.
۲- انتخاب روش‌های کارآمدتر به منظور آزمایش عملی.
از روش‌های ارائه شده روش‌هایی که بیشتر مد نظر می‌باشند؛ عبارتند از: کاشت میله‌های FRP، استفاده از شبکه FRP و استفاده از FRP بادبزنی. در این راستا آزمایش‌هایی با ساخت ۲۲ نمونه انجام می‌شود که جزئیات آن در فصل ۳ توضیح داده می‌شود، که از میان آن‌ها ۳ نمونه تقویت نشده بوده، و به منظور کنترل حالت‌های مختلف آزمایش با نمونه تقویت نشده ساخته می‌شوند.
۳- انجام آزمایشات به‌منظور تعیین ظرفیت برشی، تغییر شکل‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در بتن.
۴- مقایسه‌ی نمونه‌های کنترلی با نمونه‌های تقویت شده و استنتاج نتایج حاصل از تقویت.
۵- بررسی مدل‌های ساخته شده از نمونه‌های اجرایی توسط برنامه تحلیلی RBSM-3D.
۶- استنتاج نتایج حاصل از آزمایش و تحلیل‌های انجام شده و نهایتا جمع بندی مسائل.

۱-٤ مشخصات عمومی سیستم‌های سازه‌ای دال تخت

از اولین سری سازه‌ها با سیستم دال تخت برای ساختمان‌های بین ۵ تا ۱۵ طبقه در آمریکا استفاده شده است که در آن از هیچ المانی برای اعمال بارجانبی مثل دیوار برشی استفاده نشده است. دال‌ها در این سازه‌های اولیه به صورت مناسب مسلح نمی‌شدند (با آرماتور سبک) و جزئیات آرماتور بندی مناسبی برای مقابله با نیروی زلزله نداشتند[۱].

شریف و دیلگر در سال ۱۹۹۶ گزارش کردند که اغلب این سازه‌ها دارای نسبت آرماتور خمشی کمتر از ۱٪ هستند[۲].

سیستم سازه‌ای دال تخت دارای مزایایی نسبت به دیگر سیستم‌های سازه‌ای هستند [۳]، از جمله:

- دهانه‌ی خالص سقف (فاصله کف تا کف) بیشتری را برای یک ارتفاع سقف مشخص فراهم می‌کنند.
- ارتفاع کل طبقات مورد نیاز را کاهش می‌دهد. تقریباً به ازای هر ۱۰ طبقه‌ی معمولی ساختمان‌ها با این سیستم می‌توان یک طبقه اضافه‌تر برنامه ریزی نمود. این خاصیت بر روی وزن ساختمان، نیروهای ناشی از باد و زلزله نیز موثر خواهد بود.
- حداقل موانع را برای تعمیر تاسیسات مکانیکی و الکتریکی بوجود می‌آورد.
- به قالب بندی نسبتاً ساده نیاز دارد، که در نتیجه هزینه‌های اجرا را کاهش می‌دهد.

این سیستم سازه‌ای دارای معایبی نیز می‌باشد که بزرگترین آن ضعف درمقابل برش منگنه‌ای می‌باشد، که منجر به گسیختگی برش منگنه‌ای شکننده می‌شود. این ضعف در صورتی که سازه تحت اثر نیروهای جانبی ناشی زلزله و یا باد قرار گیرد، به مراتب بدتر خواهد بود؛ چرا که باید لنگرهای نامتعادل را نیز بین دال و ستون منتقل کند [۳]. پس می‌توان نتیجه گیری کرد که خرابی برش منگنه‌ای در یک اتصال از اهمیت به سزایی برخوردار است؛ چرا که می‌تواند به خرابی پیش رونده‌ای منتهی شود که باعث فرو پاشی کل سازه خواهد شد.

۱-۵ مودهای خرابی دال تخت

عوامل متعددی می‌توانند باعث ناکارآمدی در مقاومت برش دو طرفه شوند. این عوامل از آنجا که می‌توانند به خرابی برش منگنه‌ای منجر شوند با اهمیت هستند؛ که از آن جمله به موارد ذیل اشاره می‌شود [۳]:

- مقاومت فشاری پایین بتن در حین ساخت.
- روش‌های نامناسب قالب بندی و قالب برداری در حین ساخت.
- طراحی اشتباه و یا ساخت و ساز ناصحیح.
- برش و لنگر قابل توجهی که به علت حرکت قوی زمین ایجاد می‌شود.
- افزایش بارهای ثقلی به علت تغییر کاربری ساختمان.
- ساخت دریچه‌های سرویس جدید برای تاسیسات در مجاورت ستون در دال.

۱-٦ مکانیزم‌های خرابی دال تخت

یک اتصال دال ستون بتن آرمه به دو روش می‌تواند به ظرفیت نهایی خود رسیده و خراب شود: ۱) برش منگنه‌ای ۲) جاری شدگی خمشی گسترش یافته میلگردهای طولی. خرابی برش منگنه‌ای یک خرابی شکننده موضعی در اتصال دال ستون است، که در آن ستون با قسمتی از دال ملحق شده به آن در سرتاسر دال به جلو فشرده می‌شود [۴]. جاری شدگی خمشی گسترش یافته به عنوان مکانیزم خطوط گسیختگی کامل نیز تعریف می‌شود. بدون وابستگی به نوع گسیختگی‌های فوق، خرابی در دال وقتی بوجود می‌آید که سطح بارگذاری در میان دال منگنه شود، و یک قاچ از دال که شکل مخروط یا هرم ناقص دارد، با مقطع عرضی حداقل برابر مساحت بارگذاری فشرده شود.

با این که بسیاری از محققین مودهای خرابی دال را به‌صورت کاملا مجزای برشی و خمشی تفکیک می‌کنند، گسوند وکاوشیک در سال ۱۹۷۰ [۵] و یتزهاکی در سال ۱۹۶۶ [۶]، تعدادی از محققین نیز بین این دو مود خرابی تفکیکی قائل نمی‌شوند.

اغلب خرابی‌ها در اتصالات دال ستون مشابه به‌نظر می‌رسند؛ به طوری که ستون با قسمتی از دال بطرف دال فشرده می‌شود. این موضوع علت نام‌گذاری این نوع خرابی به منگنه‌ای می‌باشد. در حقیقت ستون می‌تواند در دال، قبل و یا بعد از جاری شدگی گسترش یافته میلگردهای طولی منگنه شود؛ افهمی و همکاران در سال ۱۹۸۸ [۷].

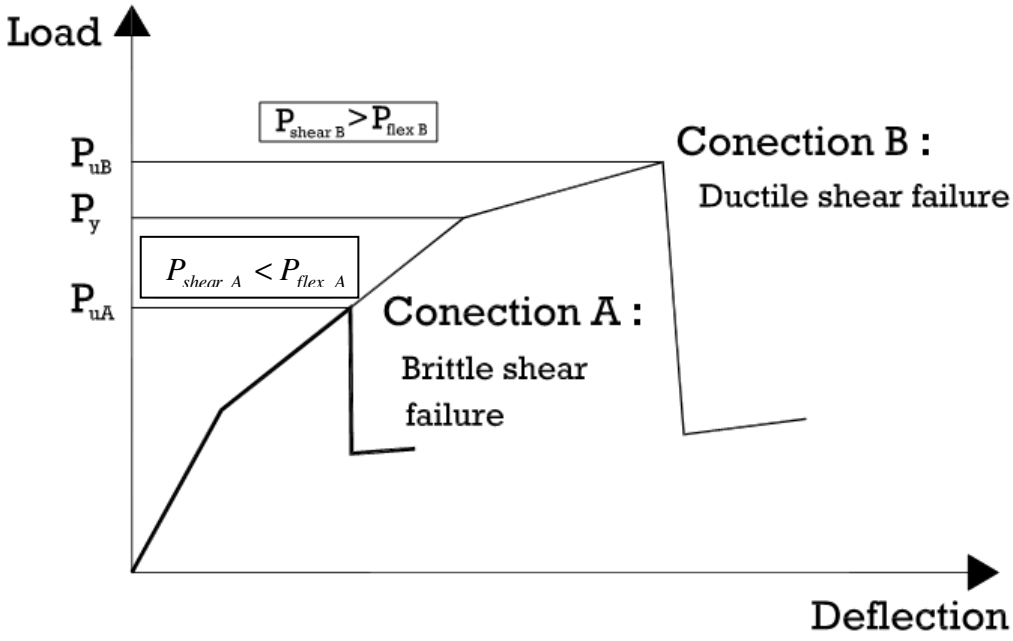
شکل ۱-۲ نمونه‌ای از منحنی‌های بار تغییر مکان اتصالات دال ستون برای دال تخت را تحت اثر بارهای متمرکز نشان می‌دهد. در این شکل ظرفیت‌های برشی و خمشی دال به ترتیب عبارتند از P_{shear} و P_{flex}، و ظرفیت‌های نهایی اتصالات P_U. در اتصال A $P_{shearA} \le P_{flexA}$ ، در حالی که در اتصال B $P_{shearB} \ge P_{flexB}$. در گسیختگی، اتصال B تغییرشکل بیشتری را نسبت به اتصال A از خود نشان می‌دهد. افهمی و همکاران در سال ۱۹۸۸ نشان دادند که وقتی $P_{shear} \le P_{flex}$ باشد، فقدان چسبندگی بین میلگردها و بتن اطراف آن باعث گسیختگی برشی منگنه‌ای شکننده می‌شود[۷]. وقتی که $P_{shear} \ge P_{flex}$، انتشار جاری شدگی بیرون‌تر از ستون، گرادیان نیرو در میلگردها را کاهش می‌دهد و اتصال تغییر شکل‌های بزرگی را قبل از خرابی تجربه می‌کند. شهاتو و رگان در سال ۱۹۸۸، خرابی برشی شکل‌پذیر را مقدمتا خمشی و سپس برشی منگنه‌ای و به عنوان عامل ثانویه توصیف کردند [۷]. شایان ذکر است که اگر میلگردهای خمشی جاری شوند؛ خرابی ناشی از برش منگنه‌ای باعث می‌شود افت قابل توجهی در ظرفیت باربری بوجود آید، شکل ۱-۲.

برای اتصالات با دهانه‌های معمول و مقادیر معمول میلگردهای خمشی، مکانیزم خرابی خطوط گسیختگی به خرابی برش منگنه‌ای منجر خواهد شد. ظرفیت باربری نهایی این گونه اتصالات می‌تواند برابر ظرفیت خمشی باشد که از ظرفیت برشی دو طرفه کمتر است، چن در سال ۲۰۰۵ [۸].

هاگنستاد در سال ۱۹۵۳ و ۱۹۵۶ نشان داد که ظرفیت خمشی نهایی دال‌ها را می‌توان با تئوری خطوط گسیختگی برآورد کرد [۹] : تئوری خطوط گسیختگی فرض می‌کند که جاری شدگی میلگردهای کششی در عرض خطوط مشخصی در صفحه دال متمرکز می‌شود، که خطوط جاری شدگی نامیده می‌شود. محل اثر این خطوط جاری شدگی به صورت اولیه به بارگذاری و شرایط مرزی دال بستگی دارد.

۱-۷ الیاف پلیمری مسلح FRP

امروزه استفاده از FRP به عنوان مصالح مقاوم سازی بسیار رایج شده است. به طوری که تعداد کاربردهایی که FRP را به عنوان مصالح مقاوم سازی یا تعمیراتی استفاده می‌کند نسبت به دهه‌های قبل در سرتاسر جهان به هزاران مورد افزایش یافته است.

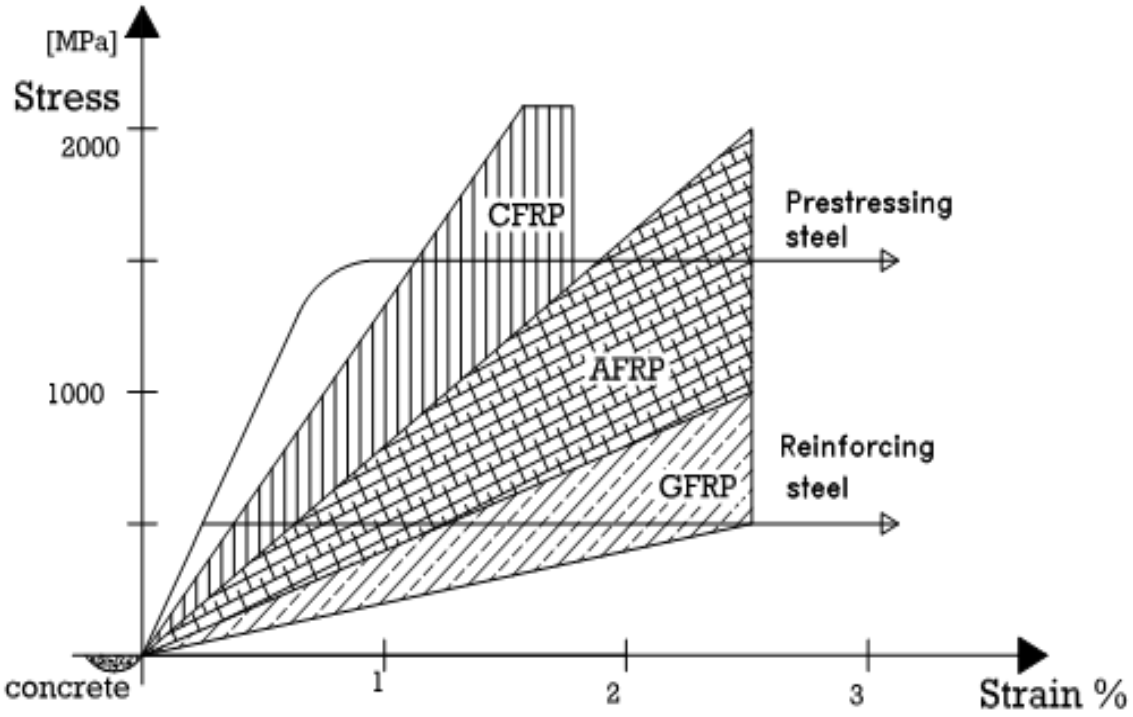


شکل ۱-۲ رفتار اتصالات دال- ستون [۷]

به طورکلی FRP به صورت یک ماتریس پلیمری (یا پلاستیکی) که با الیاف و یا دیگر مصالح تقویت‌کننده مسلح‌شده تعریف می‌شود؛ تا خصوصیات افزاینده قابل توجهی را در یک یا چند جهت برای FRP تدارک ببیند. به طور عمومی سه نوع اصلی الیاف که در FRP استفاده می‌شوند؛ عبارتند از: الیاف کربن، الیاف شیشه، و الیاف آرامید. کامپوزیت‌های FRP با توجه به الیافی که استفاده می‌شود به سه دسته تقسیم بندی می‌شوند:

- الیاف پلیمری مسلح با کربن بانام اختصاری: CFRP
- الیاف پلیمری مسلح با شیشه بانام اختصاری: GFRP
- الیاف پلیمری مسلح با آرامید بانام اختصاری: AFRP

با توجه به تفاوت موجود در خصوصیات الیاف، خصوصیات مکانیکی FRP ها با یک دیگر متفاوت می‌باشد، برای نمونه شکل۱-۳ منحنی‌های تنش کرنش سه نوع FRP فوق را در مقایسه با فولاد نشان می‌دهد [۳]. به عنوان نمونه CFRP در مقایسه با انواع FRP ها، بیشترین سختی و مقاومت را از خود نشان می‌دهد، در حالی که شکننده-ترین رفتار را دارد.



شکل ۱-۳ مشخصات عمومی FRP [۳]

۱-۷-۱ مشخصات عمومی FRP

مشخص است که الیاف در FRP ها مهمترین و اصلی‌ترین اجزاء تشکیل دهنده برای تحمل بارها هستند. به طوری که انتخاب این الیاف بر اساس دو خصوصیت عمده صورت می‌گیرد؛ مقاومت و شکل پذیری، که هر کدام بر مشخصه‌های نهاییFRP ها تاثیر به سزایی خواهند داشت. از طرف دیگر ماتریس‌ها (رزین‌ها) موادی هستند که نقش پرکننده داشته و بار را در FRP ها به الیاف منتقل می‌کنند. رزین‌های به کار رفته در FRP ها بر اساس شرایط محیطی که FRP ها در آن به کار خواهد رفت و نیز روش ساخت FRP ها انتخاب می‌شوند، نانی در سال ۱۹۹۹ [۱۰] و ریزکالا و همکاران ۲۰۰۳ [۱۱].

در ذیل خصوصیت مکانیکی رزین‌های معمول و نیزخصوصیات مکانیکی الیاف معمول که در FRP ها به کار می‌روند به عنوان نمونه در جدول‌های ۱-۱ و ۱-۲ به ترتیب ارائه شده است؛ ونیز خصوصیات مکانیکی یک نوع کامپوزیت GFRP برای نمونه در جدول ۱-۳ آورده شده است. در جدول۱-۴ مقایسه خصوصیات مکانیکی FRP ها با فولاد، و در شکل ۱-۴ روابط تنش کرنش الیاف، ماتریس و FRP ها به منظور ارزیابی و مقایسه آورده شده است.

جدول ۱-۱ خصوصیات مکانیکی یک نوع از رزین‌های معمول، انوچسون ۲۰۰۵ [۱۲]

ماتریس/رزین	مدول الاستیسیته(GPa)	مقاومت کششی(MPa)	کرنش گسیختگی(%)
پلی استر	۴/۶-۳/۱	۷۵-۵۰	۶/۵-۱/۰
وینیلی استر	۳/۳-۳/۱	۸۱-۷۰	۸/۰-۳/۰
اپوکسی	۳/۸-۲/۶	۸۵-۶۰	۸/۰-۱/۵

جدول ۱-۲ خصوصیات مکانیکی الیاف معمول [۱۲]

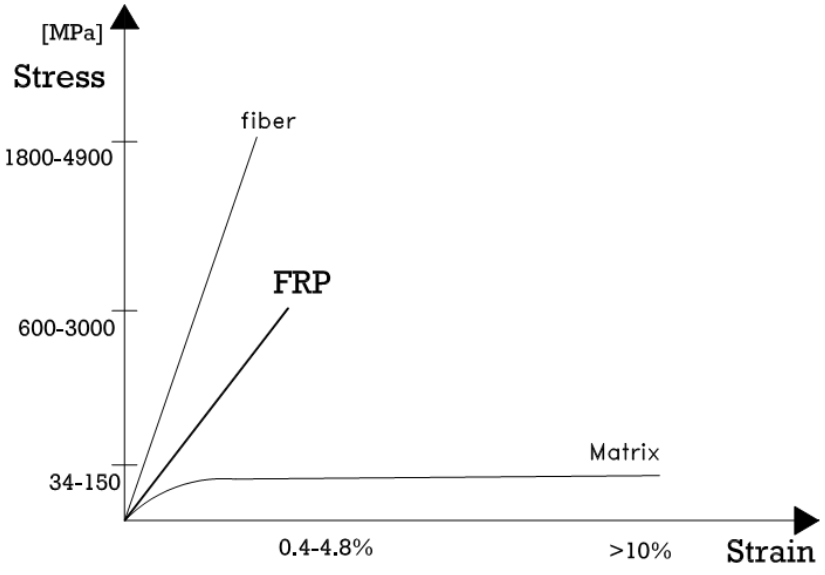
نوع الیاف	مدول الاستیک(GPa)	مقاومت کششی(MPa)	کرنش گسیختگی(%)
E glass	۶۹-۷۲	۲۴۰۰-۳۸۰۰	۴/۹-۴/۵
S-2 glass	۸۶-۹۰	۴۶۰۰-۴۸۰۰	۵/۸-۵/۴
Carbon (HS/S)	۱۶۰-۲۵۰	۱۴۰۰-۴۹۳۰	۱/۹-۰/۸
Carbon (IM)	۲۷۶-۳۱۷	۲۳۰۰-۷۱۰۰	۲/۲-۰/۸
Aramid (Kevlar 29)	۸۳	۲۵۰۰	-
Aramid (Kevlar 49)	۱۳۱	۳۶۰۰-۴۱۰۰	۲/۸

جدول ۱-۳ خصوصیات مکانیکی یک نوع میله GFRP [۱۳]

خصوصیات مصالح	میله های مسلح GFRP	فولاد
وزن واحد حجم (g/cm^3)	۲/۱-۱/۲۵	۷/۹۰
افزایش طول $(\times 10^{-6}/C)$	۶ -۱۰	۱۱/۷
تنش جاری شدن اسمی (MPa)	--	۳۰-۴۵
مقاومت کششی (MPa)	۴۸۳-۱۶۰۰	۴۸۳-۶۹۰
مدول الاستیک (GPa)	۳۵-۵۱	۲۰۰
کرنش جاری شدن $(\%)$	--	۲/۵-۱/۴
کرنش گسیختگی $(\%)$	۱/۳-۱/۲	۶-۱۲

جدول ۱-۴ مقایسه خصوصیات مکانیکی FRP ها با فولاد (ACI440.1R-03 2003) [۱۳]

رزین	فولاد	GFRP	CFRP	AFRP
تنش جاری شدگی (MPa)	۲۷۶-۵۱۷	N/A	N/A	N/A
مقاومت کششی (MPa)	۴۸۳-۶۹۰	۱۶۰۰-۴۸۳	۳۶۹۰-۶۰۰	۲۵۴۰-۱۷۲۰
مدول الاستیک (GPa)	۲۰۰	۵۱-۳۵	۵۸۰-۱۲۰	۱۲۵-۴۱
کرنش جاری شدن %	۰/۲۵-۰/۱۴	N/A	N/A	N/A
کرنش گسیختگی %	۱۲-۶	۳/۱-۱/۲	۱/۷-۰/۵	۴/۴-۱/۹



شکل ۱-۴ روابط تنش کرنش الیاف، ماتریس و FRP [۱۲]

به طورکلی کامپوزیت‌هایی که در صنعت ساختمان استفاده می‌شوند دارای مزایا و معایبی هستند که به عنوان نمونه به موارد ذیل می‌توان اشاره کرد [۳] :

مزایا:

- مقاومت در مقابل خوردگی.
- مقاومت و سختی بر واحد وزن بالا .
- کارایی خوب در مقابل خستگی.
- کارایی عالی در مقابل خزش و آسودگی.
- انبساط حرارتی پائین.
- عایق آب مناسب، وکاملاً پایدار در مقابل سیکل‌های یخ زدن و ذوب شدن.
- دارای کاربرد آسان برای استفاده کننده.

معایب:

- شکنندگی؛ مقاومت قابل ارزیابی با چسبندگی FRPها به بتن مسلح عموماً با از دست دادن شکل پذیری یا کاهش تغییر شکل در زمان گسیختگی همراه است، نیل در سال ۲۰۰۰.
- نسبتاً گران، ترایانتافیلو در سال ۱۹۹۸.
- مستعد برای مشتعل شدن و از هم‌پاشیدگی در حرارت‌های بالا، (Fib 2001b).
- اغلب FRP ها دارای تنزل خصوصیات مکانیکی در حرارت‌های کمی بالاتر از از درجه حرارت‌های محیطی هستند، کودور و همکاران در سال ۲۰۰۴.
- ضریب انبساط حرارتی ناسازگار با بتن، (Fib 2001b).

- نامناسب در مقابل اشعه ماوراء بنفش، دی روس در سال ۱۹۹۷.

- تمایل به زوال کامپوزیت شیشه‌ای در محیط‌های قلیایی، انجمن بتن در سال ۲۰۰۰ .

۱-۸ برش در دال دو طرفه [۱۴]

در یک دال دو طرفه مبتنی بر وجود یا عدم وجود تیر، انتقال بارهای قائم به تکیه‌گاه (ستون‌ها)، بر اساس ساز و کارهای (مکانیزم‌های) متفاوتی انجام می‌گیرد که هر کدام با تنش‌های برشی در دال (و تیر) همراه خواهد بود.

۱-۸-۱ برش در دال‌های تخت

در دال دو طرفه‌ی بدون تیر احتمال وقوع دو نوع گسیختگی برشی به شرح زیر وجود دارد و هر یک باید به طور مجزا کنترل شود.

- **برش یک طرفه**

برش یک طرفه که به نام برش با عملکرد تیر نیز خوانده می‌شود، باعث ایجاد ترک مورب و گسیختگی احتمالی در عرض یک نوار طراحی می‌شود که ممکن است در عرض کل سازه نیز امتداد یابد. در حقیقت اگر یک نوار طراحی مانند یک تیر عریض به فاصله‌ی d (عمق موثر دال) از بر ستون در نظر گرفته شود، مقاطعی از این تیر عریض که نزدیک تکیه‌گاه هستند، مستعد گسیختگی در اثر برش یک طرفه می‌باشند.

محاسبات برش یک طرفه در دال‌های دو طرفه‌ی بدون تیر، معمولا بر این اساس استوار است که در ضخامت دال، از فولادهای برشی استفاده نشود؛ و ظرفیت برشی بتن در ضخامت دال، برای تحمل برش یک طرفه کافی باشد؛ یعنی $V_u \le \phi V_c$ باشد. ظرفیت برشی بتن مقطع در عرض نوار طراحی برابر است با $V_c = (1/6)\sqrt{f_c'} b_w d$ که در آن $b_w = l_2$ خواهد بود. در این حالت اگر طول دهانه‌ی آزاد نوار طراحی را با l_n، و عرض نوار طراحی را با l_2

نمایش دهیم؛ برش یک طرفه‌ی با ضریب طراحی در عرض نوار طرح برای دهانه میانی برابر با ، $V_u = w_u l_2 \left(\frac{l_n}{2} - d \right)$، و برای دهانه‌ی کناری برابر با، $V_u = 1.15 w_u l_2 \left(\frac{l_n}{2} - d \right)$، خواهد بود.

- **برش دو طرفه**

برش دو طرفه که به نام برش منگنه‌ای نیز خوانده می‌شود، تمایل به ترک خوردگی مورب دال تخت را در اطراف یک ستون بیان می‌کند. در حقیقت انتقال بارهای قائم از دال تخت به تکیه‌گاه در اطراف تکیه‌گاه (ستون) نیروی برشی پیرامونی ایجاد می‌کند؛ که این نیرو تمایل دارد یک ترک قطری پیرامونی به شکل یک مخروط ناقص برای ستون با مقطع دایروی، و به شکل یک هرم ناقص برای ستون با مقطع مستطیلی ایجاد کند. مقطع بحرانی در برش منگنه‌ای، یک مقطع قائم است که به فاصله‌ی $d/2$ (d عمق موثر دال است) از بر ستون قرار گرفته است.

آیین‌نامه‌ها قید می‌کنند که برش دو طرفه نه تنها باید به فاصله‌ی $d/2$ از بر لبه‌ها یا گوشه‌های ستون، یا بارهای متمرکز، و یا سطوح تکیه‌گاهی کنترل شود؛ بلکه در مناطقی نظیر لبه‌ی سر ستون یا پهنه که در ضخامت دال تغییر ایجاد می‌شود نیز باید کنترل برش منگنه‌ای، به فاصله‌ی $d/2$ از محل تغییر ضخامت صورت گیرد.

۱-۸-۲ مقررات ACI-318 برای کنترل برش منگنه‌ای [۱۴]

- **برش منگنه‌ای خالص**

نیروی برشی دو طرفه و نیز لنگر نامتعادل موجود در دال در پیرامون ستون، با ایجاد تنش برشی روی سطح مقطعی از دال به فاصله‌ی $d/2$از لبه‌ی ستون، از دال به تکیه‌گاه منتقل می‌شوند. اگر لنگر انتقال یافته از دال بدون تیر به ستون ناچیز باشد، و یا از اثرات انتقال لنگر به تکیه‌گاه صرف‌نظر شود، سطح مقطعی از دال به فاصله‌ی $d/2$ از بر ستون، فقط تحت تأثیر نیروی برشی منگنه‌ای قرار می‌گیرد. در این حالت اگر از فولادگذاری ویژه برای تحمل قسمتی از نیروی برشی منگنه‌ای استفاده نشود؛ باید رابطه‌ی $V_u \le \phi V_c$ برقرار باشد، که در آن : V_c ظرفیت برشی منگنه‌ای

بتن مقطع بوده و ϕ ضریب کاهش مقاومت برشی است که برابر با ۰/۷۵ در نظر گرفته می‌شود. هم چنین V_u نیروی برشی منگنه‌ای با ضریب بوده و با ضرب شدن بارهای با ضریب، w_u، در سطح باربر موثر در برش منگنه‌ای به دست می‌آید.

- **ظرفیت برشی منگنه‌ای بتن در دال بدون فولاد برشی**

تنش برشی قابل انتقال توسط بتن در برش منگنه‌ای، v_c، تابعی از مقاومت فشاری بتن بوده و به $\sqrt{f_c'}/3$ محدود می‌شود. محیط مقطع بحرانی در برش منگنه‌ای، b_0، برای یک ستون میانی به ابعاد c_1 و c_2 برابر است با $b_0 = 2(a+b) = 2(c_1+c_2+2d)$ بدین ترتیب مقاومت برشی اسمی بتن در سطح بحرانی منگنه‌ای حداکثر برابر است با ، $V_c = \frac{1}{3}\sqrt{f_c'}b_0 d$. اگر نسبت طول به عرض مقطع ستون مستطیلی بزرگ‌تر از ۲/۰ باشد، $\beta \succ 2$ داریم: $V_c = \left(1+\frac{2}{\beta}\right)\frac{\sqrt{f_c'}}{6}b_0 d$ که در این رابطه β نسبت طول بلندترین بعد سطح بارگذاری موثر به بزرگترین بعد متعامد در سطح بارگذاری موثر بوده که با تعریف $\beta_0 = b_0/d$ خواهیم داشت: $V_c = \left(\frac{\alpha_s d}{b_0}+2\right)\frac{\sqrt{f_c'}}{12}b_0 d$ که در آن α_s برای ستون‌های میانی، کناری و گوشه به ترتیب برابر با ۴۰، ۳۰ و ۲۰ منظور می‌شود.

ACI318 [۱۴] قید می‌کند که کم‌ترین مقدار V_c از بین روابط فوق، به عنوان ظرفیت برشی منگنه‌ای بتن در مقطع بحرانی، برای دال بدون فولاد برشی در نظر گرفته می‌شود. در کلیه‌ی روابط فوق، مقدار $\sqrt{f_c'}$ نباید بزرگ‌تر از $25/3$ منظور گردد [۱۴].

- **فولاد برشی در دال بدون تیر**

در دال‌های بدون تیر، گاه برش دو طرفه تحت بارهای با ضریب در پیرامون ستون، از ظرفیت برشی بتن در مقطع بحرانی برش منگنه‌ای بیش تر بوده و شرط $V_u \le \phi V_c$ برقرار نیست. در این حالت ظرفیت برشی مقطع را به یکی از روش‌های زیر می‌توان افزایش داد:

افزایش ضخامت دال در همه جا، افزایش ضخامت دال در اطراف ستون به کمک پهنه، افزایش محیط مقطع بحرانی برش منگنه‌ای، b_0، با افزایش ابعاد ستون و یا با استفاده از سر ستون، استفاده از بتن با مقاومت فشاری بالاتر، استفاده از فولاد برشی در اطراف ستون و استفاده از میله‌ها و ورقه‌های FRP برای جبران کمبود ظرفیت برشی.

- **میلگرد ها، سیم‌ها و یا خاموت‌های یک یا چند شاخه**

بر اساس ACI318 [۱۴]، استفاده از میلگرد، سیم، و یا خاموت یک یا چند شاخه در دال‌های تخت (یا پی) به عنوان فولاد برشی، در صورتی مجاز است که $d_3 = \max\{150\,mm, 16\Phi_T\}$ باشد، و در هر صورت فاصله‌ی بین وجه ستون و اولین ردیف از شاخه‌های خاموت اطراف ستون، نباید از $d/2$ بیش تر شود. اگر در اطراف ستون واقع در دال تخت جهت افزایش ظرفیت برشی دو طرفه‌ی دال، از خاموت‌های قائم برشی استفاده شده باشد، محاسبات برشی به صورت متداول انجام می‌گیرد که در مراجع طراحی جزئیات دقیق آن قابل دست یابی است. بر اساس آئین نامه ACI318 [۱۴]، استفاده از تنگ برشی یا خاموت برای دال‌های با ضخامت کمتر از ۱۰۰ میلی متر مجاز نمی‌باشد.

- **کلاهک برشی**

کلاهک برشی عبارت است از پروفیل‌های فولادی نظیر I شکل یا ناودانی، که در اطراف ستون و در امتداد خط واصل ستون‌ها در یک طول مشخص به کار می‌رود تا ظرفیت برشی دو طرفه‌ی دال بدون تیر در اطراف ستون را افزایش دهد. ACI-318 کاربرد کلاهک برشی را به ضوابط زیر محدود می‌کند [۱۴]:

۱- برش با ضریب دو طرفه‌ی اسمی در مقطعی به فاصله‌ی $d/2$ از بر ستون، V_n، به مقدار $V_n \le 3.6V_c = 0.6\sqrt{f_c'}b_o d$ محدود شود.

۲- هر بازوی کلاهک برشی باید با جوش نفوذی کامل به بازوی قرار گرفته در جهت متعامد متصل شود؛ و هر بازو باید در مقطع ستون به طور پیوسته عمل کند.

۳- عمق مقطع کلاهک برشی، h_v، نباید از ۷۰ برابر ضخامت جان مقطع، t_w، بیش تر باشد؛ یعنی $h_v \le 70t_w$.

۴- تمام بال‌های فشاری مقاطع فولادی که به عنوان کلاهک برشی به کار رفته است، در محدوده‌ی $0.3d$ از سطح فشاری دال قرار گیرد.

۵- نسبت α_v ، که به صورت نسبت سختی خمشی هر بازوی کلاهک برشی به سختی خمشی مقطع ترک خورده‌ی دال مرکب پیرامونی در عرض c_2+d تعریف می‌شود، از ۰/۱۵ کم‌تر نباشد. به عبارت دیگر: $\alpha_v = \frac{E_s I_x}{E_c I_{composite}} \ge 0.15$. در این رابطه E_s و E_c به ترتیب مدول الاستیسیته فولاد و بتن و I_x ممان اینرسی مقطع فولادی کلاهک برشی، و $I_{composite}$ ممان اینرسی مقطع ترک خورده‌ی دال مرکب در عرض c_2+d است که در بر گیرنده‌ی خصوصیات مقطع فولادی و میلگردهای خمشی نیز می‌باشد.

۶- ظرفیت لنگر پلاستیک بازوی کلاهک برشی، M_p، حداقل برابر باشد با $M_p = \frac{V_u}{2\phi n}\left[h_v + \alpha_s\left(l_v - \frac{c_1}{2}\right)\right]$ ؛ تا اطمینان حاصل شود که با رسیدن به مقاومت خمشی کلاهک برشی، برش نهایی حاصل می‌گردد.

۷- برش با ضریب دو طرفه‌ی اسمی در مقطع بحرانی برش دو طرفه برای کلاهک برشی، از $2V_c$ بیش تر نشود؛ یعنی $V_n \le 2V_c = \frac{1}{3}\sqrt{f_c'}b_0 d$ که b_0 محیط مقطع بحرانی برش منگنه‌ای برای کلاهک برشی است.

۱-۸-۳ اثر لنگر خمشی بر برش منگنه‌ای

در اتصالات دال به ستون در دال‌های بدون تیر، ممکن است لنگر نامتعادل M_u تحت شرایط بارگذاری مختلف وجود داشته باشد و از دال به ستون و یا از ستون به دال منتقل شود. چنین لنگر نامتعادل تحت بارهای ثقلی، در اتصالات میانی در اثر تفاوت لنگر نوار طراحی در دهانه‌های طرفین اتصال، و در اتصالات کناری در اثر وجود لنگر نوار طراحی در دهانه‌های کناری ایجاد می‌شود. هم چنین تحت بارهای باد، زلزله و یا سایر بارهای جانبی، انتقال بارهای جانبی از سازه به پی، سبب انتقال لنگر از ستون به دال (یا از دال به ستون) خواهد شد. در دال‌های دو طرفه‌ی بدون تیر، انتقال لنگر نامتعادل در اتصال دال به ستون یکی از مهم‌ترین و بحرانی‌ترین شرایط طراحی محسوب

می‌شود. جهت جزئیات مبسوط مربوط به این بخش، علاقه‌مندان می‌توانند به فصل ۱۴ کتاب طراحی سازه‌های بتن آرمه (تالیف دکتر مستوفی‌نژاد) مراجعه نمایند.