



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی عمران

## مقاوم‌سازی برش پانچ اتصالات دال – ستون با استفاده از

### پلیمرهای مسلح به الیاف (FRP)

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی عمران گرایش سازه

نام دانشجو:

امیرحسین فکور

استاد راهنما:

دکتر فرشید جندقی علائی

شهریورماه ۱۳۹۳

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## تعهد نامه

اینجانب امیرحسین فکور دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی عمران گرایش سازه دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مقاوم‌سازی برش پانچ اتصالات دال- ستون با استفاده از پلیمرهای مسلح به الیاف (FRP) تحت راهنمایی جناب دکتر فرشید جندقی علائی به عنوان استاد راهنما متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه / رساله تا کنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرکی یا امتیازی در هیچ‌جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «shahrood university of technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افراد که در به دست آوردن نتایج اصلی پایان‌نامه / رساله تاثیر گذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.

### تاریخ:

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب، برنامه های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحوی مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیم به:

ستاره تابناک آسمان امامت و ولایت حضرت

علی بن موسی الرضا (علیه السلام)

که توفیق تحصیل در جوار خویش را به اینجانب عطا فرمود.

تقدیم به:

## پدر و مادر عزیزم

آنها که وجودم، زندگیم و خوشبختیم را مدیونشان هستم و در سختی‌ها و ناملایمات روزگار، مشوق و معلم من بودند و به من درس زندگی و سخت‌کوشی، تلاش و صداقت را آموختند.

## همسر عزیزم

به پاس قدر دانی از قلبی آکنده از عشق و معرفت که محیطی سرشار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برای من فراهم آورده است.

تشکر و قدردانی:

سپاس ایزد منان که به من این فرصت را داد تا به این مرحله از علم  
رسیده و از هیچ موهبتی دریغ نکرد و در تمام مراحل زندگی مرا قوت  
قلب بود...

و با تشکر از استاد مهربانم جناب آقای دکتر فرشید جندقی علائی که  
با اخلاق نیکشان در این پایان نامه راهنمایم بودند...

## چکیده:

سیستم دال تخت، یکی از آسیب پذیرترین سیستم‌های سازه‌ای می‌باشد که به جز در مواردی که به طور مناسب طراحی و اجرا شده باشد، مستعد خرابی و فرو ریزش افزایش یافته است. بزرگ‌ترین عیب این سیستم، خطر گسیختگی ترد برش پانچ در اتصالات دال - ستون ناشی از انتقال برش و لنگر نامتعادل است. طبیعت ترد و ناگهانی این پدیده باعث فرو ریختن فزاینده تعدادی از ساختمان‌ها شده است. بنابراین نیاز به ایجاد یک روش موثر، قابل اطمینان و اقتصادی برای بهبود و مقاوم‌سازی آن‌ها احساس می‌شود. در این میان، مقاوم‌سازی با استفاده از الیاف FRP به دلیل مشخصات منحصر به فرد خود، روز به روز در حال افزایش است. در مقاوم‌سازی دال‌ها، استفاده از الیاف FRP بیشتر به منظور تقویت خمشی صورت می‌گیرد، لیکن استفاده از الیاف FRP در تقویت برشی دال‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته و به تحقیقات محدودی منحصر شده است. در این پایان‌نامه مقاوم‌سازی برشی اتصالات دال - ستون با استفاده از پلیمر مسلح به الیاف به کمک نرم افزار تحلیل المان محدود ABAQUS مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا جهت اطمینان از صحت نتایج حل عددی، یک نمونه آزمایشگاهی در برنامه مدل‌سازی شد و مدل تحلیلی حاصل به کمک نتایج آزمایشگاهی کالیبره گردید. این نمونه‌ها در نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS به صورت سه بعدی مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. بعد از اطمینان از صحت روند مدل‌سازی، حالت‌های مختلف قرارگیری صفحات FRP مدل‌سازی گردیده و حالت بهینه آن بدست آمده است. در انتها مطالعات پارامتریک روی نمونه تقویت شده، از جمله عرض و ضخامت و جنس صفحات FRP مورد مطالعه قرار گرفته است.

**واژه‌های کلیدی:** دال تخت بتن مسلح، برش پانچ، مقاوم‌سازی، المان محدود، FRP

## فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱- مقدمه.....
۳	۲-۱- مقاومت‌سازی سیستم‌های سازه‌ای دال تخت.....
۴	۱-۲- مقاومت‌سازی با استفاده از پلیمرهای مسلح به الیاف (FRP).....
۶	۳-۱- تشریح موضوع پایان‌نامه و اهداف پایان‌نامه.....
۷	۴-۱- ساختار پایان‌نامه.....
۹	فصل ۲: مبانی و مفاهیم رفتار اتصالات دال - ستون و مقاومت‌سازی آن‌ها
۱۰	۱-۲- مقدمه.....
۱۰	۲-۲- ساختار مصالح FRP.....
۲۰	۳-۲- انواع محصولات FRP.....
۲۳	۴-۲- مزیت‌های استفاده از FRP در تقویت سازه‌های بتنی.....
۲۵	۵-۲- الگوی ترک خوردگی و مکانیزم گسیختگی در اتصالات دال - ستون.....
۲۶	۶-۲- تفاوت بین گسیختگی خمشی و برش پانچ.....
۲۹	۷-۲- پارامترهای موثر بر ظرفیت برش پانچ در دال‌های تخت.....
۳۱	۸-۲- روش‌های افزایش ظرفیت برش پانچ در دال‌های تخت.....
۴۰	فصل ۳: مروری بر تاریخچه مطالعات آزمایشگاهی انجام شده
۴۱	۱-۳- مقدمه.....
۴۱	۲-۳- مروری اجمالی بر مطالعات آزمایشگاهی انجام شده.....
۴۵	۳-۳- بررسی تفصیلی سه مطالعه آزمایشگاهی انجام شده.....
	۳-۳-۱ مقاومت‌سازی دال‌های تخت بتن مسلح در برابر برش پانچ با استفاده از پلیمرهای
۴۵	مسلح به الیاف کربنی (بینیسی، بایراک، ۲۰۰۳) [2].....
	۳-۳-۲ مقاومت‌سازی برشی اتصالات میانی دال - ستون با استفاده از صفحات پلیمر
۶۱	مسلح به الیاف کربنی (هراجلی، سودکی، ۲۰۰۳) [3].....
	۳-۳-۳ مقاومت‌سازی اتصالات میانی دال - ستون در برابر برش پانچ با استفاده از
۷۲	CFRP (شرف، سودکی، ون داسن، ۲۰۰۶) [17].....
۸۷	فصل ۴: آشنایی با نرم‌افزار آباکوس و کالیبره کردن نمونه‌های آزمایشگاهی
۸۸	۱-۴- مقدمه.....
۸۸	۲-۴- تاریخچه روش اجزاء محدود.....



۹۰	۳-۴- تاریخچه برنامه ABAQUS
۹۲	۳-۴-۱- قابلیت های نرم افزار ABAQUS
۹۴	۴-۴- شیه سازی رفتار فشاری و کششی بتن
۹۴	۴-۴-۱- اصول فرمول بندی خسارت پلاستیسیته بتن
۹۷	۴-۵- کالیبره کردن نرم افزار
۹۸	۴-۵-۱- نمونه کنترلی کالیبره شده آزمایش بینسی و بایراک
۹۸	۴-۵-۱-۱- مشخصات هندسی و مصالح دال
۱۱۲	۴-۵-۲- نمونه کالیبره شده آزمایش شرف، سودکی، ون داسن
۱۱۲	۴-۵-۲-۱- مشخصات هندسی و مصالح دال

## فصل ۵: مقاومت سازی اتصالات دال - ستون و انجام مطالعات پارامتریک ۱۲۱

۱۲۲	۵-۱- مقدمه
۱۲۲	۵-۲- مقاومت سازی اتصالات دال - ستون و مطالعات پارامتریک روی نمونه های تقویت شده
	۵-۲-۱- مقاومت سازی اتصالات دال - ستون با استفاده از صفحات پلیمری مسلح به الیاف (FRP)
۱۲۲	۵-۲-۲- مطالعات پارامتریک روی اتصالات دال - ستون مقاوم سازی شده با صفحات پلیمری مسلح به الیاف (FRP)
۱۳۵	۵-۲-۲-۱- بررسی تاثیر مقاومت فشاری بتن بر ظرفیت اتصال
۱۳۷	۵-۲-۲-۲- بررسی تاثیر مقدار آرماتور بر ظرفیت اتصال
۱۴۰	۵-۲-۲-۳- بررسی تاثیر ضخامت صفحات بر ظرفیت اتصال
۱۴۲	۵-۲-۲-۴- بررسی تاثیر عرض صفحات بر ظرفیت اتصال
۱۴۴	۵-۲-۲-۵- بررسی تاثیر جنس صفحات بر ظرفیت اتصال

## فصل ۶: تجزیه و تحلیل نتایج ۱۴۷

۱۴۸	۶-۱- مقدمه
۱۴۸	۶-۲- ظرفیت باربری نمونه های تقویت شده
۱۵۰	۶-۳- نتیجه گیری
۱۵۳	۶-۴- پیشنهادها برای تحقیقات آتی

## فصل ۷: مراجع ۱۵۵

## فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) مکانیزم گسیختگی برش پانچ [1]..... ۲
- شکل (۲-۱) مقاوم سازی دال از طریق چسباندن صفحات FRP به وجه کششی دال..... ۵
- شکل (۳-۱) مقاوم سازی دال با استفاده از الیاف FRP به صورت آرماتور برشی..... ۶
- شکل (۱-۲) الیاف شیشه تولید شده..... ۱۲
- شکل (۲-۲) الیاف کربن تولید شده..... ۱۳
- شکل (۳-۲) الیاف آرامید تولید شده..... ۱۵
- شکل (۴-۲) نمودار تنش - کرنش انواع مختلف الیاف پلیمری [4]..... ۱۶
- شکل (۵-۲) ساختار میکروسکوپی مواد مرکب الیافی..... ۱۶
- شکل (۶-۲) نمونه‌ای از ورق FRP دو جهته..... ۲۱
- شکل (۷-۲) نمونه‌ای از میلگردهای FRP..... ۲۲
- شکل (۸-۲) منحنی‌های پاسخ برای گسیختگی خمشی و برش پانچ [6]..... ۲۷
- شکل (۹-۲) مخروط برش پانچ با زوایای تمایل ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه..... ۲۸
- شکل (۱۰-۲) (a) سرستون، (b) کتیبه..... ۳۲
- شکل (۱۱-۲) خاموت‌های برشی ACI، نحوه اجرای خاموت‌های برشی [8] ACI..... ۳۳
- شکل (۱۲-۲) نحوه قرارگیری حلقه‌های برشی در یک ستون میانی..... ۳۴
- شکل (۱۳-۲) نحوه قرارگیری گل‌میخ برشی DEHA در یک ستون کناری [7]..... ۳۶
- شکل (۱۴-۲) گل‌میخ برشی AncoPLUS [7]..... ۳۷
- شکل (۱-۳) برپایی آزمایش و جزئیات نمونه‌ها..... ۴۸
- شکل (۲-۳) الگوهای الیاف مسلح پلیمری کربنی جهت مقاوم سازی نمونه‌ها..... ۵۱
- شکل (۳-۳) مقایسه پاسخ بار - خیز نمونه‌ها..... ۵۲
- شکل (۴-۳) سطوح گسیختگی و مقاطع عرضی..... ۵۵
- شکل (۵-۳) پروفیل کرنش فولاد در بارهای نهایی..... ۵۷
- شکل (۶-۳) پروفیل کرنش‌های فشاری شعاعی و مماسی در بتن..... ۵۸
- شکل (۷-۳) محیط‌های پلیمر مسلح به الیاف کربنی..... ۵۹
- شکل (۸-۳) پروفیل کرنش در پلیمر مسلح به الیاف کربنی در بارهای نهایی..... ۶۰
- شکل (۹-۳) مقاومت بتن در داخل ناحیه مسلح شده برشی..... ۶۰

- شکل (۳-۱۰) رابطه بار اعمالی - کرنش در پلیمر مسلح به الیاف کربنی برای نمونه‌های آزمایش ..... ۶۱
- شکل (۳-۱۱) ابعاد و جزئیات نمونه‌های مسلح ..... ۶۳
- شکل (۳-۱۲) پاسخ بار - تغییر مکان در نمونه‌ها (الف) سری A1، (ب) سری A2، (ج) سری B1، (د) سری B2 ..... ۶۷
- شکل (۳-۱۳) بار - پاسخ تنش در صفحات CFRP نمونه‌ها (الف) سری A1، (ب) سری A2 (ج) سری B1، (د) سری B2 ..... ۶۷
- شکل (۳-۱۴) الگوی ترک خوردگی تیپ در بار گسیختگی ..... ۶۹
- شکل (۳-۱۵) نمونه تیپ آزمایش و جزئیات آرماتور گذاری ..... ۷۳
- شکل (۳-۱۶) نمونه‌های مقاوم سازی شده با CFRP ..... ۷۵
- شکل (۳-۱۷) رفتار بار - تغییر مکان نمونه‌های مقاوم سازی شده با چهار نوار CFRP ..... ۷۹
- شکل (۳-۱۸) رفتار بار - تغییر مکان نمونه‌های مقاوم سازی شده با هشت نوار CFRP ..... ۷۹
- شکل (۳-۱۹) پروفیل خیز در تراز بار گذاری 400 KN برای تمامی نمونه‌ها ..... ۸۱
- شکل (۳-۲۰) ترک‌های گسیختگی برش پانچ ..... ۸۳
- شکل (۳-۲۱) توزیع کرنش در آرماتورهای فولادی در راستای محورهای متعامد در تراز بار گذاری 400 KN ..... ۸۴
- شکل (۳-۲۲) پروفیل کرنش در نوارهای متعامد و مورب نمونه 8-O&S-CFRP ..... ۸۵
- شکل (۴-۱) رفتار المان بتن تحت بار سیکلی [19] ..... ۹۵
- شکل (۴-۲) المان به کار رفته در بتن براساس راهنمای ABAQUS ..... ۹۹
- شکل (۴-۳) رفتار واقعی المان تحت خمش خالص ..... ۱۰۰
- شکل (۴-۴) المان با انتگرال گیری کامل تحت خمش خالص ..... ۱۰۰
- شکل (۴-۵) منحنی تنش - کرنش بتن معمولی تحت کشش ..... ۱۰۲
- شکل (۴-۶) منحنی تنش - کرنش بتن معمولی تحت فشار ..... ۱۰۲
- شکل (۴-۷) دال بتنی مدل سازی شده ..... ۱۰۳
- شکل (۴-۸) المان خرپای به کار رفته به عنوان آرماتور طولی دال ..... ۱۰۴
- شکل (۴-۹) آرماتورهای دال و خصوصیات ناحیه ادغام شده (Embedded region) در ABAQUS ..... ۱۰۵
- شکل (۴-۱۰) خصوصیات آرماتورهای فولادی ..... ۱۰۵
- شکل (۴-۱۱) مدل شبکه بندی شده نمونه ctrl.1 ..... ۱۰۶
- شکل (۴-۱۲) شرایط مرزی تقارن ..... ۱۰۷

- شکل (۴-۱۳) نحوه بارگذاری..... ۱۰۷
- شکل (۴-۱۴) نمودار کالیبره شده پاسخ بار- تغییر مکان نمونه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی..... ۱۰۸
- شکل (۴-۱۵) تغییر شکل نمونه ctrl.1..... ۱۱۰
- شکل (۴-۱۶) الگوی ترک‌ها..... ۱۱۰
- شکل (۴-۱۷) جاری شدن آرماتورها در محل پایه شبیه‌سازی شده ستون..... ۱۱۱
- شکل (۴-۱۸) تخریب بتن در ناحیه کششی..... ۱۱۱
- شکل (۴-۱۹) جزئیات آرماتورگذاری..... ۱۱۲
- شکل (۴-۲۰) نمودار تنش- کرنش لایه های CFRP..... ۱۱۳
- شکل (۴-۲۱) نمودار تنش- کرنش صفحات پلیمری مرکب کربنی در راستای الیاف..... ۱۱۴
- شکل (۴-۲۲) شبکه‌بندی نمونه تقویت شده..... ۱۱۵
- شکل (۴-۲۳) شرایط مرزی تقارن..... ۱۱۵
- شکل (۴-۲۴) نحوه بارگذاری..... ۱۱۶
- شکل (۴-۲۵) نمودار کالیبره شده پاسخ بار- تغییر مکان نمونه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی..... ۱۱۷
- شکل (۴-۲۶) تغییر شکل نمونه..... ۱۱۹
- شکل (۴-۲۷) الگوی ترک‌ها..... ۱۱۹
- شکل (۴-۲۸) تخریب بتن در ناحیه فشاری..... ۱۲۰
- شکل (۴-۲۹) تنش در FRP..... ۱۲۰
- شکل (۵-۱) نمودار تنش- کرنش صفحات پلیمری مرکب کربنی در راستای الیاف..... ۱۲۴
- شکل (۵-۲) شبکه‌بندی نمونه تقویت شده 4-O-a-CFRP..... ۱۲۵
- شکل (۵-۳) نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های ctrl و 4-O-a-CFRP..... ۱۲۵
- شکل (۵-۴) شبکه‌بندی نمونه تقویت شده 4-O-o-CFRP..... ۱۲۷
- شکل (۵-۵) نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های ctrl و 4-O-o-CFRP..... ۱۲۷
- شکل (۵-۶) شبکه‌بندی نمونه تقویت شده 4-S-a-CFRP..... ۱۲۹
- شکل (۵-۷) نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های ctrl و 4-S-a-CFRP..... ۱۲۹
- شکل (۵-۸) شبکه‌بندی نمونه تقویت شده 4-S-o-CFRP..... ۱۳۱
- شکل (۵-۹) نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های ctrl و 4-S-o-CFRP..... ۱۳۱
- شکل (۵-۱۰) شبکه‌بندی نمونه تقویت شده 8-O-ao-CFRP..... ۱۳۳
- شکل (۵-۱۱) نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های ctrl و 8-O-ao-CFRP..... ۱۳۳

- شکل (۵-۱۲) نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های ctrl-fc25 و ctrl-fc30 ..... ۱۳۵
- شکل (۵-۱۳) نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های ctrl-d16 و ctrl-d22 ..... ۱۳۸
- شکل (۵-۱۴) نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-CFRP-th2 ..... ۱۴۰
- شکل (۵-۱۵) نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-CFRP-b200 ..... ۱۴۲
- شکل (۵-۱۶) نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-GFRP ..... ۱۴۴
- شکل (۶-۱) نمودار ستونی مقادیر بار نهایی نمونه‌ها (KN) ..... ۱۴۹
- شکل (۶-۲) نمودار ستونی مقادیر تغییر مکان نهایی نمونه‌ها (mm) ..... ۱۴۹

## فهرست جداول

جدول (۱-۲) خصوصیات مکانیکی مهم‌ترین الیاف تقویت کننده	۱۰
جدول (۱-۳) مشخصات مصالح	۴۳
جدول (۲-۳) خلاصه‌ای از نتایج آزمایش	۴۹
جدول (۳-۳) خلاصه‌ای از پارامترهای آزمایش	۵۹
جدول (۴-۳) مدهای گسیختگی و مقاومت نهایی نرمال‌سازی شده	۶۱
جدول (۵-۳) معرفی نمونه‌ها و تشریح الگوهای CFRP	۶۹
جدول (۶-۳) مشخصات نوارهای CFRP و چسب	۷۱
جدول (۷-۳) خلاصه‌ای از نتایج آزمایش	۷۳
جدول (۱-۴) مشخصات نمونه دال آزمایشگاهی	۹۲
جدول (۲-۴) مقادیر بار ترک‌خوردگی، جاری شدن آرماتور و گسیختگی نمونه‌ها	۱۰۳
جدول (۳-۴) مشخصات مصالح (CFRP)	۱۰۷
جدول (۴-۴) مقادیر بار ترک‌خوردگی، جاری شدن آرماتور و گسیختگی نمونه‌ها	۱۱۲
جدول (۱-۵) مشخصات مصالح (CFRP)	۱۱۷
جدول (۲-۵) مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌های ctrl و 4-O-a-CFRP	۱۲۰
جدول (۳-۵) مقادیر شکل‌پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و 4-O-a-CFRP	۱۲۰
جدول (۴-۵) مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌های ctrl و 4-O-o-CFRP	۱۲۲
جدول (۵-۵) مقادیر شکل‌پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و 4-O-o-CFRP	۱۲۲
جدول (۶-۵) مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌های ctrl و 4-S-a-CFRP	۱۲۴
جدول (۷-۵) مقادیر شکل‌پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و 4-S-a-CFRP	۱۲۴
جدول (۸-۵) مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌های ctrl و 4-S-o-CFRP	۱۲۶
جدول (۹-۵) مقادیر شکل‌پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و 4-S-o-CFRP	۱۲۶
جدول (۱۰-۵) مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌های ctrl و 8-O-ao-CFRP	۱۲۸
جدول (۱۱-۵) مقادیر شکل‌پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و 8-O-ao-CFRP	۱۲۸
جدول (۱۲-۵) مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌های ctrl و ctrl-fc25 و ctrl-fc30	۱۳۰
جدول (۱۳-۵) درصد تغییر مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌های ctrl-fc25 و ctrl-fc30 نسبت به نمونه	
ctrl	۱۳۰
جدول (۱۴-۵) مقادیر شکل‌پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و ctrl-fc25 و ctrl-fc30	۱۳۰
جدول (۱۵-۵) مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌های ctrl و ctrl-d16 و ctrl-d22	۱۳۲

جدول (۵-۱۶) درصد تغییر مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌های ctrl-d16 و ctrl-d22 نسبت به نمونه

ctrl	۱۳۳.....
جدول (۵-۱۷) مقادیر شکل پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و ctrl-d16 و ctrl-d22	۱۳۳.....
جدول (۵-۱۸) مقادیر بار- تغییر مکان ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-CFRP-th2	۱۳۵.....
جدول (۵-۱۹) مقادیر شکل پذیری اتصال ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-CFRP-th2	۱۳۵.....
جدول (۵-۲۰) مقادیر بار و تغییر مکان نهایی ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-CFRP-b200	۱۳۷.....
جدول (۵-۲۱) مقادیر شکل پذیری اتصال ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-CFRP-b200	۱۳۷.....
جدول (۵-۲۲) مشخصات مصالح (GFRP)	۱۳۸.....
جدول (۵-۲۳) مقادیر بار و تغییر مکان ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-GFRP	۱۳۹.....
جدول (۵-۲۴) مقادیر شکل پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-GFRP	۱۳۹.....
جدول (۶-۱) مقایسه ظرفیت باربری نمونه‌ها	۱۴۱.....

فهرست علائم اختصاری

$(N/mm^2) \sigma$ .....	تنش
$(N) F$ .....	نیرو
$(mm) d$ .....	تغییر مکان



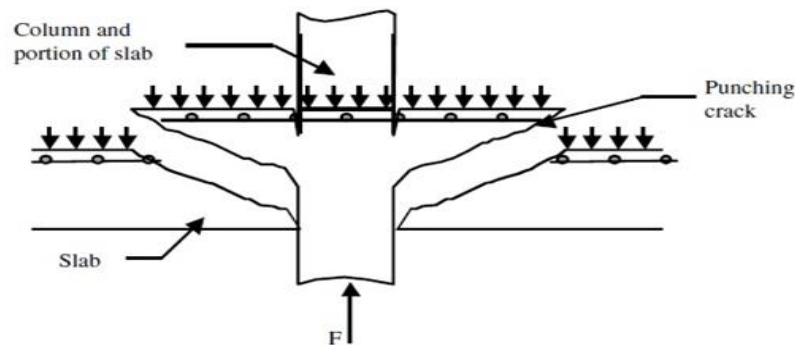
# فصل ۱:

## مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

دال‌های تخت بتن مسلح از یک پوسته با ضخامت یکنواخت که به طور مستقیم روی ستون تکیه دارد، تشکیل شده‌اند. فقدان تیرها، این سیستم را به دلیل مزیت‌هایی از جمله اقتصادی بودن قالب بندی، زمان اجرای کوتاه‌تر، ارتفاع نهایی کمتر، ساختمان با فضای آزاد بیشتر و انعطاف‌پذیری معماری مطلوب کرده است.

بزرگ‌ترین عیب سیستم دال تخت، خطر گسیختگی ترد برش پانچ در اتصال دال-ستون ناشی از انتقال برش و لنگر نامتعادل است. بارهای قائم اعمالی به سیستم کف و لنگرهای انتقال یافته از ستون‌ها ممکن است در پیرامون اتصال دال-ستون تنش‌های برشی بیش از حد ایجاد کنند. لنگرهای نامتعادل به صورت طبیعی در اتصالات دال-ستون گوشه و کناری رخ می‌دهند. لنگرهای نامتعادل همچنین ممکن است در اتصالات میانی با بارهای قائم نامساوی در دهانه‌های مجاور یا در هر اتصالی به دلیل ترکیب بارهای قائم و نیروهای جانبی ناشی از باد یا اثرات القایی زلزله رخ دهند.



شکل (۱-۱) مکانیزم گسیختگی برش پانچ [1]

گسیختگی برش پانچ به صورت گسیختگی موضعی و ترد اتصال دال-ستون که در آن ستون به همراه بخشی از دال به داخل دال فشار وارد می‌کند تعریف می‌شود. هنگامی که یک اتصال دال-ستون تا حد ظرفیت باربری خود بارگذاری می‌شود، سلسله وقایع آتی در آن مشاهده می‌گردد:

به محض رسیدن نیروی داخلی به ممان ترک خوردگی واحد عرض، ترک‌های خمشی در پیرامون ناحیه بارگذاری مشاهده می‌شود. ترک‌های مورب برشی که با زاویه بین ۲۰ تا ۳۵ درجه نسبت به وجه کششی دال ایجاد می‌شوند از حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد بار نهایی شروع به ایجاد شدن می‌نمایند. ترک‌های مورب در ستون‌های دایروی به شکل مخروط ناقص و در ستون‌های مستطیلی به شکل هرم ناقص می‌باشند. در این مرحله برش توسط ناحیه فشاری و نیز از طریق اصطکاک و قفل و بست بین دانه‌ای در راستای سطح ترک‌های مورب تحمل می‌گردد. اتصال دال-ستون در این نقطه پایدار بوده و می‌تواند بدون تغییر در ظرفیت باربری بارگذاری و باربرداری گردد. تسلیم در آرماتورهای طولی در وجه اتصال آغاز شده و در طول دهانه گسترش می‌یابد. گسترش تسلیم شدگی به نسبت آرماتور بستگی دارد. با افزایش عرض ترک‌های مورب، اثر قفل و بست بین دانه‌ای و اصطکاک کاهش می‌یابد. چون سهم عملکرد میخ پرچی افزایش پیدا می‌کند. هنگامی که ترک‌های مورب به داخل ناحیه ضعیف فشاری نفوذ کنند، بدون هیچ‌گونه هشدارگی گسیختگی رخ می‌دهد. [1]

## ۱-۲- مقاومت‌سازی سیستم‌های سازه‌ای دال تخت

در سازه‌های بتن آرمه، بنا به دلایل مختلفی که در طول عمر سازه رخ می‌دهند، لزوم تجدید نظر در سازه ایجاد می‌شود. جایگزینی سازه با یک سازه جدید و یا مقاوم‌سازی آن روش‌هایی هستند که جهت مقابله با این مشکل به ذهن می‌رسند. مقاوم‌سازی سازه‌ها در بسیاری موارد راه حل مناسب‌تری می‌باشند، زیرا از بروز مشکلات زیاد و صرف هزینه‌های هنگفت جلوگیری می‌کند. دال‌های بتن آرمه نیز از این قاعده مستثنی نبوده، و گاهی موارد نیاز به مقاوم‌سازی آن‌ها احساس می‌شود. سیستم‌های سازه‌ای دال تخت موجود بنا به دلایل ذیل ممکن است احتیاج به مقاوم‌سازی داشته باشند [2]:

### ۱- تغییر در تقاضای تغییرمکان یا نیرو در سازه یا اجزای انفرادی آن: سیستم‌های

سازه‌ای که برای نیروهای توصیه شده توسط یک آئین نامه خاص و در یک زمان خاص طراحی و اجرا می‌شوند، ممکن است در طول عمر مفید خود در معرض نیروها و

تغییر مکان‌هایی بالاتر از مقادیر لحاظ شده در طراحی اولیه خود قرار گیرند. به عنوان مثال می‌توان به تغییر در کاربری کل یا بخشی از سازه و یا تغییر در نیروهای طراحی توصیه شده به دلیل افزایش سطوح لرزه‌ای اشاره کرد. در چنین موقعیت‌هایی یا موقعیت‌های مشابه دیگر تقاضای تغییر مکان و مقاومت اجزای سازه‌ای نیز افزایش می‌یابد.

## ۲- تغییر در ظرفیت مورد نیاز اجزای سازه‌ای: ممکن است شرایطی پیش آید که ظرفیت

طراحی اجزای سازه‌ای ناکافی باشد. طراحی‌ها و روش‌های اجرایی قدیمی معمولاً منجر به طراحی نا ایمن می‌شوند (فقدان آرماتور پیوستگی، فقدان آرماتور برشی و ...). به علاوه زوال وابسته به زمان در اجزای سازه‌ای ممکن است باعث کاهش ظرفیت گردد. مثال‌های بارز از سیستم‌های دال تخت موجود، اتصالات دال-ستون غیر شکل‌پذیر که فقط برای تحمل بارهای قائم طراحی شده‌اند و اتصالات دال-ستونی که با توجه به نیازهای امتداد آرماتورهای تحتانی ناکارا بوده و تا دهه‌ی ۱۹۸۰ ساخته می‌شدند، می‌باشد.

جهت مقاوم‌سازی دال‌های موجود روش‌های مختلفی وجود دارد که توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است. از آن جمله می‌توان به نصب تیر در وجه کششی دال در مجاورت ستون، قرار دادن گل‌میخ در جهت عمود بر صفحه‌ی دال، استفاده از صفحات فولادی در وجوه دال و استفاده از الیاف پلیمری مرکب FRP در آرایش‌های مختلف اشاره نمود. در این میان استفاده از الیاف FRP به دلیل مشخصات منحصر به فرد خود، روز به روز در حال افزایش است.

## ۱-۲-۱ - مقاوم‌سازی با استفاده از پلیمرهای مسلح به الیاف (FRP)

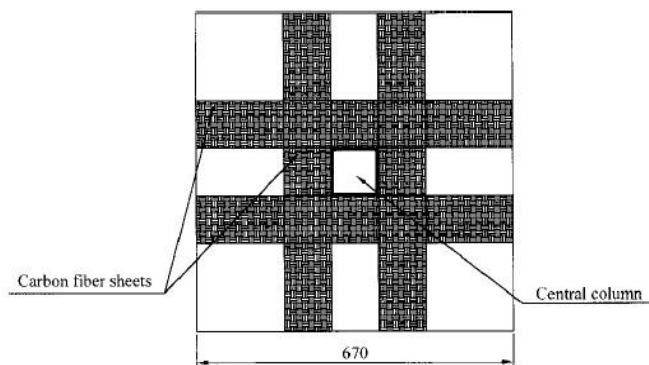
استفاده از الیاف FRP در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی طی چند سال اخیر توسعه بسیاری یافته است. مقاوم‌سازی به منظورهای مختلفی از جمله تقویت خمشی، تقویت برشی، افزایش محصورشدگی، ترمیم آسیب‌های ناشی از خوردگی و مانند آن‌ها با استفاده از این الیاف صورت می‌گیرد. این الیاف به

دلیل وزن کم، سهولت اجرا، مقاومت کششی بالا، عدم ایجاد تغییر زیاد در ابعاد عضو و نیز دوام بالا در برابر شرایط محیطی سخت، تا حدود زیادی جایگزین فولاد که دارای مشکلات زیادی از جمله سنگینی، سختی اجرا و خوردگی می‌باشد، شده است.

در مقاوم‌سازی دال‌های بتن آرمه، استفاده از الیاف FRP بیشتر به منظور تقویت خمشی صورت می‌گیرد. این تقویت با چسباندن الیاف به وجه کششی دال در ناحیه دارای لنگر ماکزیمم صورت می‌گیرد، که باعث افزایش چشم‌گیری در ظرفیت دال می‌شود. امروزه استفاده از الیاف FRP جهت افزایش ظرفیت برش پانچ سازه‌ها و به ویژه پل‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است و تحقیقات بر روی آن ادامه دارد. تا به حال دو روش برای استفاده از این الیاف جهت افزایش ظرفیت برش پانچ دال‌ها پیشنهاد شده است که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌شود.

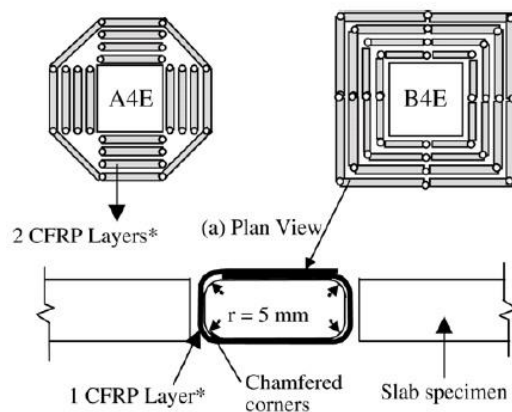
#### ۱- چسباندن صفحات به وجه کششی دال در اطراف ستون: در این روش، صفحات FRP به

موازات آرماتورهای اصلی و یا در راستای مورب معمولاً به وجه کششی دال چسبانده می‌شوند. به عقیده محققینی مانند هراجلی و سودکی [3]، این الیاف از گسترش ترک‌ها جلوگیری کرده و سبب افزایش بار قابل تحمل و همچنین سختی خمشی اتصال می‌شوند.



شکل (۲-۱) مقاوم‌سازی دال از طریق چسباندن صفحات FRP به وجه کششی دال

۲- قرار دادن الیاف به صورت عمود بر صفحه‌ی دال: در این روش، سوراخ‌هایی در وجه فشاری دال ایجاد می‌شود که این سوراخ‌ها تا صفحه آرماتورها امتداد می‌یابند. سپس الیاف FRP در جهت عمود بر دال قرار داده می‌شوند و اطراف آنها به وسیله‌ی چسب اپوکسی پر می‌شود. این الیاف در دال، عملکردی مشابه با میلگردهای برشی خواهند داشت و به افزایش ظرفیت باربری دال کمک می‌کنند [2].



شکل (۳-۱) مقاوم‌سازی دال با استفاده از الیاف FRP به صورت آرماتور برشی

### ۳-۱- تشریح موضوع پایان‌نامه و اهداف پایان‌نامه

هدف از انجام این پایان‌نامه، مدل‌سازی صحیح اتصال دال-ستون در نرم‌افزار المان محدود ABAQUS و بررسی تاثیر نصب صفحات FRP در مقاوم‌سازی برش پانچ با متغیرهای گوناگون می‌باشد. برای این منظور ابتدا صحت‌سنجی نرم‌افزار اجزای محدود یک اتصال دال-ستون توسط نرم‌افزار ساخته شده و با نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی ارائه شده در متون مرجع مقایسه شده است. این نمونه‌ها در نرم‌افزار اجزاء محدود ABAQUS به طور سه بعدی مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند. بعد از اطمینان از صحت روند مدل‌سازی، با تغییر پارامترهای موثر همانند مقاومت فشاری بتن، قطر آرماتورهای کششی و جنس لایه‌های FRP و ... روی مقدار ظرفیت باربری و شکل‌پذیری بررسی شده است.

## ۱-۴- ساختار پایان نامه

سرفصل‌های مربوط به پایان‌نامه علاوه بر این فصل به شرح زیر می‌باشد:

**فصل دوم** (مبانی و مفاهیم رفتار اتصالات دال-ستون و مقاوم‌سازی آنها): که در آن به معرفی FRP

شامل اجزاء تشکیل دهنده، خصوصیات فیزیکی و مکانیکی، فرآیند ساخت کامپوزیت‌ها و روش‌های مقاوم‌سازی اتصالات دال-ستون با FRP پرداخته شده است.

**فصل سوم** (مروری بر مطالعات آزمایشگاهی و عددی انجام شده): این فصل به بررسی روند مطالعات

آزمایشگاهی اتصالات دال-ستون‌های تقویت شده با نوارها و میلگردهای FRP به صورت مختصر و تفصیلی پرداخته شده است.

**فصل چهارم** (آشنایی با نرم‌افزار ABAQUS و کالیبره کردن با نتایج آزمایشگاهی): این فصل به

آشنایی با نرم‌افزار ABAQUS و چگونگی مدل‌سازی بتن، فولاد و FRP می‌پردازد. همچنین نمونه‌های عددی در نرم‌افزار جهت کالیبره کردن با نتایج آزمایشگاهی مدل‌سازی و مقایسه شده است.

**فصل پنجم** (مشخصات نمونه‌های عددی و نتایج اولیه): این فصل به مقاوم‌سازی با حالت‌های

مختلف قرارگیری صفحات FRP به وجه کششی دال و مطالعات پارامتریک بر روی آنها می‌پردازد.

**فصل ششم** (تجزیه و تحلیل نتایج): این فصل به بررسی نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی

نمونه‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج می‌پردازد.

**فصل هفتم** (مراجع): این فصل به معرفی مراجع و منابع استفاده شده در پایان‌نامه می‌پردازد.





## **فصل ۲:**

**مبانی و مفاهیم رفتار اتصالات**

**دال – ستون و مقاومسازی آنها**

## ۲-۱- مقدمه

سازه‌های بتنی ممکن است به دلایل مختلفی دچار ضعف و آسیب شده و نیاز به ترمیم یا تقویت داشته باشند. تقویت به معنی افزایش مقاومت و باربری اعضای ضعیف در مقابل بارهای وارده و ترمیم، افزایش باربری و مقاومت اعضای صدمه دیده می‌باشد. این ضعف‌ها و آسیب دیدگی‌ها ممکن است به شکل‌های مختلفی خود را در سازه نشان دهند و قبل از اینکه سازه مورد نظر دچار آسیب جدی شود، در صدد مرمت و تقویت آن باشیم. اگرچه نمی‌توان با هزینه‌های منطقی و معقول ایمنی ساختمانی را تا حد خیلی زیاد بالا برد، ولی دلیلی هم ندارد که آن را به حال خود رها کرد. بلکه عقل سلیم و منطق مهندسی حکم می‌کند که با اختیار کردن حداقل میزان دخالت در وضع ساختمان متناسب با امکانات و اقتصاد هر میزان ایمنی را که دستیابی به آن در چارچوب منطق و امکانات میسر است تامین کنیم.

## ۲-۲- ساختار مصالح FRP

### • مواد FRP

FRP نوعی ماده کامپوزیت متشکل از دو بخش فیبر یا الیاف تقویتی است که به وسیله یک ماتریس چسب از جنس پلیمر احاطه شده‌اند.

در مواد FRP عموماً سه ناحیه متمایز، شامل فاز پیوسته (ماتریس)، فاز ناپیوسته (تقویت کننده) و لایه مرزی بین این دو فاز وجود دارد که تعیین کننده خواص و مشخصه‌های ماده مرکب می‌باشد. الیاف نقش اصلی در مقاومت و مشخصات مکانیکی ماده مرکب دارد و ماتریس، نقش توزیع بار بین الیاف و محافظت آن در برابر عوامل محیطی را دارد. فیبرهای تشکیل دهنده می‌توانند در یک راستا یا عمود بر هم قرار داشته باشند.

• انواع الیاف

مهمترین الیاف مورد استفاده در صنعت براساس فیبر تشکیل دهنده آن عبارتند از: الیاف شیشه، الیاف کربن، و الیاف آرامید. به منظور انجام مقایسه، خواص مکانیکی مهمترین الیافهای تقویت کننده، در جدول (۱-۲) ارائه شده است. در یک ماده مرکب با توجه به خواص مورد نیاز می توان از چند نوع الیاف نیز استفاده کرد که به آنها مواد مرکب مخلوط می گویند.

جدول (۱-۲): خصوصیات مکانیکی مهم ترین الیاف تقویت کننده [4]

فقطر لیف (نار)	کرنش در شکست (%)	مقاومت کششی MPa	مدول ارتجاعی GPa	وزن مخصوص N/mm <sup>3</sup> (E - 5)	نوع مواد	
۷	۱/۲	۲۰۵۰-۳۷۹۰	۲۲۰-۲۴۰	۱/۷	همه منظوره	الیاف کربن
۷	۱/۴	۳۷۹۰-۴۸۲۰	۲۲۰-۲۴۰	۱/۸	مقاومت بالا	
۷	۱/۵	۴۸۲۰-۶۲۰۰	۲۲۰-۲۴۰	۱/۸	مقاومت خیلی بالا	
۷	۰/۵	۱۷۲۰-۳۱۰۰	۳۴۰-۵۲۰	۱/۹	مدول بالا	
۷	۰/۲	۱۳۸۰-۲۴۰۰	۵۲۰-۶۹۰	۲	مدول خیلی بالا	
۱۰-۱۹	۴/۵	۱۸۶۰-۲۶۸۰	۶۹-۷۲	۲/۵۵	شیشه نوع E	الیاف شیشه
۱۲	۵/۴	۳۴۴۰-۴۱۴۰	۸۶-۹۰	۲/۵	شیشه نوع S	
۱۲	۲/۵	۳۴۴۰-۴۱۴۰	۶۹-۸۳	۱/۴	همه منظوره	الیاف آرامید
۱۲	۱	۳۴۴۰-۴۱۴۰	۱۱۰-۱۲۴	۱/۴۷	کارانی بالا	
-	-	۳۴۰-۲۶۰۰	۲۰۰	۷/۸	آهن	مواد غیر لیفی
-	-	۶۲۰-۶۴۰	۷۰	۲/۷	آلیاژ آلومینیوم	
-	-	-	۶۰	۲/۶	شیشه معدنی	
-	۱/۵-۶	۵۰-۹۰	۲-۳/۵	۱/۲	اپوکسی	چسبها
-	۱-۲۵	۴۰-۸۵	۲-۳	۱/۴	پلی استر	
-	۰/۵	-	۷	۱/۴	اتلیک	

## • الیاف شیشه

الیاف شیشه رایج‌ترین و پر مصرف‌ترین نوع الیاف مورد استفاده در صنعت کامپوزیت‌ها است. برحسب نوع و ترکیب مواد به کار رفته در تهیه آن‌ها، الیاف شیشه به انواع گوناگون تقسیم‌بندی می‌شوند. مزایا و معایب الیاف شیشه در مقایسه با الیاف دیگر به شرح زیر است:

مزایا: قیمت پائین، استحکام کششی بالا، مقاومت شیمیایی بالا، خواص عایقی بالا (حرارتی و مکانیکی) معایب: مدول کششی پائین، وزن مخصوص نسبتاً بالا، حساسیت به سایش در حین حمل و نقل، مقاومت خستگی پائین، شکننده بودن، سختی بالا (سایش قالب‌ها و کندی ابزار برش)

عوامل موثر بر استحکام الیاف شیشه: بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که خواص الیاف شیشه علاوه بر مواد به کار رفته در ساختار آن‌ها به عوامل دیگری مانند شرایط محیطی و ... نیز وابسته است. خلاصه نتایج پاره‌ای از بررسی‌ها عبارتند از:

- سرعت اعمال بار: استحکام الیاف با افزایش سرعت کشش اعمال شده در حین آزمایش کشش، افزایش می‌یابد.
- دما: استحکام الیاف با افزایش دما کاهش می‌یابد.
- رطوبت: استحکام الیاف با افزایش رطوبت کاهش می‌یابد.

در شکل (۱-۲) انواع الیاف شیشه تولید شده نشان داده شده است.



ج- الیاف خرد



ب- پارچه بافت درشت



الف- پارچه بافت ریز

شکل (۱-۲) الیاف شیشه تولید شده

## • الیاف کربن

الیاف کربن به مراتب باریک‌تر از موی انسان بوده و دارای قطری بین ۶ تا ۱۰ میکرون می‌باشند.

مزایای اصلی الیاف کربن عبارتند از:

نسبت بسیار زیاد استحکام به وزن، نسبت بالای مدول کششی به وزن، استحکام بالای خستگی، ضریب

انبساط حرارتی بسیار پائین و مقاومت بالا در برابر خوردگی

**معایب:** شکننده بودن، هادی الکتریکی، کرنش کم در شکست، قیمت بالا، الیاف کربن از نظر خواص

فیزیکی و مکانیکی رفتاری ناهمسان از خود نشان می‌دهد. به همین جهت، مدول ارتجاعی آنها در

جهت صفحات بنیادین در جهت محور طولی الیاف باعث تولید الیاف با مدول بالا می‌باشد که با توجه

به وزن مخصوص کم این مواد (حدود  $20 \text{ KN/m}^3$ ) در نهایت الیافی با مدول ارتجاعی ویژه بسیار بالا

حاصل می‌گردد. رطوبت هوا، حلال‌ها، بازها و اسیدهای ضعیف در دمای محیط تاثیری بر روی الیاف

کربن ندارد اما در دمای بالا مانند 350-450 امکان انجام اکسیداسیون می‌تواند مشکل‌آفرین باشد. در

شکل ۲-۲ نمونه‌ای از الیاف کربن نشان داده شده است.



شکل (۲-۲) الیاف کربن تولید شده

## • الیاف آرامید

پلیمرهای آرامیدی با خصوصیتی چون نقطه ذوب بالا، پایداری حرارتی عالی، مقاومت در برابر شعله، غیرقابل حل بودن در بسیاری از حلال‌های آلی شناخته شده‌اند انواع آن‌ها دارای وزن مخصوصی بین ۱۲ تا  $14/6 \text{ KN/m}^3$  می‌باشد. به دلایل تکنولوژیک و اقتصادی تاکنون تعداد کمی از الیاف آرامیدی به تولید تجاری رسیده‌اند. از بعد تکنیکی، مهم‌ترین عامل میزان خواص لیف است که به وسیله پارامترهایی چون نوع پلیمر مصرفی، جرم مولکولی پلیمر، روش تولید لیف و ... کنترل می‌شود.

### خواص الیاف آرامید:

نسبت استحکام و مدول به وزن بسیار عالی، مقاومت در برابر ضربه، مقاومت بسیار عالی در مقابل شکست ناشی از خزش، مقاومت خستگی خوب، عدم حساسیت به شکاف یا ترک، مقاومت بالا در مقابل حلال‌ها آلی، مواد سوختی و نرم‌کننده‌ها، مقاومت خوب در مقابل اسیدها و بازها، خواص خوب جهت اتلاف انرژی ارتعاشی.

الیاف آرامید در شرایط پختی چسب‌ها تا دمای حدود ۱۸۰ تحت تاثیر قرار نمی‌گیرند اما به طور کامل در دمای بالای ۴۰۰ اکسیده می‌شوند. الیاف آرامید اگرچه رفتاری الاستیک را در کشش از خود نشان می‌دهند، اما تحت بار فشاری رفتاری غیرخطی دارند.

از نقطه نظر مقاومت شیمیایی، بیشتر حلال‌های آلی تاثیر کمی بر الیاف آرامید دارند و بیشتر محلول‌های آبی نمک‌ها بر آن تاثیر ندارند. اما اسیدهای قوی و بازها در دمای بالا و یا در غلظت‌های زیاد بر آرامید اثر می‌گذارند.

الیاف آرامید رنگ زرد مات داشته و مشابه دیگر الیاف مورد استفاده در مواد مرکب در اشکال مختلف مانند الیاف نتابیده، پارچه، الیاف کوتاه و ... تولید شده و به بازار عرضه می‌شود و به وسایل برش خاصی

نیاز دارد. الیاف FRP دارای مقاومت کششی بسیار بالایی بوده و رفتار تنش-کرنش این الیاف به صورت خطی می‌باشد که تا لحظه گسیختگی رفتار خطی داشته که این نوع رفتار دو عیب عمده در بر دارد:

- اعضای تقویت شده با الیاف شکل‌پذیری کمی دارند اما در صورتیکه برای محصورشدگی عضو به کار روند (مثل ستون) مقاومت و شکل‌پذیری را افزایش می‌دهند.
- توزیع تنش به علت کمبود شکل‌پذیری محدود است.

در شکل ۲-۳ انواع الیاف آرامید نشان داده شده است.

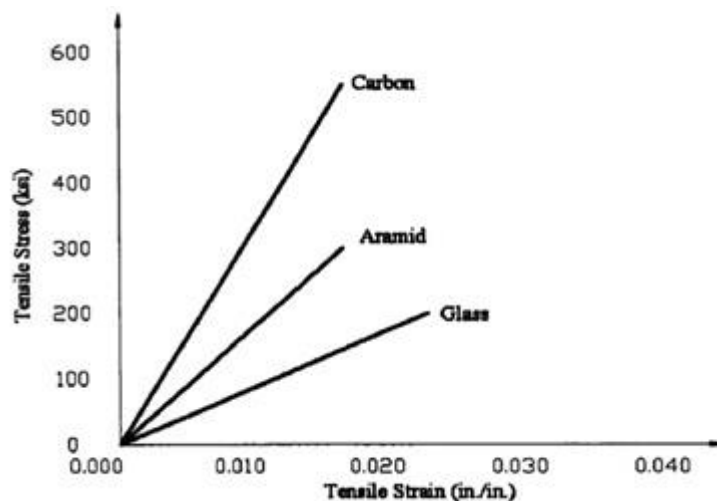


شکل (۲-۳) الیاف آرامید تولید شده

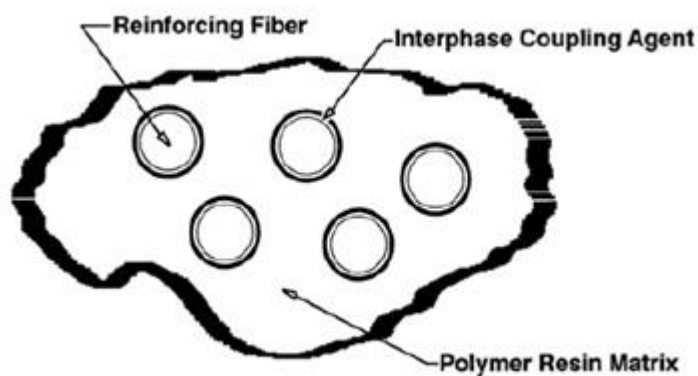
به طور کلی عملکرد یک کامپوزیت بستگی به نسبت مواد سازنده آن، ظرفیت باربری فیبر یا الیاف تقویتی، نحوه قرارگیری آنها و رفتار توام مواد سازنده با یکدیگر دارد و عملکرد تقویتی تحت تاثیر،

۱- جهت قرارگیری الیاف ۲- طول فیبر ۳- شکل آن ۴- ترکیب آن با ماتریس و چسبندگی بین آن دو ۵- جنس الیاف است. در شکل ۲-۴ نمودار تنش- کرنش انواع الیاف پلیمری نشان داده شده است.

در شکل ۲-۵ ساختار میکروسکوپی کامپوزیت‌های FRP نشان داده شده است.



شکل (۲-۴) نمودار تنش- کرنش انواع مختلف الیاف پلیمری [4]



شکل (۲-۵) ساختار میکروسکوپی مواد مرکب الیافی



### • ماتریس مورد استفاده در مواد مرکب

ماتریس‌های مورد استفاده در مواد مرکب به سه گروه کلی: فلزی، سرامیکی و پلیمری تقسیم می‌شوند که با توجه به پارامترهایی مانند فرآیندپذیری ساده، وزن کم، قیمت و خواص فیزیکی و شیمیایی ویژه موارد استفاده گوناگون دارند. مواد مرکب با ماتریس پلیمری، از جایگاه ویژه‌ای در صنایع مختلف و از جمله در صنعت ساختمان برخوردار شده‌اند [4].

الیاف پلیمری تقویت کننده، جزء اصلی ساختار یک ماده مرکب هستند. اما دانستن نقش و اهمیت ماتریس پلیمری بسیار ضروری است.

نقش ماتریس پلیمری عبارتند از:

انتقال برش از فیبر تقویتی به ماده مجاور، جلوگیری از خسارات مکانیکی وارده، احاطه کردن و نگه داشتن ساختار الیاف، محافظت الیاف از آسیب‌های محیطی، تاثیر مهم در برش‌های درون لایه ای و هم برش‌های در صفحه ماده مرکب، نگهدارنده جانبی در مقابل خم‌شدگی الیاف در مقابل بار فشاری. چسب نقش اساسی در بعضی از خواص ماده مرکب نظیر مقاومت و مدول عرضی دارد. اما نقش کمی در تحمل بارهای کششی ایفا می‌کند. چسب تاثیر مهمی بر مقاومت برشی بین لایه‌ای و مقاومت برشی صفحه‌ای ماده مرکب دارد. مقاومت برشی بین لایه‌ای یک عامل مهم در طراحی سازه‌هایی است که تحت بار خمشی قرار می‌گیرند در حالیکه مقاومت برشی صفحه‌ای هنگام اعمال بارهای پیچشی اهمیت پیدا می‌کنند. هنگام اعمال بارهای فشاری، ماتریس از کمانش احتمالی الیاف نیز ممانعت می‌نماید لذا تا حدودی در مقاومت فشاری ماده مرکب نقش دارد. فرآیندپذیری در یک ماده مرکب بستگی زیادی به خصوصیات فیزیکی ماتریس مانند ویسکوزیته، نقطه ذوب و دمای پخت آن دارد. خواص مکانیکی مواد مرکب به دو عامل حرارت سرعت اعمال بار بستگی دارد. مدول ارتجاعی مواد مرکب در دماهای بالاتر از دمای نرم شدن پلیمر کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا کرده و بیش از ۸۰

درصد کاهش می‌یابد. در صورتیکه اثر سرعت اعمال بار، برعکس اثر دما باشد یعنی با افزایش سرعت اعمال بار، پلیمر حالتی شکل‌پذیر از خود نشان می‌دهد.

ماتریس‌های پلیمری مورد استفاده در صنعت به دو دسته پلیمرهای گرما نرم و گرما سخت، تقسیم می‌شوند. مهمترین پلیمرهای گرما سخت عبارتند از: چسب‌های پلی‌استر، چسب‌های ونیل استر، چسب‌های اپوکسی، چسب‌های فنولیک و چسب‌های اپوکسی نووالاک، چسب‌های پلی‌آمین و ... که پر مصرف‌ترین آن‌ها پلی‌استر و اپوکسی می‌باشد. مهم‌ترین پلیمرهای گرما نرم عبارتند از: پلی‌پروپیلن، پلی‌اتیلن، نایلون‌ها و ... پرکننده‌ها را می‌توان برای کاهش قیمت، کنترل جمع‌شدگی، بهبود خواص مکانیکی و افزایش مقاومت در برابر آتش‌سوزی به ترموستات‌ها و ترموپلاستیک‌ها اضافه نمود. در کاربردهای ساختمانی پرکننده‌ها طوری انتخاب می‌شوند که انتقال تنش را بهبود دهند. معمولاً از خاک رس، کربنات کلسیم و الیاف شیشه خرد شده به عنوان فیلتر براساس نیاز موجود استفاده می‌شود.

### • چسب‌های پلی‌استر

پلی‌استر غیراشباع متداول‌ترین چسب پلیمری است که برای تولید قطعات مرکب ساختمانی استفاده می‌شود. این رزین تا هنگام پخت، ویسکوزیته پائینی دارد و حتی تا هنگامی که به آن‌ها الیاف اضافه می‌شود می‌تواند در شرایط حرارتی و فشاری مخصوصی نیز استفاده شود. چسب پلی‌استر غیراشباع در یک حلال فعال مانند استایرن حل می‌شود تا ویسکوزیته آن کاهش یابد و کار با آن ساده‌تر شود.

چسب‌های پلی‌استر به دو دسته کلی چسب‌های ایزومتريک و اورتو براساس نوع اسید فنالیک مورد استفاده طبقه‌بندی می‌شوند. اگر اسید فنالیک مورد استفاده از نوع اورتو باشد، به چسب حاصل اورتو و در صورت استفاده از اسید فنالیک نوع ایزو به چسب حاصل ایزو گویند. ۸۰ تا ۸۵ درصد چسب پلی‌استر مصرفی در صنعت کامپوزیت از انواع اورتو می‌باشد و میزان مصرف چسب‌های ایزو ۱۵ تا ۲۰ درصد است. باید توجه داشت که چسب‌های پلی‌استر مایعاتی غیر پایدارند. حتی در دمای محیط پس

از نگهداری آنها به مدت چندین ماه یا چندین سال از حالت مایع خارج و به صورت ژل در می آیند. اغلب چسب‌های پلی استر را در محیط تاریک و در دمای ۲۰ می توان به مدت حداقل ۶ ماه و در بعضی موارد بیش از یک سال نگهداری کرد.

### • چسب‌های اپوکسی

چسب‌های اپوکسی خواص بسیار خوبی داشته و به همین جهت کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف دارند. مهمترین خواص عبارتند از:

- خواص مکانیکی خوب مانند سختی و مقاومت سایشی بالا که بیشتر به خاطر حضور ساختارهایی چون بیسفنل A در این چسب‌هاست.
- خاصیت الکتریکی بالا
- مقاومت حرارتی نسبتاً بالا
- چسبندگی عالی به بسیاری از مواد مانند فلزات، چوب، بتن، شیشه، سرامیک و بسیاری از پلاستیک‌ها. این ویژگی ناشی از وجود گروه‌های اپوکسی و هیدروکسیل در زنجیره است.
- مقاومت شیمیایی عالی به ویژه در محیط‌های قلیایی
- جمع‌شدگی کم پس از واکنش‌های پخت

این خاصیت امکان ساخت قطعاتی با ابعاد دقیق را فراهم نموده و تنش‌های باقیمانده در آنها را کم خواهد کرد. چسب‌های اپوکسی در طرح‌های پیشرفته مانند هواپیماسازی، کاربردهای فضایی و دفاعی و همچنین بسیاری از بتن‌های تقویت شده با کامپوزیت استفاده می‌شوند. چسب‌های اپوکسی با ویسکوزیته متنوع تولید می‌شوند و مواد پخت یا سخت‌کننده گوناگونی برای آنها وجود دارد.

چسب‌های اپوکسی بسیار گران‌تر از پلی‌استرهای تجاری و وینیل استرها هستند. در استفاده و تقویت‌های اولیه سازه‌های بتنی بیشتر از این چسب‌ها استفاده می‌شود ولی در مرحله دوم تقویت این

سازه‌ها بیشتر از پلی استرهایی استفاده می‌شود که ازدیاد طول کششی بیشتری دارند و در ضمن مقاومت قلیایی بیشتری نیز از خود نشان می‌دهند.

### مزایا و معایب چسب‌های اپوکسی نسبت به چسب‌های پلی‌استر:

مزایا: دارای محدوده‌ای از خواص فیزیکی و مکانیکی است که به وسیله اضافه کردن مواد مختلف ایجاد می‌شوند، مونومرهای فرار در فرآیند پخت وجود ندارند (استایرن به دلیل سمی بودن وجود ندارد)، در هنگام پخت انقباض کمی دارند، در برابر مواد شیمیایی و حلال‌ها مقاومت بسیار خوبی دارند، به الیاف و ماده پایه چسبندگی خوبی دارند.

معایب: نسبت به پلی‌استرها و وینیل‌استرها گران‌ترند، برای اینکه به مقاومت مطلوبی برسند باید به دقت پخت شوند، زمان پخت آن‌ها ممکن است طولانی باشد، در هنگام حمل و نقل پخت‌کننده‌ها بایستی دقت کافی به عمل آید، استفاده از اپوکسی‌ها ممکن است با حساسیت پوستی همراه باشد.

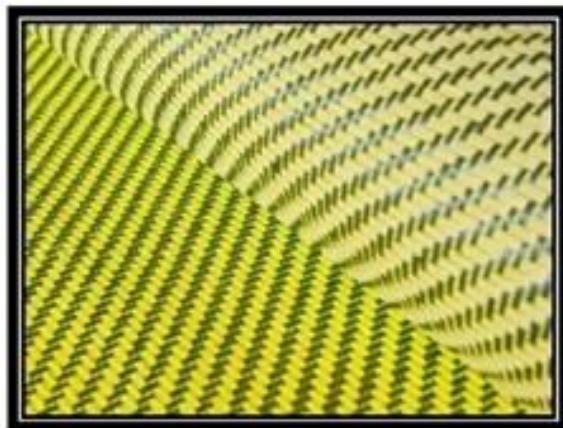
## ۲-۳- انواع محصولات FRP

### • ورق‌های FRP

ورق‌های FRP، ورق‌های با ضخامت چند میلی‌متر از جنس FRP هستند. این ورق‌ها با چسب‌های مستحکم و مناسب به سطح بتن چسبانده می‌شوند. از ورق‌های FRP جهت تعمیر و تقویت سازه‌های آسیب دیده (ناشی از زلزله و یا ناشی از خوردگی آب‌های یون‌دار) استفاده می‌شود. ورق‌های FRP از لحاظ شکل‌پذیری می‌توانند به شکل پارچه‌ای و صفحه‌ای باشند.

شکل پارچه‌ای خاصیت شکل‌پذیری بالایی دارد و راستای الیاف می‌تواند در یک جهت یا دو جهته باشد.

صفحه‌ها بر خلاف الیاف پارچه‌ای، شکل پذیر نیستند و در ضخامت و عرض‌های مختلف یافت می‌شوند. شکل ۶-۲ نمونه‌ای از ورق FRP دو جهته را نشان می‌دهد.



شکل (۶-۲) نمونه‌ای از ورق FRP دو جهته

### • کابل، نوار و میله‌های پیش‌تنیدگی

محصولاتی شبیه میله‌های FRP، ولی به صورت انعطاف‌پذیر هستند، که در سازه‌های کابلی و بتن پیش‌تنیده در محیط‌های دریایی و خورنده کاربرد دارند. این محصولات در اجزاء پیش‌تنیده در مجاورت آب نیز به کار گرفته می‌شوند.

### • میله‌های FRP

فولادها به طور مختصر در مقابل خوردگی به وسیله مواد قلیایی بتن محافظت می‌شوند و معمولاً سبب دوام خدمت‌پذیری سازه می‌گردند. برای خیلی از سازه‌هایی که در محیط‌های مهاجم از قبیل سازه‌های دریایی، پل‌ها، پارکینگ که در معرض نمک‌های یخ‌زدا قرار می‌گیرند، ترکیب رطوبت، افزایش دما و محیط کلریدی، قلیایی بتن را کاهش می‌دهد و سبب خوردگی فولادها می‌شود که در

نهایت موجب تخریب سازه بتنی می‌شود. به همین خاطر امروزه از میلگردهای ساخته شده با مواد پلیمری FRP در این سازه‌ها استفاده می‌کنند.

به دلیل اینکه میلگردهای FRP دارای یک رفتار غیر شکل‌پذیر می‌باشند لذا موارد استفاده از این میلگردها محدود به سازه‌هایی می‌شود که مهمترین مشکل آن‌ها خوردگی یا مشکلات الکترومغناطیس می‌باشد. رفتار مکانیکی میلگردهای FRP دارای تغییراتی نسبت به میلگردهای فولادی می‌باشد. میلگردهای فولادی دارای رفتار تقریباً همسان‌گرد می‌باشند ولی میلگردهای FRP دارای رفتار ناهمسان‌گرد هستند. این رفتار ناهمسان‌گرد در مقاومت برشی و رفتار چسبندگی میلگرد FRP به بتن تاثیر می‌گذارد. مصالح FRP بر خلاف مصالح فولادی، رفتار ارتجاعی خطی از خود نشان می‌دهند. شکل ۲-۷ نمونه‌ای از میلگردهای FRP را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۷) نمونه‌ای از میلگردهای FRP

## • پروفیل‌های ساختمانی

مصالح FRP همچنین در اشکال پروفیل‌های ساختمانی به صورت I شکل، T شکل، نبشی و ناودانی تولید می‌شوند. چنین محصولاتی می‌توانند جایگزین بسیار مناسبی برای قطعات و سازه‌های فولادی در مجاورت آب تلقی شوند.

### عوامل اصلی موثر در خواص فیزیکی FRP عبارتند از:

- آرایش الیاف
- درصد ترکیب الیاف
- جنس الیاف
- خواص مکانیکی الیاف و ماتریس پلیمری
- طول الیاف
- شکل الیاف
- چسبندگی و پیوند الیاف و ماتریس

### ۴-۲- مزیت‌های استفاده از FRP در تقویت سازه‌های بتنی

همان‌گونه که ذکر شد روش‌های گوناگونی جهت تقویت سازه‌ها وجود دارد که هر کدام از آن‌ها دارای معایب و مزایایی می‌باشند، در زیر چند مورد از مزایای استفاده از مواد FRP در مقایسه با سایر روش‌ها آورده شده است.

#### • وزن کم

یکی از محاسن FRP در مقایسه با دیگر مواد و مصالح، وزن کم آن می‌باشد. این مواد دارای وزن ناچیزی می‌باشند به طوری که یک متر مربع از مصالح FRP (الیاف+چسب) کمتر از ۵۰۰ گرم وزن دارد که اگر بخواهیم آن را با یک متر مربع فولاد که دارای وزن ۷۵ کیلوگرم است، جهت ساخت ژاکت فولادی مقایسه کنیم، وزن الیاف FRP بسیار ناچیز است.

## • انعطاف‌پذیری بالا

ورق‌های FRP همانند پارچه دارای انعطاف‌پذیری بالایی می‌باشند. این خاصیت در تقویت لبه‌ها و گوشه‌ها و اتصالات بسیار کارآمد است. به طوری که از این مواد می‌توان به صورت U شکل و یا به صورت دورپیچ دور مقاطع مربع، مستطیل یا دایره‌ای و یا هر شکل دیگر استفاده کرد.

## • راحتی در جابجایی و نصب

به علت وزن کم و انعطاف‌پذیری بالای این الیاف، حمل و نقل و جابجایی آن‌ها جهت نصب و استفاده در سازه‌ها بسیار آسان می‌باشد. حمل و نقل این الیاف نیازی به ماشین‌آلاتی مانند جرثقیل و ... ندارد و مقدار زیادی از آن توسط کارگران قابل حمل می‌باشد.

## • سرعت عمل انجام کار

همانطور که می‌دانیم یکی از نکات مهم در اجرای سازه زمان می‌باشد. جهت کاربرد مصالح FRP نیاز به زمان زیادی نداریم. به طوری که بیشتر زمان در کاربرد این مواد صرف آماده‌سازی سطح برای انجام عملیات می‌شود، که در صورت آماده بودن سطح، عمل چسباندن یک متر مربع، زمانی کمتر از ۱۰ دقیقه را به خود اختصاص می‌دهد.



## ۲-۵- الگوی ترک خوردگی و مکانیزم گسیختگی در اتصالات دال - ستون

برش پانچ مد گسیختگی بسیار پیچیده‌ای است و برای دهه‌ها موضوع بسیاری از بحث‌ها و تلاش برای بیانات بوده است، مسایل مهمی از این توسعه در حال حاضر محرز شده است. مشاهده می‌شود که ترک پانچ با به هم پیوستن ترک‌های ریز در وجه فوقانی دال آغاز می‌گردد. این پدیده به صورت آزمایشگاهی توسط آزمایش‌های ریگان (۱۹۸۳)، که گزارش داد ترک‌های ریز قبل از وقوع گسیختگی از میان ضخامت دال شکل می‌گیرند و موی (۱۹۶۱)، که شکل‌گیری ترک‌های مورب از میان ضخامت دال قبل از وقوع گسیختگی را مشاهده کرد، تأیید شده است. با افزایش تغییر مکان قائم، این ترک‌های مورب به سمت گوشه‌های تقاطع دال-ستون گسترش می‌یابند. در همین زمان ترک‌های ریز مورب دیگر نیز به هم نزدیک می‌شوند. در زمان گسیختگی، ترک مورب به گوشه تقاطع دال-ستون رسیده است [5].

به طور کلی با اعمال بار افزایشی به یک اتصال دال-ستون در سیستم دال تخت، تعدادی از سلسله وقایع مشاهده شده را می‌توان به شرح ذیل خلاصه کرد.

۱- شکل‌گیری ترک تقریباً مستدیر حول پیرامون ستون در سطح کششی دال و گسترش آن به سوی ناحیه بتن فشاری.

۲- شکل‌گیری ترک‌های جدید جانبی و خمشی قطری.

۳- آغاز ترک‌های مورب برشی نزدیک بهمیانه عمق دال، که در حدود نصف تا دو سوم (۵۰ تا ۷۰ درصد) بار نهایی مشاهده می‌شود.

۴- با افزایش بار، ترک‌های مورب به سوی نواحی فشاری و کششی گسترش می‌یابند.

۵- در زمان گسیختگی ترک پانچ به گوشه تقاطع دال - ستون می‌رسد.

در مرحله نهایی، ناحیه فشاری واقع در بالای ترک‌های نزدیک وجه ستون و نیز عملکرد میخ پرچی در آرماتورهای کششی از انتشار این ترک‌ها ممانعت می‌کنند. در این مرحله آرماتورهای کششی دال

نزدیک به ستون تسلیم می‌شوند. به ویژه اگر درصد آرماتور واقعی مورد استفاده قرار گرفته باشد. سرانجام گسیختگی برش پانچ در ناحیه فشاری و قبل از گسترش تسلیم شدگی به نواحی دورتر از مجاورت ستون به وقوع می‌پیوندد. در بسیاری از دال‌های آزمایش شده تاکنون، این گسیختگی در ناحیه فشاری از طریق ایجاد شکاف در راستای مورب و بدون هیچ‌گونه علامتی از خردشدگی در بتن به وقوع پیوسته است. بنابراین برش پانچ شکلی از برش، بدون گسیختگی برشی - فشاری می‌باشد [1]. با توجه به بررسی مکانیزم گسیختگی پانچ، با ایجاد ترک‌های مورب برشی، بار اعمالی توسط مولفه‌های قائم ناحیه فشاری بالای ترک، مولفه‌های قائم تنش‌های کششی در پیرامون ترک، نیروی قفل و بست بین دانه‌ای و عملکرد میخ پرچی آرماتورهای خمشی تحمل می‌شود. در صورتی که با توجه به آزمایش‌های انجام گرفته، مقاومت پیشنهادی برای عملکرد میخ پرچی در دال‌های دوطرفه در حدود ۲۵ تا ۳۵ درصد گزارش شده است [6].

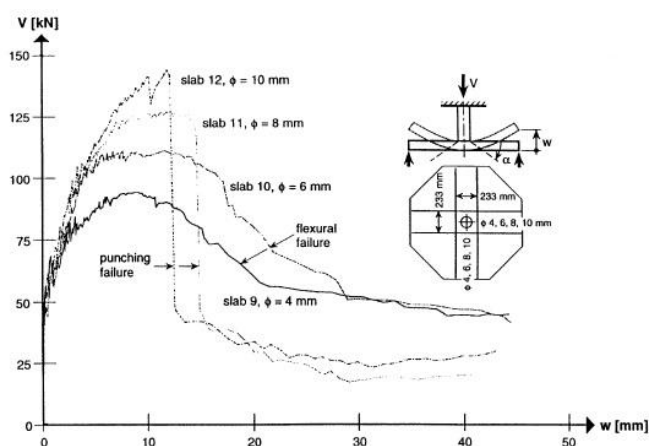
بنابراین مقاومت پانچ تحت تاثیر پارامترهای بسیاری از جمله مشخصات مصالح و پارامترهای هندسی قرار می‌گیرد. پرواضح است که مقاومت پانچ توسط اندازه مقطع عرضی ستون‌ها، عمق دال و مقاومت بتن، همان‌گونه که توسط آیین‌نامه‌های طراحی پیشنهاد شده است، کنترل می‌شود. تاثیر درصد آرماتور خمشی،  $\rho$ ، به صورت ضربی که مقاومت کششی بتن را افزایش می‌دهد در نظر گرفته می‌شود [5].

## ۲-۶- تفاوت بین گسیختگی خمشی و برش پانچ

در این بخش تفاوت بین گسیختگی خمشی و برش پانچ مورد بررسی قرار می‌گیرد. نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط منتری روی دال‌های هشت ضلعی مشابه (به ضخامت ۱۲۰ و شعاع تکیه‌گاه ۵۵۰ میلی‌متر) که تنها در آرماتورهای خمشی متفاوت بودند، این تفاوت را نشان داد. به علاوه تاثیر زاویه تمایل ترک پانچ نیز مورد بررسی قرار گرفت.

این آزمایش‌ها توسط کنترل تغییرمکان قائم ستون (با شعاع ۲۰۰ میلی‌متر) انجام شد. برای این که پاسخ بعد از بار اوج (شاخه نزولی) ثبت گردد، ابتدا چهار دال مشابه با مقادیر متفاوت میلگرد در مقطع عرضی (۴-۱۰ mm) تحت آزمایش قرار گرفتند. دو دال در مد خمشی گسیخته شدند (دال‌های ۹ و ۱۰) با آرماتورهای ۶ mm و ۴ mm (که توسط مکانیزم خطوط تسلیم مشخص می‌شدند). دو دال نیز در مد برش پانچ مشخص شدند (دال‌های ۱۱ و ۱۲ با آرماتورهای ۱۰ mm و ۸ mm) که توسط مخروط برش پانچ مشخص می‌شدند.

با توجه به شکل مذکور ابتدا مشاهده می‌شود که بار گسیختگی با افزایش مقطع عرضی آرماتورها افزایش می‌یابد. سپس با توجه به منحنی‌های بار-تغییرمکان مشاهده می‌شود که پس از رسیدن به بار حداکثر (بار اوج) گسیختگی خمشی (در دال‌های ۹ و ۱۰) با کاهشی ملایم در باربری و افزایش تغییرمکان مشخص می‌گردد. برخلاف این مورد گسیختگی پانچ کاهش ناگهانی در ظرفیت باربری پس از رسیدن به بار اوج را حاصل می‌دهد (شاخه قائم منحنی پاسخ در دال‌های ۱۱ و ۱۲). این نتایج به صراحت تفاوت بین دو مکانیسم گسیختگی و همچنین دلیل خطرناک بودن گسیختگی پانچ را نشان می‌دهد [6].



شکل (۲-۸) منحنی‌های پاسخ برای گسیختگی خمشی و برش پانچ [6]

هندسه سطح گسیختگی به ویژه هنگامی که سطح گسیختگی به اجبار به شکلی متفاوت از شکل گسیختگی پانچ خالص در می‌آید، نقش مهمی را بازی می‌کند. توسط منتری (۱۹۹۸) [6]، ثابت شد که با کنترل اندازه آرماتورهای حلقوی ترک پانچ در زوایای تمایل متفاوتی از جمله ۳۰، ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به صفحه میانی دال ایجاد می‌شود. نمایی از زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در مخروط برش پانچ در شکل (۹-۲) نمایش داده شده است [6].

منحنی‌های بار-تغییر مکان این چهار دال با زوایای تمایل مخروط برشی متفاوت، یک انتقال بین گسیختگی خمشی و برش پانچ که توسط زاویه تمایل ترک  $\alpha$  کنترل می‌شود را نشان می‌دهند. در یک بیان تحلیلی ارائه شده توسط منتری، بار گسیختگی با استفاده از عبارات بار برش پانچ،  $F_{pun}$  و بار خمشی،  $F_{flex}$ ، به شرح ذیل محاسبه می‌شود:

$$F_{fail} = F_{pun} + (F_{flex} - F_{pun}) \left\{ \sin \left[ \frac{\pi}{\pi - 2\alpha_0} (\alpha - \alpha_0) \right] \right\}^2 (1 - 2)$$

که در آن:

$\alpha_0$ : زاویه تمایل ترک پانچ در یک گسیختگی پانچ خالص است.



شکل (۹-۲) مخروط برش پانچ با زوایای تمایل ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه

مشاهده می‌شود که از طریق زاویه تمایل ترک پانچ،  $\alpha$ ، می‌توان بین ظرفیت خمشی و برش پانچ ارتباط برقرار نمود. با فرض زاویه تمایل برش پانچ برای گسیختگی پانچ خالص برابر با  $\alpha_0 = 30^\circ$ ، بار گسیختگی عمومی برای دال را می‌توان به شرح ذیل بیان نمود:

$$F_{fail} = F_{pun} + (F_{flex} - F_{pun}) \left\{ \sin \left( \frac{3}{2} \alpha - 45^\circ \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$- 2) \quad 30^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$$

شایان توجه است که برای ترک پانچ  $\alpha = 30^\circ$  داریم:  $F_{fail} = F_{pun}$  و برای  $\alpha = 90^\circ$  داریم:

$$F_{fail} = F_{flex}$$

## ۷-۲- پارامترهای موثر بر ظرفیت برش پانچ در دال‌های تخت

عوامل زیادی بر رفتار و ظرفیت باربری دال‌ها در پدیده برش پانچ موثر هستند. مهم‌ترین عاملی که در تعیین نوع شکست اتصال دال به ستون تاثیرگذار است، میزان آرماتور اتصال می‌باشد. درصد فولاد کم به شکست خمشی و درصد فولاد بیشتر به شکست برشی منجر می‌شود.

### • مقاومت فشاری بتن

تاثیر مقاومت فشاری بتن در تعیین ظرفیت باربری دال‌ها بسیار قابل توجه است. از آنجا که مقاومت کششی بتن نیز به نحوی به مقاومت فشاری آن وابسته است و در برش پانچ میزان باربری کششی بتن در صفحه ترک بسیار مهم است، عامل فوق اهمیت زیادی می‌یابد. همچنین با توجه به تئوری‌های بیان شده در بخش‌های قبلی، مقاومت فشاری بتن در تعیین مقاومت حوزه فشاری اتصال بسیار تعیین‌کننده است.

### • نسبت ابعاد بارگذاری به عمق دال

با فرض عمق ثابت در دال، با افزایش ابعاد بارگذاری، سطح موثر باربری بیشتر شده، لذا ظرفیت باربری اتصال افزایش می‌یابد. در آیین‌نامه‌های مختلف نیز عامل فوق مورد توجه خاصی قرار گرفته است.

### • نسبت ابعاد بارگذاری به یکدیگر

با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام گرفته در این زمینه، با ثابت نگاه داشتن محیط ستون یا بار وارده، هرچه نسبت ابعاد ستون به یکدیگر افزایش یابد، ظرفیت باربری دال کاهش خواهد یافت. زیرا در این صورت عملکرد دال از حالت دو طرفه کامل خارج شده و با افزایش هرچه بیشتر این نسبت، رفتار دال به سوی عملکرد یک طرفه سوق می‌یابد که منجر به برهم خوردن توزیع یکنواخت تنش و بروز تمرکز تنش در لبه‌های ناحیه بارگذاری شده و ظرفیت باربری دال کاهش می‌یابد.

### • سنگدانه‌های بتن

تأثیر مشخصات بتن بر ظرفیت باربری اتصال، تنها در مقاومت فشاری بتن خلاصه نمی‌شود. بلکه همان‌گونه که در بخش‌های قبلی نیز اشاره شد، سنگدانه‌ها به دلیل نقش مهمی که در پدیده قفل و بست بین دانه‌ای دارند، مستقیماً بر ظرفیت باربری اتصال تأثیرگذار بوده و در بسیاری از روابط پیشنهاد شده برای تعیین ظرفیت باربری دال‌ها، به طور مستقیم وارد می‌شوند.

### • فواصل بین آرماتورها و پوشش بتن

فواصل کم بین آرماتورها و پوشش کم در بتن، منجر به کاهش چسبندگی آرماتور به بتن شده و عملکرد میخ پرچی آرماتورها را شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این صورت قبل از حصول بار نهایی، آرماتورها از بتن بیرون کشیده شده و ظرفیت باربری دال به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد.

### • آرماتور وجه فشاری

آرماتور تحتانی به لحاظ واقع شدن در ناحیه‌ی فشاری نقش چندانی در ظرفیت باربری اتصال ندارد، ولی در افزایش شکل‌پذیری اتصال و نیز در رفتار پس از برش پانچ از طریق متصل نگاه داشتن دو قسمت جدا شده به یکدیگر، نقش بسیار مهمی ایفا می‌کند. در اینجا باید ذکر شود که آرماتور وجه

کششی دال نقشی در تعیین رفتار بعد از بروز شکست ندارد، زیرا در این لحظه فرض می‌شود که از بتن بیرون کشیده شده و دیگر قادر به اعمال عملکرد میخ پرچی نیست. به همین دلیل در اکثر آیین‌نامه‌های طراحی استفاده از حداقل دو آرماتور وجه فشاری دال تحت عنوان آرماتور پیوستگی اکیداً توصیه شده است.

## ۸-۲- روش‌های افزایش ظرفیت برش پانچ در دال‌های تخت

در هنگام طراحی، روش‌هایی برای افزایش ظرفیت باربری دال‌ها و یا جلوگیری از وقوع برش پانچ وجود دارد. ساده‌ترین روش، عدم استفاده از درصد آرماتور زیاد در اتصال است. در این صورت، احتمال وقوع پدیده برش پانچ کاهش یافته و مود شکست اتصال از شکست ترد برشی به شکست شکل‌پذیر خمشی تبدیل می‌شود. به غیر از این روش، روش‌های دیگری نیز برای جلوگیری از وقوع برش پانچ و یا افزایش ظرفیت باربری دال‌ها در هنگام طراحی وجود دارند که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد.

### • افزایش ضخامت دال

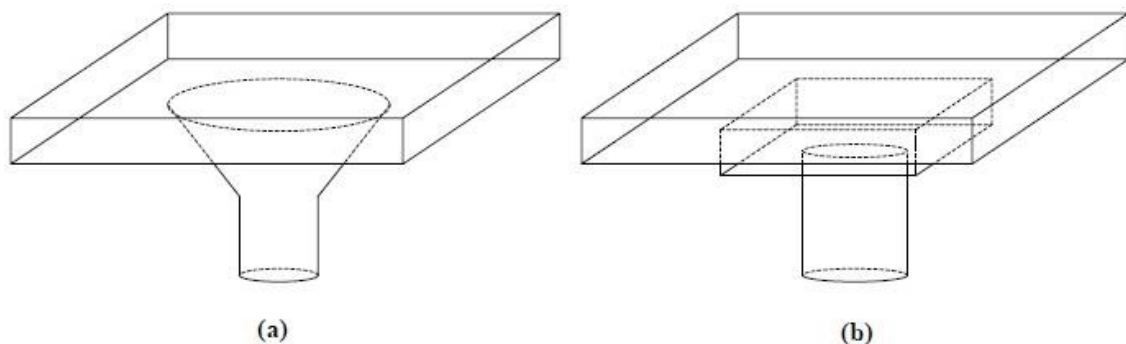
معمولاً در هنگام طراحی، مهم‌ترین عاملی که تعیین‌کننده ضخامت دال است، ظرفیت برش پانچ اتصال می‌باشد. برای مقابله با برش پانچ در هنگام طراحی، ساده‌ترین روش، افزایش ضخامت دال به منظور افزایش سطح مقاوم در برابر برش است. لیکن افزایش ضخامت، مشکلاتی نظیر افزایش بار مرده و کاهش فضای معماری را نیز در پی خواهد داشت.

### • استفاده از کتیبه

استفاده از کتیبه معادل با افزایش ضخامت دال است با این تفاوت که این افزایش در نقاط مستعد ترک برش پانچ نظیر اطراف ستون‌ها یا بارهای متمرکز صورت می‌گیرد و در سایر نقاط، افزایش ضخامت رخ نمی‌دهد. یک نمونه کتیبه در شکل (۲-۱۰) نمایش داده شده است. ابعاد کتیبه طوری انتخاب می‌شود که در اطراف آن، ضخامت دال در محیط بحرانی برش، جوابگوی برش پانچ باشد.

## • استفاده از سرستون

سرستون نیز عملکرد تقریباً مشابهی با پهنه دارد. سرستون افزایش بعد ستون در نزدیکی دال می‌باشد. افزایش ضخامت در ناحیه نزدیک ستون و دور کردن سطح مستعد ترک خوردگی از ستون و لذا افزایش سطح باربر برشی از مزایای استفاده از سرستون است. نمایی از استفاده از سرستون در شکل (۱۰-۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۰-۲) (a) سرستون، (b) کتیبه

## • استفاده از بتن با مقاومت بالا (HSC)

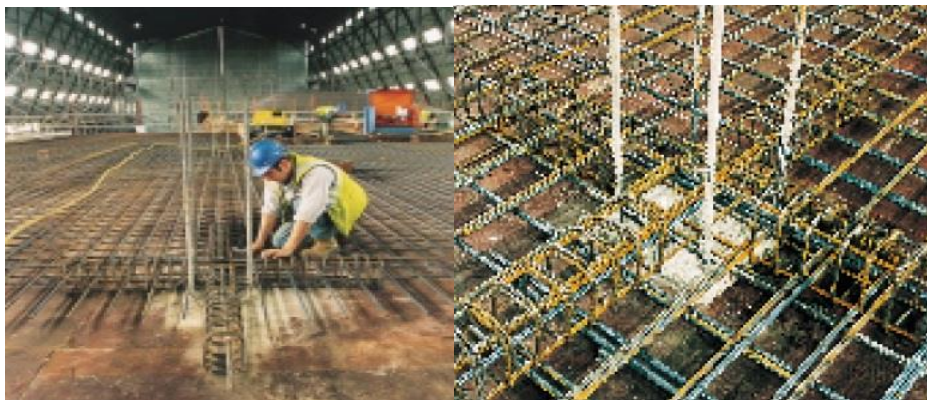
امروزه به دلیل افزایش نیاز به بتن با مقاومت بالا و بهبود بخشیدن خواص دراز مدت بتن، استفاده از بتن با مقاومت بالاتر از  $50 \text{ MPa}$  بسیار رواج یافته است. لیکن اعضای ساخته شده با بتن با مقاومت بالا در برخی موارد مکانیزم گسیختگی متفاوتی از خود نمایش می‌دهند. همچنین برون‌یابی نمونه‌ها و معادلات بین بتن معمولی و بتن با مقاومت بالا امکان دارد طراح را به سوی طراحی نامطمئن سوق دهد. یکی از دلایلی که مهندسين سازه نسبت به استفاده از بتن با مقاومت بالا راغب نیستند، به خاطر نقص در استاندارد ساختمان‌های بتنی و عدم اجرای صحیح می‌باشد. استفاده از بتن با مقاومت بالا، مقاومت برش پانچ اتصال را افزایش داده و اجازه می‌دهد تا نیروهای بیشتری از طریق اتصال دال به



ستون انتقال یابد. بیان‌های تجربی که در آیین‌نامه‌های طراحی ارائه شده است، بر مبنای نتایج آزمایش‌ها روی دال‌های ساخته شده با مقاومت بتن بین ۳۵ MPa تا ۱۵ می‌باشد.

#### • خاموت برشی ACI

خاموت‌های برشی ACI، آرایشی از قفسه آرماتورهای معمولی تیر (آرماتور مستقیم یا آرماتور رکابی) هستند که به اشکال X، T و L به ترتیب برای یک ستون داخلی، لبه و گوشه استفاده می‌شوند. قفسه آرماتور را می‌توان به صورت پیش‌ساخته در داخل یا خارج کارگاه تهیه نمود. زمان نصب مجموعه خاموت‌های تکمیل شده بسیار ناچیز است. یکی از مزایای خاموت‌های برشی این است که از میان ستون عبور می‌کنند. آزمایش‌ها نشان می‌دهند که مورد اخیر باعث افزایش شکل‌پذیری اتصال شده و مقاومت پس از گسیختگی آن را بهبود می‌بخشد [7].



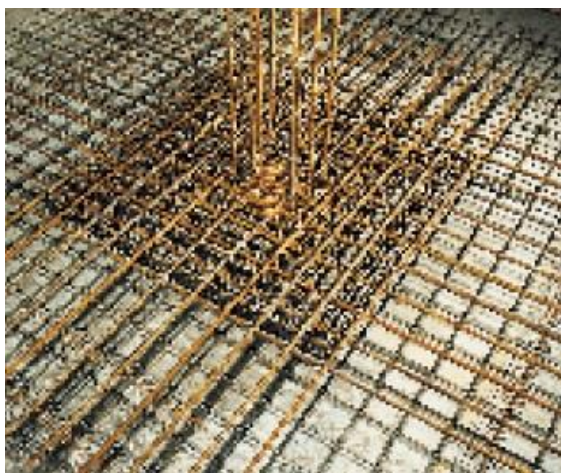
نحوه اجرای خاموت‌های برشی [8] ACI

شکل (۲-۱۱) خاموت‌های برشی ACI،  
آرایش یافته برای یک ستون میانی [7]

#### • حلقه‌های برشی

این سیستم شامل آرماتورهای رکابی U شکل سه‌بعدی می‌باشد. هر آرماتور دوخت به حلقه‌های بالا و پایین جوش می‌شود. حلقه‌ها در محیط پیرامون ستون آرایش می‌یابند. آنها تماماً به صورت پیش‌ساخته تهیه می‌شوند. فواصل محیط‌های برشی و سائز آرماتورهای رکابی را می‌توان مطابق با

تقاضای طراحی تنظیم کرد. جهت پیوستگی کامل آرماتورهای رکابی به حلقه‌های برشی، لازم است پوشش بتن روی آرماتورهای رکابی با آرماتورهای اصلی یکسان باشد. حلقه‌های برشی محیط بحرانی ستون را جهت مقابله با برش افزایش می‌دهند. کار با آن‌ها طاقت‌فرسا است. تنظیم و هماهنگ کردن آن‌ها با شبکه آرماتورهای اصلی دشوار بوده و امکان حرکت حلقه‌ها وجود دارد. حلقه‌های برشی ظرفیت باربری را افزایش می‌دهند اما گسیختگی آن‌ها به صورت برش پانچ، ترد، شکننده و غیرقابل اجتناب است.



شکل (۱۲-۲) نحوه قرارگیری حلقه‌های برشی در یک ستون میانی

#### • خاموت‌های گسترده

خاموت‌های گسترده را می‌توان به صورت یک نردبان برشی دوبعدی در نظر گرفت، که از شبکه آرماتورهای رکابی تشکیل یافته است. شبکه با استفاده از لقمه روی قالب‌بندی قرار می‌گیرد. سپس آرماتورهای تحتانی اصلی نصب می‌شود. حلقه‌ها به عنوان نگهدارنده آرماتورهای فوقانی عمل می‌کنند. اجرای این سیستم در مواردی که آرماتورهای ستون زیاد است مشکل می‌باشد.

### • آرماتورهای رکابی

معمولاً دو شکل آرماتور رکابی استاندارد جهت تقویت برشی دال‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. آرماتورهای رکابی با یک ساق، به صورت قلاب شده در بالا و خم ۹۰ درجه در پایین بوده و در محل دوخته می‌شود. اجرای آرماتورهای رکابی با دو ساق، دشوارتر است قبل از اجرای آرماتورهای فوقانی در محل نصب گردند.

### • خرپای برشی

این سیستم که به صورت خرپا می‌باشد، به راحتی در دال به کار گرفته می‌شود. در لحظه ترک خوردگی بتن، این تقویت کننده به خوبی فعال می‌شود و از شکست ترد برشی جلوگیری می‌نماید. این سیستم معمولاً به صورت نیمه پیش‌ساخته می‌باشد، به صورتی که نیمی از دال از قبل ساخته می‌شود و نیمی دیگر در محل بتن ریزی می‌گردد. از مزایای این سیستم سرعت و سهولت استفاده از آن می‌باشد.

### • گل میخ برشی

این سیستم شامل گل میخ‌های پیش‌ساخته فلزی با یک صفحه دایره‌ای شکل در هر دو انتها می‌باشد، که روی یک نوار فولادی که فواصل گل میخ‌ها را تنظیم می‌کند، قرار گرفته‌اند. میلگردها از نوع ساده یا آجدار بوده و به صورت قطری از مرکز ستون، معمولاً با زوایای کمتر از ۴۵ درجه، آرایش می‌یابند. سایز استادهای و فواصل بین آنها قابل تنظیم است. قطر استادهای معمولاً بین ۱۰ تا ۲۵ میلی‌متر و ارتفاع آنها ۱۲۰ میلی‌متر یا بیشتر است. برای آن‌که گل میخ‌ها تماماً موثر باشند، باید در راستای عمودی کاملاً مهار شوند، تا به تمام مقاومت تسلیم خود برسند و در محل‌های مستعد ترک خوردگی

قرار گیرند، تا خط ترک گل میخ‌های فولادی را قطع کند. تا حد امکان سعی شود قطر گل میخ‌هایکسان بوده و در تراز وجه ستون و در زوایای کمتر از ۴۵ درجه کار گذاشته شوند.



شکل (۲-۱۳) نحوه قرارگیری گل‌میخ برشی DEHA در یک ستون کناری [7]

گل میخ‌های برشی انواع مختلفی دارند. نوع اول، گل میخ DEHA است، که از پایین کار گذاشته شده و قبل از اجرای آرماتورهای اصلی در موقعیت ثابت می‌شود. اگرچه آن‌ها را می‌توان از بالا ثابت کرد. نوع دوم، گل‌میخ AncoPLUS است، که از بالا کار گذاشته می‌شود و بعد از اجرای آرماتورهای اصلی در موقعیت ثابت می‌شود. برخی دیگر شامل یک مجموعه میلگرد روی یک نوار گالوانیزه که توسط گیره‌هایی در محل محکم می‌شوند، مثل سیستم HDB-A. آزمایش‌های انجام شده برای مورد آخر مشخص کردند که در مراحل برش پانچ وقتی از گیره میلگردها استفاده می‌شود، بار جذب شده نمی‌تواند لغزش زیادی در میلگردها ایجاد کند. به همین دلیل افزایش بیشتری در ظرفیت باربری به وجود می‌آید. آزمایش‌های گسترده انجام شده روی گل میخ‌های برشی جوش شده روی نوار فولادی نشان می‌دهد گل میخ‌ها مقاومت و شکل‌پذیری اتصالات را افزایش می‌دهند.



شکل (۲-۱۴) گل‌میخ برشی AncoPLUS[7]

### • نوار برشی

نوار برشی از یک نوار فولادی با عرض ۲۵ میلی‌متر از فولاد با مقاومت کششی بالا و در اندازه‌های متفاوت، جهت حصول ظرفیت‌های برشی متفاوت، ساخته شده است. نوار می‌تواند به اشکال مختلف خم شود همچنین دارای سوراخ‌های پیش‌ساخته در طول خود می‌باشد که به پیوستگی و ثابت کردن آنها در موقعیت کمک می‌کند. بنابراین می‌تواند به سادگی پس از اجرای آرماتورهای اصلی نصب شوند. این سیستم به دلیل عرض کم نوار می‌تواند بالاتر از همه تقویت‌کننده‌ها و حتی بالاتر از لایه آرماتورهای فوقانی قرار گیرد و تاثیر ناچیزی روی پوشش بتن دارد. این سیستم موجب افزایش شکل‌پذیری در اتصالات و جلوگیری از شکست ترد برشی می‌گردد.

### • پلیمر مسلح به الیاف (FRP)

روش‌هایی که تاکنون معرفی گردیدند، برای افزایش ظرفیت باربری دال‌ها یا جلوگیری از وقوع برش پانچ در آنها در هنگام طراحی کاربرد داشتند. ولی مساله اساسی‌تر، ترمیم و مقاومسازی اتصالات دال - ستون موجود می‌باشد. یکی از مناسب‌ترین روش‌ها جهت افزایش ظرفیت باربری دال‌ها، که هم در هنگام طراحی و هم در ترمیم و مقاومسازی اتصالات موجود کاربرد دارد، استفاده از پلیمر مسلح به

الیاف (FRP) می‌باشد. اخیراً به بهبود و مقاوم‌سازی اعضای سازه‌ای با استفاده از مصالح مرکب مانند الیاف پلیمری کربن، شیشه، آرامید و ... توجه بسیاری شده است. کاهش هزینه‌های مصالح، صرفه‌جویی در نیروی انسانی به دلیل سبک بودن و نصب نسبتاً آسان آن‌ها، مقاومت کششی بالا و مقاومت در برابر خزش و وارفتگی، FRP را به عنوان جایگزینی مناسب برای تکنیک‌های بهسازی سنتی مطرح کرده است. نمونه‌های اجرا شده در سال‌های اخیر نشان دهنده عملکرد و دوام بسیار عالی سازه‌های مقاوم‌سازی شده با FRP می‌باشد. در فصل آتی روش‌های مختلف ترمیم و مقاوم‌سازی سازه‌ها با استفاده از این الیاف به صورت جامع ارائه خواهد شد.



## **فصل ۳:**

**مروری بر تاریخچه مطالعات**

**آزمایشگاهی انجام شده**



### ۳-۱ - مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از پلیمرهای مسلح به الیاف (FRP) در مقاوم‌سازی سازه‌های بتنی بسیار توسعه یافته و تحقیقات بسیاری در این زمینه صورت گرفته است. تقویت به منظورهای مختلفی از جمله تقویت خمشی، تقویت برشی، افزایش محصورشدگی، ترمیم آسیب‌های ناشی از خوردگی و مانند آن‌ها با استفاده از این الیاف صورت می‌گیرد. تاکنون روش‌های مختلفی جهت مقاوم‌سازی دال‌ها با استفاده از پلیمرهای مسلح به الیاف پیشنهاد شده است، که از آن جمله می‌توان به چسباندن صفحات پلیمری مرکب با الگوهای متفاوت به وجه کششی دال، عبور دادن نوارهای FRP از میان ضخامت دال به صورت خاموت برشی در آرایش‌های مختلف، دورپیچ کردن نوارهای FRP از میان ضخامت دال به صورت حلقه‌های برشی و خاموت‌های بسته و موارد دیگر اشاره کرد.

### ۳-۲ - مروری اجمالی بر مطالعات آزمایشگاهی انجام شده

در سال ۱۹۹۲، پان و موهل مطالعه‌ای آزمایشگاهی بر روی اتصالات دال‌ها انجام دادند [9]. توجه آن‌ها بر روی بارگذاری جانبی دال‌ها به منظور تعیین رفتار برشی دال تحت پدیده انتقال لنگر که از عوامل تشدید کننده پدیده برش پانچ می‌باشد، بود و تاثیر توام بارهای ثقلی و جانبی در دال مورد مطالعه قرار گرفت. آنها همچنین رفتار یک دال ترمیم شده را نیز بررسی کردند. پارامتر دیگری که توسط این محققین مورد بررسی قرار گرفت، تاثیر وجود آرماتور در وجه فشاری بود. در نمونه‌های آن‌ها تغییر مکان قائمی برابر ۷۵ میلی‌متر در مرکز دال در اثر برش پانچ ثبت شد. آنها نتیجه‌گیری کردند که وجود آرماتور فشاری نقش بسیار مهمی در رفتار پس از برش پانچ و جلوگیری از جداسازی کامل دو طرف ترک ناشی از برش پانچ از یکدیگر خواهد داشت.

در سال ۱۹۹۳، شعبان و گساند تاثیر استفاده از بتن الیافی را بر روی رفتار دال‌ها در معرض برش پانچ مورد مطالعه قرار دادند [10]. آنها ۱۳ نمونه با درصد‌های الیاف متفاوت از صفر تا ۳/۶ درصد را تعریف کردند. نمونه‌های آن‌ها طوری طراحی شده بود که شکست در حالت برش پانچ صورت گیرد. آن‌ها تغییری در زاویه شکست بتن اتصال در اثر استفاده از بتن الیافی مشاهده نکردند، ولی افزایشی در حدود ۳۰ درصد در ظرفیت برش پانچ را ثبت نمودند. همچنین روابطی با استفاده از روش‌های آماری مبتنی بر نتایج خود برای این‌گونه دال‌ها ارائه کردند.

ارکی و هفرنان در سال ۱۹۹۵، اولین کسانی بودند که بر روی مقاوم‌سازی دال‌ها با استفاده از الیاف FRP تحقیق کردند [11]. آن‌ها ۸ نمونه را مورد آزمایش قرار دادند که بر روی وجه کششی ۶ نمونه از آن‌ها ورقه‌های FRP چسبانده شده بود. بقیه آن‌ها به عنوان نمونه کنترلی نگه داشته شدند. برای بارگذاری از بار متمرکز استفاده شد، تا دال شرایط تجربه برش پانچ را پیدا کند. خرابی‌ها ابتدا از ترک‌های خمشی آغاز شد و با افزایش بار، ترک‌های برشی به وجود آمد و در نهایت ترک‌های برشی باعث شکست گردید. این محققین افزایش در میزان سختی خمشی و بار نهایی قابل تحمل توسط دال تا ۶۲ درصد و کاهش میزان ترک‌خوردگی را گزارش کردند.

تان در سال ۱۹۹۶، استفاده از ورقه‌های FRP برای مقاوم‌سازی دال‌ها را مورد مطالعه قرار داد [12]. وی ۱۲ نمونه دال با نسبت آرماتور ۱/۲۸ درصد در هر جهت و با ستون به ابعاد ۱۵۰ x ۱۵۰ میلی‌متر را مورد مطالعه قرار داد و با تقسیم بندی مناسبی توانست تاثیر نوع الیاف، تعداد لایه‌ها (۱، ۲ و ۳ لایه) و ابعاد و فاصله الیاف را مورد بررسی قرار دهد. نمونه‌ها دارای چهار تکیه‌گاه ساده در چهار طرف بودند و تحت تاثیر بار مرکزی قرار گرفتند. در هنگام شکست، کرنش به وجود آمده در الیاف، ۲۰ درصد کرنش نهایی آن‌ها بود و خرابی به دلیل جدا شدن ورق از دال اتفاق افتاد.

چن و لی در سال ۲۰۰۰، بر روی برش پانچ و نوع شکست دال‌های بتنی مقاوم‌سازی شده با الیاف شیشه‌ای مطالعه کردند [13]. آن‌ها ۱۸ نمونه مربعی شکل به ابعاد ۱۰۰۰ میلی‌متر و با ضخامت ۱۰۰

میلی متر و با ستونی به بعد ۱۵۵ میلی متر در وسط ساختند. چهار نمونه به عنوان نمونه کنترلی نگاه داشته شد و در سایر نمونه‌ها تاثیر درصد آرماتور (۰/۵۶ و ۱/۲۳ درصد)، تاثیر مقاومت بتن (۱۶/۹ و ۳۴/۳ MPa) و تعداد لایه‌های FRP (۱ و ۲ لایه) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که وجود FRP به طور مشخص، ظرفیت مقطع در برابر برش پانچ را افزایش می‌دهد.

در سال ۲۰۰۲، منتری تاثیر میزان آرماتور خمشی در تعیین رفتار اتصال دال را مورد بررسی قرار داد [6]. وی نمونه‌هایی با ابعاد مشابه ولی با میزان آرماتور متفاوت را مطالعه نمود. این نمونه‌ها دارای آرماتورهایی با قطر به ترتیب ۳، ۶، ۸ و ۱۵ میلی‌متر بودند. در دو نمونه اول، شکست خمشی بر اثر بروز تسلیم در آرماتورها و در دو نمونه دوم، شکست بر اثر برش پانچ مشاهده شد. نمودارهای بار-تغییر مکان برای این نمونه‌ها مقایسه شدند و تفاوت بارزی بر اثر استفاده از درصدهای فولاد مختلف در آن‌ها مشاهده شد. نمونه‌ها دارای ستونی دایروی در وسط بودند که تعدادی آرماتور حلقوی در اطراف محل اتصال آن‌ها به دال در صفحه‌ی دال قرار داده شده بود. وی رابطه‌ای برای پیش‌بینی بار قابل تحمل دال ارائه کرد که تلفیقی از بار متناظر با شکست خمشی و بار متناظر با شکست برشی است.

در سال ۲۰۰۳، هراجلی و سودکی تاثیر چسباندن ورق‌های FRP به سطح دال را مورد بررسی قرار دادند [3]. آن‌ها در این مطالعه آزمایشگاهی ۱۶ نمونه اتصال داخلی دال به ستون با ابعاد دال ۶۷۰ میلی‌متر و ستونی مربع شکل با بعد ۱۵۰ میلی‌متر در وسط را که برای تجربه برش پانچ طراحی شده بودند، مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها در این آزمایش، تاثیر پارامترهای مختلف از جمله درصد فولاد (۱ و ۱/۵ درصد)، ضخامت دال (۵۵ و ۷۵ میلی‌متر)، عرض لایه‌های FRP (۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر) و تعداد لایه‌های FRP (۱ و ۲ لایه) را بررسی کردند. ورقه‌های FRP به وجه کششی دال و به موازات آرماتورهای داخلی دال در دو جهت چسبانده شدند. نتایج آزمایش‌ها حاکی از افزایش سختی خمشی و مقاومت برشی اتصال دال به ستون است. بسته به ضخامت و میزان فولاد دال و

مساحت ورقه‌های FRP افزایشی بین ۲۶ تا ۳۷ درصد در مقاومت خمشی و ۱۷ تا ۳۵ درصد در مقاومت برشی مشاهده شد. آن‌ها جلوگیری از گسترش ترک‌ها توسط ورقه‌های FRP را دلیل افزایش در میزان مقاومت برش پانچ اتصال دال به ستون دانسته‌اند.

بینیسی و بایراک در سال ۲۰۰۳، روشی جدید برای افزایش ظرفیت برش پانچ اتصالات دال‌ها با استفاده از الیاف FRP ارائه کردند [2]. آن‌ها در وجه کششی دال شیارهایی ایجاد کردند و الیاف FRP را به صورت آرماتورهای برشی در آن قرار دادند. آن‌ها ۳ نمونه مقاوم‌سازی شده با الیاف و دو نمونه مقاوم‌سازی نشده را مورد آزمایش قرار دادند و رفتار آن را مطالعه کردند. نمونه‌ها، مربع شکل با ابعاد ۲۱۳۳ میلی‌متر و ضخامت ۱۵۲ میلی‌متر بود که یک صفحه‌ی فلزی مربع شکل به بعد ۳۰۳ میلی‌متر در وسط آن، بار را به دال وارد می‌کرد. در این آزمایش‌ها دور شدن صفحه‌ی مستعد ترک برش پانچ از ستون و همچنین افزایش بار قابل تحمل توسط دال تا ۵۱ درصد مشاهده شد.

در سال ۲۰۰۴، السالاکوی و همکاران بر روی استفاده از الیاف FRP جهت افزایش ظرفیت برش پانچ در اتصال دال به ستون تحقیق کردند [14]. آن‌ها ۷ نمونه را مورد بررسی قرار دادند که ۳ نمونه از آن‌ها دارای بازشو بود. آن‌ها درصد فولاد دال‌ها را ثابت در نظر گرفتند و دو تکنیک برای مقاوم‌سازی اتصال دال‌ها به کار بردند. در تکنیک اول، ورق‌های FRP در یک و دو لایه به وجه کششی دال و به موازات آرماتورهای داخلی چسبانده شدند. آن‌ها افزایشی در سختی اتصال بین ۶ تا ۳۰ درصد را مشاهده کردند. همچنین افزایشی تا ۲۳ درصد در بار متناظر با برش پانچ را ثبت کردند. در نمونه‌های دارای گل‌میخ، شکل‌پذیری به میزان چشم‌گیری افزایش یافت.

در سال ۲۰۱۱، پارک و چوی و چانگ مدل استحکام برشی برای برش پانچ مستقیم از اتصالات دال-ستون داخلی را مورد بررسی قرار دادند [15]. در اتصالات دال-ستون آسیب دیده توسط ترک خمشی، آن است که نیروی برش پانچ به طور عمده توسط منطقه فشرده‌سازی از بخش بحرانی مقاومت در نظر گرفته شده است. استحکام برشی در بخش بحرانی در تقاطع بین منحنی ظرفیت برشی و منحنی

تقاضا تعیین می‌شد. برای تأیید مدل استحکام پیشنهادی برای نمونه از آزمایش‌های موجود تست شده توسط محققان دیگر مورد استفاده قرار گرفت. در اتصال دال-ستون از یک صفحه تخت با نسبت طول به ضخامت، ترک‌های خمشی قبل از شکست برش پانچ رخ می‌دهد. استحکام برش پانچ اتصال دال-ستون توسط ظرفیت برشی کنترل شده توسط کشش تعیین می‌شود. از آنجایی که مقاومت فشاری بتن را افزایش دهیم، استحکام برشی اتصال را افزایش می‌دهد، به این دلیل که مقاومت کششی بتن افزایش می‌یابد.

در سال ۲۰۱۱، سودکی و سایید و وانزول تقویت اتصالات دال-ستون بتنی با استفاده از نوارهای CFRP را مورد بررسی قرار دادند [16]. در مجموع شش دال مربع شکل با یک ستون متحد‌المرکز با ابعاد کلی دال ۱۰۰ x ۱۲۲۰ x ۱۲۲۰ میلی‌متر و ابعاد ستون ۱۵۰ mm x ۱۵۰ xmm در نظر گرفته شد. متغیرهای این آزمایش شکل پیکربندی نوارهای CFRP و تعداد آن بود. نتایج این آزمایش این بود که دال تقویت شده با CFRP باعث شد که ظرفیت برش پانچ را بیشتر از ۲۹٪ و سختی را بیشتر از ۸۰٪ در مقایسه با نمونه تقویت نشده افزایش داد. بین حالت‌های قرارگیری صفحات CFRP، نمونه تقویت شده با صفحات مورب و دور از محیط ستون بهتر به نظر می‌رسید.

### ۳-۳- بررسی تفصیلی سه مطالعه آزمایشگاهی انجام شده

#### ۳-۳-۱ - مقاوم‌سازی دال‌های تخت بتن مسلح در برابر برش پانچ با استفاده از پلیمرهای مسلح به الیاف کربنی (بینیسی، بایراک، ۲۰۰۳) [2]

در این مطالعه روشی ابتکاری جهت مقاوم‌سازی دال‌های دو طرفه در برابر برش پانچ بررسی شده است. در این روش از نوارهای FRP چسبیده شده به بتن در جهت قائم با استفاده از اپوکسی به صورت آرماتور برشی در پیرامون ناحیه بار متمرکز استفاده شد. این تکنیک به سهولت در

ساختمان‌های با سیستم دال تخت به عنوان یک طرح مقاوم‌سازی قابل انجام است.

## برنامه آزمایشگاهی

### • مشخصات مصالح

جهت شبیه‌سازی مقاومت بتن در ساختمان‌های موجود که در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ با سیستم دال تخت بتن مسلح ساخته شده‌اند، طرح اختلاط مورد استفاده جهت حصول مقاومت فشاری  $27/5 \text{ MPa}$  طراحی شد. میانگین واقعی مقاومت فشاری حاصل از آزمایش‌های فشاری روی نمونه‌های استوانه‌ای در جدول (۱-۳) ارائه شده است. آرماتورهای فولادی از نوع میلگرد آجدار رده ۶۰ با مقاومت تسلیم میانگین حاصل شده از آزمایش کشش تک محوری برابر با  $448 \text{ MPa}$  بودند. جهت مصالح مقاوم‌سازی از الیاف معمولی کربن بافته شده تک محوری با الیاف عرضی از جنس آرامید استفاده شد. پلیمر مسلح به الیاف کربنی به دلیل مقاومت و سختی بالاترشان، که هنگام استفاده به عنوان آرماتور برشی در کنترل ترک‌های مورب (برشی) مهم است، از میان دیگر انواع مواد مرکب مانند پلیمر مسلح به الیاف شیشه‌ای انتخاب شدند. جهت اطمینان از اندرکنش کامل پلیمرهای مسلح به الیاف کربنی (CFRP) با بتن، از اپوکسی با مصالح ماتریسی دو مولفه‌ای استفاده شد. مشخصات مصالح پلیمر مسلح به الیاف کربنی و اپوکسی مورد استفاده در مقاوم‌سازی در جدول (۱-۳) خلاصه شده است.

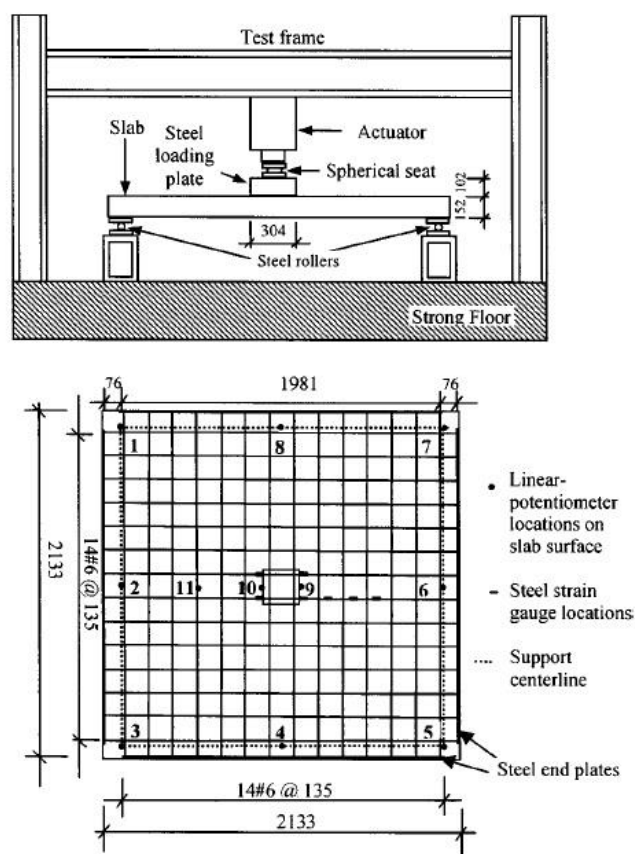
جدول (۱-۳)، مشخصات مصالح

Materials	Elastic modulus (MPa)	Compressive strength (MPa)	Yield stress (MPa)	Yield strain ( $\mu\text{strain}$ )	Ultimate tensile stress (MPa)	Ultimate tensile strain ( $\mu\text{strain}$ )
Concrete	—	28.3	—	—	—	—
Steel	204,000	—	448	2241	703	110,000
Carbon fiber reinforced polymer	72,400	—	—	—	876	12,100
Epoxy	3,180	—	—	—	72.4	50,000

## • نمونه‌ها و آزمایش

در مجموع شش نمونه جهت برنامه آزمایشگاهی، بتن‌ریزی و عمل‌آوری شدند. ابعاد دال ۱۵۲ x ۲۱۳۳ x ۲۱۳۳ میلی‌متر بوده و جزئیات آرماتورهای خمشی برای تمام نمونه‌ها یکسان در نظر گرفته شد، (شکل (۳-۱)). لبه‌های دال نمایانگر خطوط عطف در سیستم دال تخت واقعی بودند. آرماتورهای خمشی اصلی شامل ۱۴ عدد میلگرد M۲۰ (نمره ۶ آمریکایی) به فواصل ۱۳۵ میلی‌متر بودند و جهت حصول به عمق موثر میانگین،  $d$ ، برابر با ۱۱۴ میلی‌متر آرایش یافتند. مهار این میلگردها از طریق جوشکاری یک ورق فلزی انتهایی ضخیم به طول ۶/۴ میلی‌متر به میلگردها تامین شد.

تمامی دال‌ها دارای مقدار یکسان آرماتور کششی (۱/۷۶ درصد) بوده و فقط یکی از نمونه‌های کنترلی دارای دو آرماتور فشاری ممتد با مشخصات یکسان با آرماتورهای کششی بود. دو میلگرد فشاری مورد استفاده در نمونه فوق نسبت آرماتوری برابر با ۰/۸۲ درصد در زیر ناحیه صفحه بارگذاری، شبیه‌ساز اتصال دال - ستون، فراهم می‌آوردند. با توجه به، ACI 318-02 استفاده از حداقل دو میلگرد فشاری ممتد در هر جهت، که از هسته ستون نیز عبور نمایند، مورد نیاز است، تا به عنوان آرماتور پیوستگی عمل نماید. نمونه‌ها جهت حاصل آمدن مد گسیختگی برش پانچ خالص در نمونه‌های کنترلی و احتمال انتقال مد گسیختگی از برش پانچ به ترکیب خمش و برش پانچ در نمونه‌های تقویت شده، طراحی شدند.



شکل (۳-۱) برپایی آزمایش و جزئیات نمونه‌ها

یک صفحه‌ی فلزی بارگذاری مربعی با ابعاد  $304 \times 304 \times 102$  میلی‌متر که شبیه‌ساز ستون است، جهت اعمال بار متمرکز مورد استفاده قرار گرفت. اگرچه فقدان ستون بتنی یک شبیه‌سازی واقع‌گرایانه از ناحیه اتصال نمی‌باشد، اما در صورتی که گسیختگی پانچ در خارج از ناحیه اتصال رخ دهد و دال در زیر صفحه‌ی بارگذاری متحمل خرابی گسترده نشود، نتایج برنامه آزمایشگاهی تحت تاثیر فقدان ستون قرار نخواهد گرفت. دو نمونه مرجع بدون هیچ‌گونه مقاوم‌سازی آماده گردیدند و کنترل ۱ و کنترل ۲ نامگذاری شدند. نمونه کنترلی ۱ با استفاده از قوانین مربوط به ACI 318-63 آماده گردید، که شبیه‌ساز یک اتصال دال تخت بتن مسلح موجود و نیازمند به مقاوم‌سازی بود. نمونه کنترلی ۲ با استفاده از قوانین مربوط به ACI 318-02 برای فولاد پیوستگی طراحی شد، که اطلاعات با ارزشی را در ارتباط با رفتار اتصالات دال-ستون استاندارد بدون آرماتور برشی را فراهم می‌آورد.



قبل از انجام آزمایش، تمامی نمونه‌ها در راستای چهار ضلع خود روی صفحات فلزی که روی غلطک‌های فولادی ساکن بودند قرار گرفتند، گوشه‌های نمونه‌ها در برابر بالاکنش آزاد بودند. جهت انجام آزمایش روی نمونه‌ها یک قاب صلب مورد استفاده قرار گرفت. یک نشیمن کروی بین دستگاه محرک و صفحه‌ی فولادی تعبیه شد تا از اعمال ناهموار بارگذاری جلوگیری شود. (شکل (۳-۱)). اندازه‌گیری بارگذاری از طریق سلول‌های بارگذاری که به دستگاه محرک متصل بودند انجام می‌گرفت. نمونه‌ها در مد کنترل تغییرمکان با نرخ تغییرمکان میانگین  $0.05 \text{ mm/s}$  تحت آزمایش قرار گرفتند. جهت اندازه‌گیری خیز دال در هر گام افزایش جابجایی از جابجایی‌سنج‌های خطی استفاده شد. جهت ثبت کرنش‌ها، کرنش‌سنج‌های الکتریکی که به آرماتورهای فلزی و نوارهای CFRP قائم در راستای ضخامت دال متصل بودند مورد استفاده قرار گرفتند. کرنش‌های بتن نیز در نمونه کنترلی ۲ در وجه فشاری دال به فاصله ۴۰۰ میلی‌متر از صفحه بارگذاری در هر دو جهت مماسی و شعاعی اندازه‌گیری شد. جزئیات نمونه و موقعیت ابزارآلات در شکل (۳-۱) نمایش داده شده است.

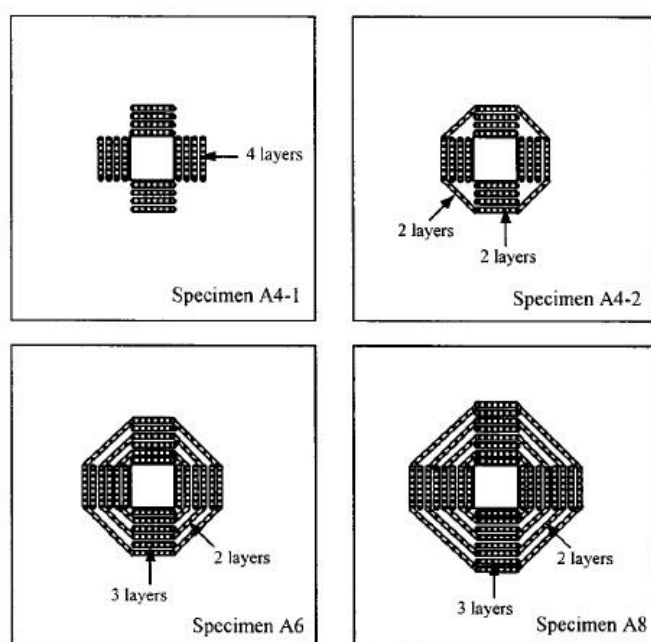
### • روش مقاوم‌سازی

در مجموع چهار نمونه با استفاده از CFRP مقاوم‌سازی شدند. ابتدا با استفاده از لوله‌های PVC با قطر ۱۸ میلی‌متر قبل از بتن‌ریزی، سوراخ‌های قائمی در پیرامون ناحیه بارگذاری تعبیه شد. گوشه‌های تیز اطراف سوراخ‌ها که ممکن بود باعث بروز گسیختگی زودرس نوارهای CFRP در گوشه‌ها شود، از طریق پخ زدن انتهای سوراخ‌ها برطرف شد. این کار عمل دریل کاری سوراخ‌ها و پاک‌سازی و هموارسازی سطح دال و سوراخ‌ها را در سیستم‌های دال تخت واقعی شبیه‌سازی می‌کند. در عمل، جهت اجتناب از سوراخ کاری در محل استقرار آرماتورهای خمشی، استفاده از دستگاه تعیین‌کننده محل آرماتور لازم می‌باشد. خرابی‌های اضافی پدید آمده در آرماتورهای خمشی، در صورت وجود، روش‌های مقاوم‌سازی اضافی دال در برابر خمش را که سابقاً توسط مسلم و همکاران (۲۰۰۰) بررسی

شد را طلب می‌کند، که از هدف این بررسی خارج است. اگرچه دریل کاری سوراخ‌ها با فواصل مناسب در ساختمان‌های موجود مشکل است، ولی هنوز نسبت به دیگر روش‌های جایگزین مانند افزایش ابعاد ستون با استفاده از جاکتینگ یا بتن‌ریزی کتیبه‌های خارجی کاربردی‌تر می‌باشد.

تعداد سوراخ‌ها روی خط امتداد یافته از وجه صفحه‌ی بارگذاری برابر با چهار سوراخ در دو تا از نمونه‌ها و در دو نمونه باقیمانده برابر با شش و هشت سوراخ بود، شکل (۳-۲). موقعیت سوراخ‌ها مشابه با قرارگیری خاموت‌ها و استادهای برشی در ساختارهای جدید که سابقاً موثر نشان داده شده بود سیبل (۱۹۸۰) انتخاب شد. نمونه‌ها مطابق با تعداد سوراخ‌های امتداد یافته از وجه صفحه‌ی فشاری نامگذاری شدند. شماره دومی که در ادامه شماره سوراخ آمده، جهت تشخیص بین نمونه‌های با تعداد سوراخ یکسان مورد استفاده قرار گرفته است. بنابراین نمونه‌ها تحت عنوان A4-1، A4-2، A6 و A8 نامگذاری شدند. سوراخ‌ها به گونه‌ای چیده شدند که اولین سوراخ در فاصله ۲۹ میلی‌متر ( $d/4$ ) از صفحه بارگذاری قرار داشت و فاصله بین سوراخ‌ها در هر دو جهت ۵۸ میلی‌متر ( $d/2$ ) بود.

پیش از عمل‌آوری بتن، نمونه‌ها جهت مقاوم‌سازی روی سکو قرار گرفتند. نوارهای CFRP به عرض ۲۵ میلی‌متر و به طول مناسب بریده شده و به شکلی مشابه با خاموت دورپیچ شدند. سپس نوارها از میان سوراخ‌ها عبور داده شده و به شکلی مشابه با خاموت دورپیچ شدند. نمونه‌های مقاوم‌سازی شده، الگوی دورپیچ کردن و تعداد لایه‌های مورد استفاده در سوراخ‌ها در شکل (۳-۲) نمایش داده شده است. در محیط‌های مختلف یک دال یکسان از تعداد لایه‌های مشابهی استفاده شده است. بعد از اتمام دورپیچ کردن، صفحات CFRP اضافی به انتهای دال چسبانده شدند، تا به عنوان محصورکننده سوراخ‌ها عمل نمایند. بنابراین سوراخ‌ها می‌توانند توسط اپوکسی پر شوند. الیاف CFRP مورد استفاده برای پایین دال در امتداد مماسی (عمود بر آرماتورهای خمشی اصلی) قرار گرفته و به اندازه کافی کوتاه هستند. بنابراین آن‌ها دال را در برابر خمش تقویت نمی‌کنند. در سطح زیرین دال درست در زیر صفحه‌ی بارگذاری از هیچ نوار CFRP استفاده نشد، زیرا این ناحیه محل قرارگیری ستون در سازه واقعی است.

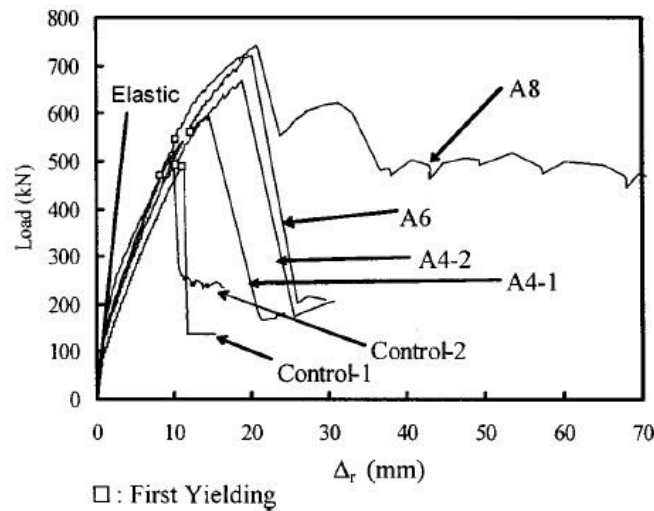


شکل (۲-۳) الگوهای الیاف مسلح پلیمری کربنی جهت مقاوم‌سازی نمونه‌ها

## نتایج آزمایش

### • پاسخ بار - تغییر مکان

خیز نسبی مرکزی،  $\Delta_r$ ، از تفاضل بین تغییر مکان حاصل از نیرو سنج‌های خطی ۲، ۴، ۶ و ۸ با تغییر مکان میانگین حاصل شده از نیرو سنج‌های خطی ۹ و ۱۰ محاسبه می‌شود، (شکل (۳-۱)). نمودار خطی نمایش داده شده در شکل (۳-۳) که می‌تواند به عنوان شیب اولیه قلمداد شود، نتایج حاصل از تحلیل خطی یک صفحه با تکیه‌گاه‌های ساده با مشخصات مقطع ناخالص، مشخصات مصالح اندازه‌گیری شده و بار اعمالی به مرکز آن می‌باشد. این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که شیب اندازه‌گیری شده نمونه‌ها تا قبل از ایجاد اولین ترک خمشی در تطابق خوبی با راه حل صفحه‌ای الاستیک قرار دارد. از آنجایی که مشاهده بصری اولین ترک خوردگی در سطح زیرین نمونه ممکن نیست، نقطه‌ای که پاسخ بار - تغییر مکان از پاسخ الاستیک اولیه منحرف شود، می‌تواند به عنوان نقطه نخستین ترک پذیرفته شود.



شکل (۳-۳) مقایسه پاسخ بار-خیز نمونه‌ها

مقایسه رفتار بار - تغییرمکان تمامی نمونه‌ها به همراه اولین نقطه اندازه‌گیری شده تسلیم در آرماتورها در شکل (۳-۳) نمایش داده شده است. خلاصه‌ای از نتایج حاصل از اندازه‌گیری بار-تغییرمکان در جدول (۲-۳) ارائه شده است. بار ترک‌خوردگی محاسبه شده برای نمونه‌ها در محدوده ۸۱ تا ۱۶۶ KN قرار داشت. بار وارد بر نمونه‌ها در آغاز تسلیم در آرماتورها در محدوده ۴۹۳ تا ۵۴۹ قرار داشت. برای نمونه‌های A4-1، A4-2، A6 و A8 نسبت به نمونه کنترلی ۱ به ترتیب افزایشی در ظرفیت باربری نهایی برابر با ۲۰، ۳۵، ۴۶ و ۵۱ درصد مشاهده شد. ظرفیت خمشی نمونه کنترلی با استفاده از الگوی خطوط تسلیم با دو خط امتداد یافته از هر گوشه ستون محاسبه گردید. مقاومت محاسبه شده خطوط تسلیم برای این الگو مطابق با رابطه ذیل محاسبه می‌شود.

$$V_{flex} = 8m \left( \frac{L}{L - C} - 0.172 \right)$$

که در آن:

m: ظرفیت خمشی واحد طول.

L: طول دهانه دال.

C: بعد صفحه بارگذاری مربعی شکل.

نسبت بارهای نهایی Vu به Vflex از تقریباً ۷۰ درصد برای نمونه‌های کنترلی تا ۱۰۰ درصد برای نمونه‌های A6 و A8 افزایش یافت (جدول (۲-۳)). اگرچه برای نمونه‌های A6 و A8 مطابق با روش

خطوط تسلیم، ظرفیت خمشی به دست آمد، اما گسترش تسلیم رخ نداد و پس از مقداری تسلیم شدگی در ناحیه تعمیر شده، گسیختگی پانچ رخ داد. این پدیده با نظر کریس ول (۱۹۷۴) تطابق دارد. او پیشنهاد داد با این که مقاومت خطوط تسلیم برای دال دست یافتنی است، ولی گسیختگی پانچ به دلیل فقدان در مقاومت افزون و شکل پذیری مورد نیاز برای وقوع مکانیزم خمشی، که حدود ۲۰ درصد بیش از بار خطوط تسلیم است، روی می دهد.

جدول (۳-۲). خلاصه‌ای از نتایج آزمایش

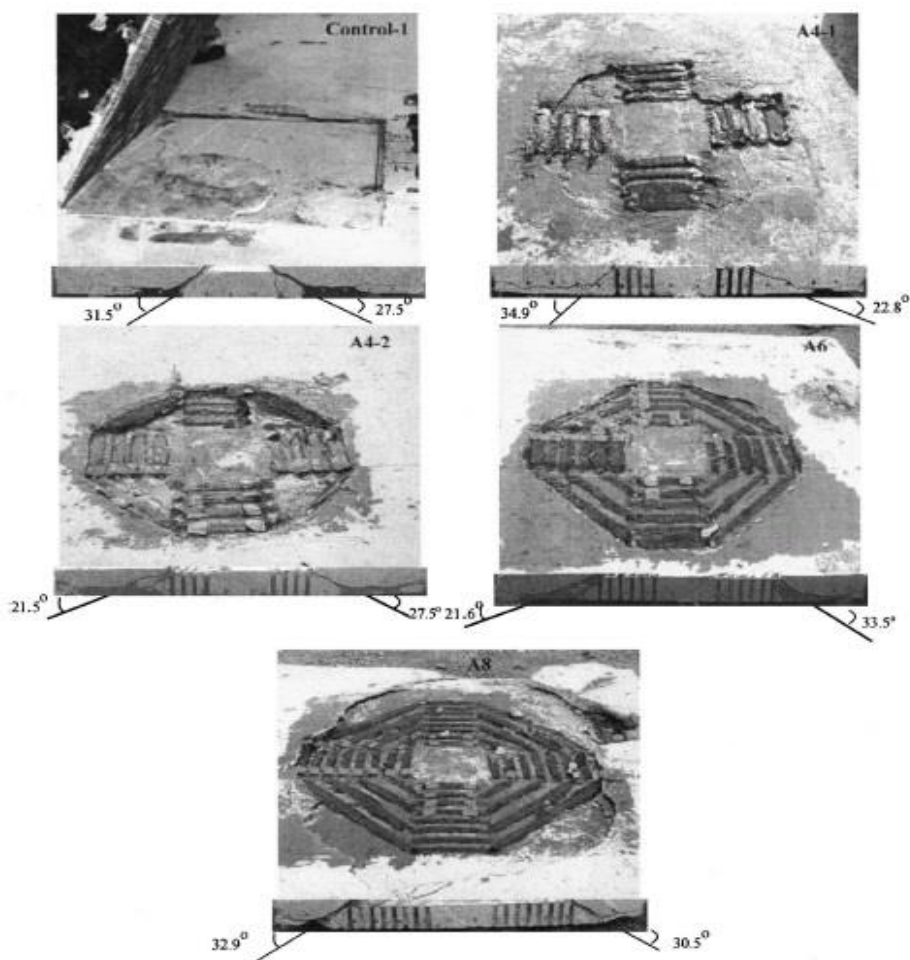
Specimen	Ultimate load $V_u$ (kN)	$V_u/V_{flex}$	Load at first cracking $V_{cr}$ (kN)	Load at first yield $V_y$ (kN)	Deflection at first cracking $\Delta_{cr}$ (mm)	Deflection at first yield $\Delta_y$ (mm)	Deflection at ultimate load $\Delta_u$ (mm)	% increase in ultimate load with respect to Control 1	% increase in displacement with respect to Control 1	Displacement ductility $\Delta_u/\Delta_y$	Load carried after punching (kN)
Control 1	494	0.68	81.1	487	0.71	11.0	11.3	—	—	1.03	139
Control 2	510	0.70	117	469	0.81	8.3	9.6	—	—	1.15	251
A4-1	595	0.81	166	549	1.21	11.5	14.6	20.3	29.5	1.27	165
A4-2	668	0.91	153	493	1.21	10.2	18.9	35.1	67.6	1.85	173
A6	721	0.99	165	562	1.21	12.3	19.8	45.9	75.8	1.61	204
A8	744	1.02	153	546	1.21	10.2	20.7	50.5	83.1	2.02	555

شکل پذیری تغییر مکان به عنوان نسبتی از خیز در بار نهایی تقسیم بر خیز در نخستین تسلیم تعریف می شود، که برای نمونه‌های کنترلی ۱، A4-1، A4-2، A6 و A8 به ترتیب برابر با ۱/۰، ۱/۲۷، ۱/۶۱، ۲/۰۲ می باشد. با افزایش سطحی که توسط CFRP تقویت می شود، حداکثر ظرفیت باربری و شکل پذیری تغییر مکان تمایل به افزایش دارند.

#### • ترک‌های مورب (برشی) و مدهای گسیختگی

پس از آزمایش، جهت مشاهده الگوی ترک‌های مورب نمونه‌های تقویت شده از میان موقعیت‌های CFRP و نمونه کنترلی ۱ از مرکز تکه تکه شدند. در شکل (۳-۴) سطح گسیختگی فوقانی به همراه مقاطع عرضی دال برای نمونه‌های کنترلی ۱، A4-1، A4-2، A6 و A8 نمایش داده شده است. در نمونه A4-1 مشاهده می شود که سطح گسیختگی از خارج از محدوده مسلح شده برشی آغاز شده و با نفوذ گسیختگی به داخل ناحیه مسلح شده برشی ادامه می یابد.

برای جلوگیری از وقوع گسیختگی در داخل محدوده مسلح شده برشی، در نمونه A4-2 در فواصل بین سوراخ‌های واقع در اضلاع مجاور صفحه‌ی بارگذاری در محیط خارجی از نوارهای قطری استفاده شد (شکل (۳-۲))، ثابت شده است که نوارهای قطری موثر بوده و از شکل‌گیری مخروط برش پانچ در ناحیه مسلح شده برشی جلوگیری می‌کند. به همین جهت راهکار مشابهی برای نمونه‌های A6 و A8 مورد استفاده قرار گرفت. با افزایش مساحت CFRP‌های مقاوم‌کننده در نمونه‌ها، سطح گسیختگی به سمت خارج (دورتر از ناحیه بحرانی) حرکت می‌کند. در نمونه‌های A4-2، A6 و A8 هیچ‌گونه ترک برشی در محدوده مسلح شده با CFRP مشاهده نشد (شکل (۳-۴)). در عوض گسیختگی پانچ در خارج از ناحیه مسلح شده برشی رخ داد. نوارهای CFRP قطری احتمال رخداد هرم برش پانچ را در داخل ناحیه مسلح شده برشی در گوشه‌های صفحه‌ی بارگذاری منتفی می‌سازد. باید به این نکته توجه شود که زاویه مخروط برش در نمونه کنترلی ۱ به طور میانگین ۲۹/۵ درجه و در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده، تقریباً در محدوده بین ۲۲ تا ۳۴ درجه و به طور متوسط ۲۸/۲ درجه بود. مورد اخیر نشان می‌دهد که ساختار ترک‌های مورب که منجر به گسیختگی پانچ می‌گردند، برای نمونه‌های مقاوم‌سازی شده و نمونه کنترلی ۱ مشابه است. تنها تفاوت در موقعیت سطح گسیختگی می‌باشد. همان‌طور که در جدول (۳-۲) نمایش داده شده است، گسیختگی نمونه‌های مقاوم‌سازی شده نسبت به نمونه‌های کنترلی بسیار شکل‌پذیرتر می‌باشد.



شکل (۳-۴) سطوح گسیختگی و مقاطع عرضی

پس از وقوع گسیختگی پانچ، اندازه‌گیری‌های لازم جهت مشاهده رفتار پس از برش پانچ صورت گرفت. در جدول (۳-۲)، مقایسه‌ای از میزان بار قابل تحمل پس از برش پانچ ارائه شده است. اگر در یک ستون از ساختمانی با سیستم باربر جانبی دال تخت گسیختگی پانچ رخ دهد، ممکن است یک افزایش ناگهانی در بار وارده بر ستون‌های مجاور ایجاد شود که می‌تواند منجر به وقوع فرو ریزش پیش‌رونده (تصادی) گردد.

جهت جلوگیری از فرو ریزش پیش‌رونده در آیین نامه ACI 318-89 استفاده از دو میلگرد ممتد تحتانی که از هسته ستون عبور می‌کنند تا به عنوان آرماتور پیوستگی عمل کنند، پیش‌بینی شده است.

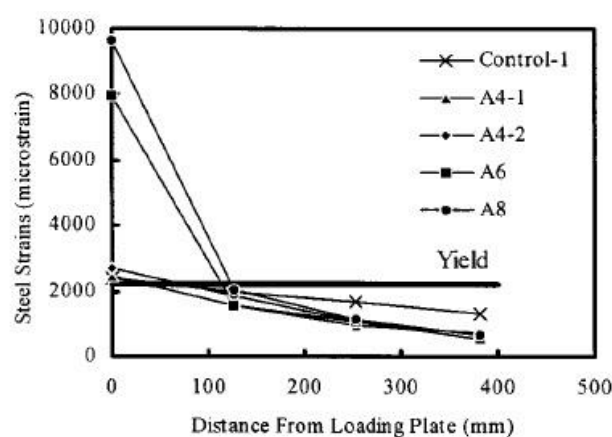
نمونه کنترلی ۲ به دلیل وجود آرماتورهای فشاری ممتد در ناحیه صفحه‌ی بارگذاری، که باعث افزایش نیروهای میخ‌پرچی می‌شود، تقریباً دو برابر بار تحمل شده توسط نمونه کنترلی ۱ را پس از برش پانچ تحمل کرد. نتیجه فوق تاثیر بخش بودن الزامات ACI 318-02 را در مورد فولاد پیوستگی تصدیق می‌کند. ظرفیت تحمل بار پس از برش پانچ نمونه‌های مقاوم‌سازی شده از نمونه کنترلی ۱ بیشتر بود. به علاوه، ظرفیت تحمل بار پس از برش پانچ نمونه A8 از بار نهایی نمونه کنترلی ۲ نیز بیشتر بود. مورد اخیر به همراه سایر شواهد ارائه شده در جدول (۳-۲) و شکل (۳-۳) نشان می‌دهد که استفاده از CFRP، مدهای گسیختگی را از حالت ترد برش پانچ به سمت یک مد شکل پذیرتر با بهبود رفتار پس از برش پانچ تغییر می‌دهد.

#### • کرنش در فولاد

موقعیت کرنش سنج‌های متصل شده به آرماتورها جهت تعیین میزان کرنش در طی آزمایش‌ها در شکل (۳-۱) نمایش داده شده است. پروفیل کرنش در فولاد در بارهای نهایی نمونه‌ها در شکل نمایش داده شده است. خط افقی در شکل فوق نشان‌دهنده کرنش تسلیم آرماتورهای فلزی می‌باشد، که با استفاده از آزمایش‌های کشش تک محوری برابر با ۲۲۴۰ میکرو کرنش حاصل آمده است. کرنش در فولاد با فاصله از صفحه‌ی بارگذاری نسبت معکوس دارد. فاصله تسلیم شدگی از حدود ۲۰ میلی‌متر از وجه صفحه‌ی بارگذاری برای نمونه کنترلی ۱ تا حدود ۱۲۰ میلی‌متر برای نمونه A8 افزایش یافت. به بیان دیگر نسبت مساحت آرماتورهای خمشی که جاری می‌شوند برای نمونه A8 به نمونه کنترلی ۱ در حدود ۲/۵ برابر است. یک افزایش قانون‌مند در کرنش نهایی ایجاد شده در آرماتورهای فولادی مشاهده گردید. کرنش‌های اندازه‌گیری شده در فولاد نیز نسبت فوق‌الذکر بین ظرفیت خمشی حاصل از تحلیل خطوط تسلیم و بارهای برش پانچ را تصدیق می‌نمایند. اگرچه در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده سطوح بالایی از کرنش در آرماتورهای خمشی حاصل آمد، اما امکان تغییر کامل مد گسیختگی به مد خمشی امکان‌پذیر نشد. مکانیزم گسیختگی پانچ با رسیدن نواحی



مقاوم‌سازی نشده به مقاومت برشی نهایی آغاز گردید.

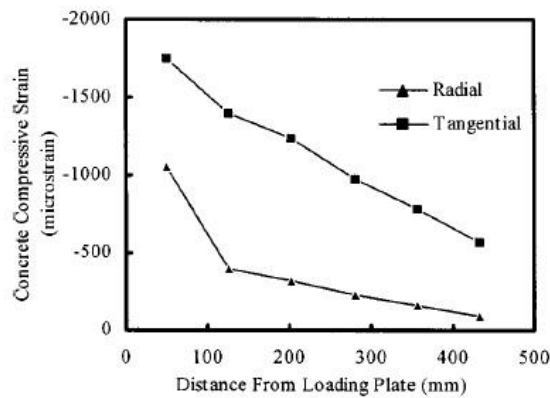


شکل (۳-۵) پروفیل کرنش فولاد در بارهای نهایی

## • کرنش در بتن

جهت مشاهده سطوح کرنش در هنگام برش پانچ، کرنش‌های بتن در وجه فشاری نمونه کنترلی ۲ اندازه‌گیری شدند. کرنش‌های شعاعی و مماسی در نواحی مختلف اندازه‌گیری شدند. در شکل (۳-۶) نمودار کرنش‌های شعاعی فشاری و مماسی اندازه‌گیری شده در مقابل فاصله از وجه صفحه‌ی بارگذاری نمایش داده شده است. هر دوی کرنش‌های مماسی و شعاعی در بار نهایی با فاصله از صفحه‌ی بارگذاری نسبت معکوس دارند. به علاوه با افزایش فاصله از صفحه‌ی بارگذاری، کاهش سریع‌تری در کرنش‌های شعاعی که همواره کوچکتر از کرنش‌های مماسی هستند، مشاهده شد. با افزایش فاصله از صفحه‌ی بارگذاری کاهش در کرنش‌های مماسی باعث کم شدن محصور شدگی در ناحیه فشاری می‌گردد. نتیجه اخیر با مطالعات گزارش شده توسط CEB (1985) مطابقت دارد و این نتیجه‌گیری که برش پانچ یک گسیختگی شکافنده در نتیجه نرم‌شدن بتن در ناحیه فشاری ناشی از فشار مماسی بالا است را تأیید می‌نماید. بالاترین تنش مماسی اندازه‌گیری شده در حدود ۱۸۰۰ میکرو کرنش بود که تقریباً برابر با تنش محصورشدگی بتن، که برابر با  $0.95 f_c$ ، حاصل از آزمایش

روی استوانه استاندارد است، می‌باشد.



شکل (۳-۶) پروفیل کرنش‌های فشاری شعاعی و مماسی در بتن

#### • کرنش در پلیمر مسلح به الیاف کربنی (CFRP)

کرنش‌ها در پلیمر مسلح به الیاف کربنی در جهت قائم با آغاز از نزدیک‌ترین نوار به صفحه‌ی بارگذاری به سمت خارجی‌ترین نوار اندازه‌گیری شدند. محیط‌های CFRP عنوان شده در این بخش در شکل (۳-۷) نمایش داده شده است. نمودار کرنش‌های اندازه‌گیری شده در برابر فاصله از صفحه‌ی بارگذاری در بار نهایی برای نمونه‌های مقاوم‌سازی شده در شکل (۳-۸) نمایش داده شده است. این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که مقدار CFRP استفاده شده در نمونه A4-2 تقریباً نصف مقدار استفاده شده در نمونه A4-1 است. در نتیجه کرنش‌ها در CFRP افزایش یافته است. در تمامی نمونه‌ها به جز نمونه A8، بالاترین کرنش‌ها در محیط دوم مشاهده گردید. از آنجایی که تنش‌های محصورشدگی در جهت مماسی با کاهش فاصله از صفحه‌ی بارگذاری افزایش می‌یابند، سهم بتن در محیط اول سوراخ‌ها دارای بیشترین مقدار می‌باشد. با کاهش سهم بتن، به دلیل کاهش در اثرات محصورشدگی از محیط اول به سمت محیط دوم، سهم CFRP افزایش می‌یابد. با افزایش فاصله از صفحه‌ی بارگذاری، تنش برشی میانگین در محیط‌ها کاهش می‌یابد، که سهم CFRP را کاهش می‌دهد. در خارجی‌ترین محیط، یک افزایش جزئی در کرنش‌های CFRP مشاهده شد که ناشی از نزدیک بودن گسیختگی پانچ درست در

خارج از ناحیه مسلح شده برشی می‌باشد. با توجه به اطلاعات به دست آمده از کرنش‌ها، سهم بتن در هر محیط در داخل ناحیه تسلیح شده برشی،  $V_c^i$ ، با استفاده از رابطه ذیل محاسبه می‌گردد:

$$V_c^i = \frac{V_u - \varepsilon_{frp} E_{frp} A_{frp}}{bd}$$

که در آن:

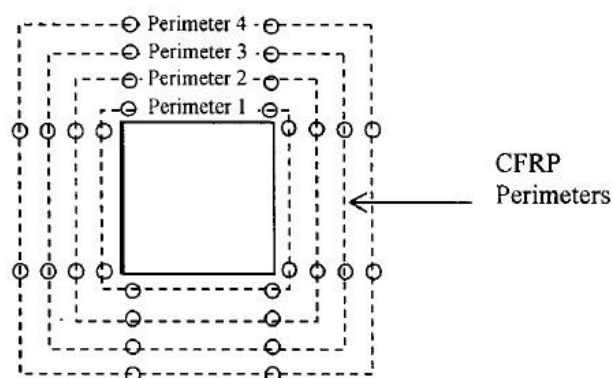
$V_u$ : ظرفیت نهایی تحمل بار.

$\varepsilon_{frp}$ : کرنش میانگین اندازه‌گیری شده در CFRP.

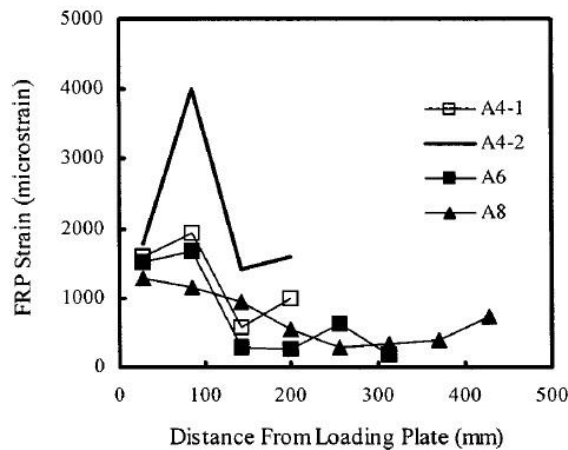
EFRP: ضریب الاستیسیته CFRP.

AFRP: مجموع مساحت CFRP در هر محیط.

b: طول محیط CFRP، همان‌گونه که در شکل (۷-۳) نمایش داده شده است.

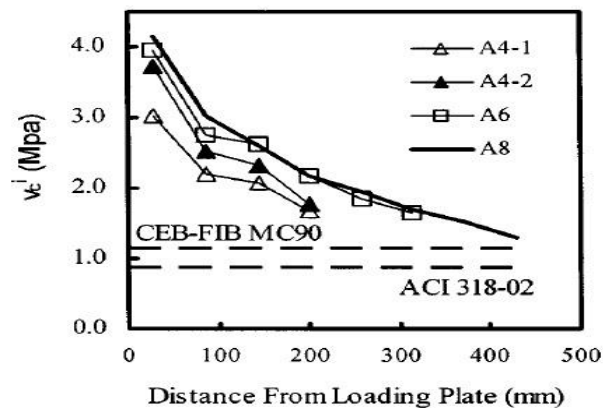


شکل (۷-۳) محیط‌های پلیمر مسلح به الیاف کربنی



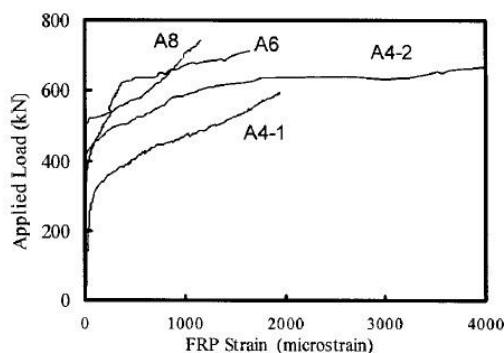
شکل (۸-۳) پروفیل کرنش در پلیمر مسلح به الیاف کربنی در بارهای نهایی

مقاومت برشی بتن در داخل ناحیه مسلح شده برشی در مقابل فاصله از وجه صفحه‌ی بارگذاری در شکل (۹-۳) نمایش داده شده است. قابل مشاهده است که سهم بتن با افزایش فاصله از صفحه‌ی بارگذاری برای محیط‌های CFRP کاهش می‌یابد. مقاومت برشی بتن در داخل ناحیه مسلح شده برشی،  $V_c$ ، بسیار بالاتر از مقادیر طراحی مورد قبول و معمول در محاسبه مقدار آرماتور در ناحیه مسلح شده برشی می‌باشد. این مقاومت بالا به دلیل اثر سودمند نوارهای CFRP در سالم نگاه داشتن ناحیه مقاوم‌سازی شده ناشی از کارآمدی سیستم CFRP بافته شده می‌باشد. مورد اخیر احتمال وقوع ترک‌های مورب در داخل ناحیه مسلح شده برشی و انتقال گسیختگی به خارج از این ناحیه را منتفی می‌سازد.



شکل (۹-۳) مقاومت بتن در داخل ناحیه مسلح شده برشی

نمودار بار متمرکز اعمالی در مقابل حداکثر کرنش اندازه‌گیری شده در CFRP در شکل (۳-۱۰) نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که کرنش‌های CFRP تا اعمال حد مشخصی از بار خارجی بسیار کوچک هستند. به طور میانگین نوارهای CFRP تا حدود  $\frac{2}{3}$  بار نهایی دال فعال نخواهند شد و تنش‌های برشی اساساً توسط بتن تحمل می‌شوند. پس از آن نوارهای CFRP وارد عمل شده و تنش‌های برشی زیادی را تحمل می‌کنند. مورد اخیر نشان می‌دهد که سهم بتن و CFRP از تنش برشی در زمان‌های متفاوتی رخ می‌دهد.



شکل (۳-۱۰) رابطه بار اعمالی- کرنش در پلیمر مسلح به الیاف کربنی برای نمونه‌های آزمایش

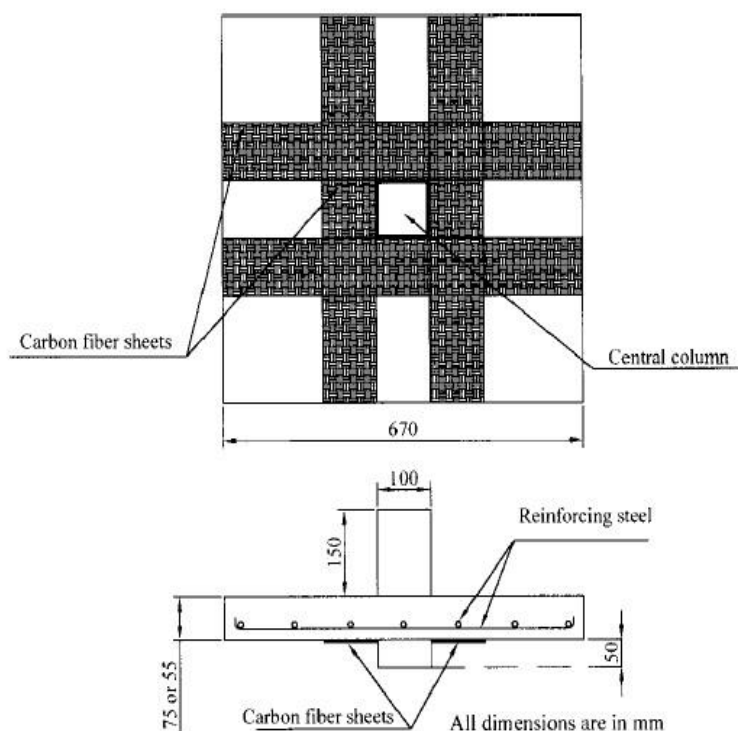
### ۳-۳-۲ - مقاوم‌سازی برشی اتصالات میانی دال - ستون با استفاده از صفحات پلیمر مسلح به الیاف کربنی (هراجلی، سودکی، ۲۰۰۳) [3]

در این آزمایش مقاوم‌سازی اتصالات کوچک مقیاس دال - ستون، در برابر بارهای ثقیلی، با استفاده از نوارهای CFRP چسبیده به وجه کششی دال مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیر شرایط مختلفی از جمله عرض و تعداد لایه‌های مختلف الیاف و نیز تاثیر مقاومت فشاری بتن مورد بررسی قرار گرفته و نتایج هر کدام ارائه شده است.

## برنامه آزمایشگاهی

### • نمونه‌های آزمایش و مصالح

شانزده نمونه شامل یک دال مربع با ابعاد  $670 \text{ mm} \times 670 \text{ mm}$  و یک پایه ستون مرکزی با ابعاد  $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$  که بیانگر اتصال میانی دال - ستون بود، مورد آزمایش قرار گرفتند. پایه ستون با دال به صورت یکپارچه بتن‌ریزی شده بود و جهت شبیه‌سازی با نزدیک‌ترین شرایط ممکن و محدودیت‌های اجرایی که در مقاوم‌سازی اتصالات داخلی دال - ستون واقعی وجود داشت، از هر دو وجه کششی و فشاری دال بیرون زده شد. دال به صورت ساده روی چهار لبه تکیه داشت. بنابراین گوشه‌ها هنگام اعمال بار، اجازه بلند شدن را می‌یافتند. ابعاد و جزئیات آرماتورگذاری مربوطه در شکل (۳-۱۱) نمایش داده شده است. نمونه‌ها با توجه به ضخامت دال و محتوای آرماتورگذاری به چهار گروه تقسیم شدند. صفحات انعطاف پذیر CFRP با عرض‌های مختلف به صورت خارجی به وجه کششی دال در دو جهت عمود بر هم و موازی با آرماتورهای کششی داخلی و تا حد ممکن نزدیک به وجه ستون چسبانیده شدند. با توجه به پارامترهای طراحی هر نمونه، صفحات CFRP در یک یا دو لایه به کار گرفته شدند. برای جلوگیری از گسیختگی جداشدگی صفحات CFRP، صفحات در تمامی طول دال ادامه پیدا کردند. دوازده نمونه با استفاده از CFRP مقاوم‌سازی شدند. در حالی که چهار نمونه به عنوان نمونه‌های کنترلی باقی ماندند. تمامی نمونه‌های بدون مقاوم‌سازی، جهت مواجهه با مد گسیختگی برش پانچ طراحی گردیدند.



شکل (۳-۱۱) ابعاد و جزئیات نمونه‌های مسلح

پارامترهای آزمایش، طراحی نمونه‌ها و اطلاعات مربوط به هر نمونه در جدول (۳-۳) سامان‌دهی شده است. متغیرهای آزمایش شامل ضخامت دال، نسبت آرماتورهای فولادی و مساحت CFRP های مسلح کننده می‌باشد. دو ضخامت دال مختلف، به طور اسمی برابر با ۵۵ و ۷۵ میلی‌متر، مورد بررسی قرار گرفتند. با لحاظ تکیه‌گاه‌ها به عنوان خطوط عطف، ضخامت‌های انتخاب شده به ترتیب برابر با دالی با نسبت دهانه به ارتفاع ۲۵ و ۱۸ میلی‌متر خواهند بود.

جدول (۳-۳)، خلاصه‌ای از پارامترهای آزمایش

Series	Specimen designation	Slab depth (mm)	Longitudinal reinforcement, $\phi$ (mm)	CFRP sheet width (mm)	Concrete strength, $f'_c$ (MPa)
A1	SA1	55	5 $\phi$ 8	None	31.9
	SA1F5	55	5 $\phi$ 8	50	29.1
	SA1F10	55	5 $\phi$ 8	100	34.3
	SA1F15	55	5 $\phi$ 8	150	23.5
A2	SA2	55	7 $\phi$ 8	None	35.5
	SA2F10	55	7 $\phi$ 8	100	31.9
	SA2F15	55	7 $\phi$ 8	150	35.5
	SA2F20	55	7 $\phi$ 8	200	23.5
B1	SB1	75	5 $\phi$ 10	None	35.5
	SB1F10	75	5 $\phi$ 10	100	31.9
	SB1F15	75	5 $\phi$ 10	150	33.0
	SB1F10 (2L)	75	5 $\phi$ 10	100 (two layers)	34.3
B2	SB2	75	7 $\phi$ 10	None	29.1
	SB2F15	75	7 $\phi$ 10	150	29.1
	SB2F20	75	7 $\phi$ 10	200	33.0
	SB2F15 (2L)	75	7 $\phi$ 10	150 (two layers)	34.3

Note:  $f_y$  for  $\phi$  8 bar=487.6 MPa;  $f_y$  for  $\phi$  10 bar=488.5 MPa.

آرماتورهای فلزی شامل میلگردهای آجدار با قطر ۸ و ۱۰ mm بودند. مقاومت تسلیم (در کرنش ۰/۲) برای میلگردهای با قطر ۸ mm برابر با ۴۸۷ MPa و برای میلگردهای با قطر ۱۰ mm برابر با ۴۴۸ MPa بود. آرماتورها در دو راستای عمود بر هم با عمق موثر میانگین از مرکز دو لایه برابر با ۳۷ mm برای نمونه‌های گروه A و ۵۵ mm برای نمونه‌های گروه B چیده شدند. نسبت آرماتورها برای نمونه‌های گروه A و B به ترتیب در حدود ۱ و ۱/۵ درصد بود.

طرح اختلاط بتن جهت دستیابی به مقاومت فشاری هدف  $f'_c$  برابر با ۳۴/۵ MPa (۵۰۰۰ psi) طراحی گردید. سیمان پرتلند معمولی با ماسه شسته و مصالح دانه‌ای آهکی شکسته با قطر دانه‌های در حدود ۱۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات وزنی سیمان: ماسه: درشت دانه برابر با ۰/۳۲ : ۰/۵ : ۱/۰ با نسبت آب به سیمان در حدود ۰/۵ بود. هر سه نمونه با استفاده از یک مخلوط مشابه بتن‌ریزی شدند و سه استوانه استاندارد  $150 \times 300 \text{ mm}^2$  ( $6 \times 12 \text{ in}^2$ ) از هر مخلوط جهت تعیین مقاومت واقعی بتن اخذ گردید (جدول (۳-۳)).



CFRP ها از نوع صفحات انعطاف پذیر Sika Wrap Hex-230C بودند. با توجه به اطلاعات کارخانه سازنده، ضخامت صفحات  $0.13 \text{ mm}$ ، ضریب الاستیسیته  $230 \text{ GPa}$ ، مقاومت کششی  $3500 \text{ MPa}$  و کرنش کششی نهایی  $1/5$  درصد بود. صفحات CFRP در دو جهت موازی با آرماتورهای اصلی دال نزدیک به محل اتصال دال-ستون در یک یا دو لایه به سطح کششی دال چسبانده شدند. (شکل ۳-۳-۱۱)). عرض صفحات منفرد بین  $50$  تا  $200$  میلی متر متغیر بود. خلاصه‌ای از مشخصات CFRP های مسلح کننده در هر نمونه در جدول (۳-۳) ارائه شده است.

### • فرآیند آزمایش و اندازه‌گیری

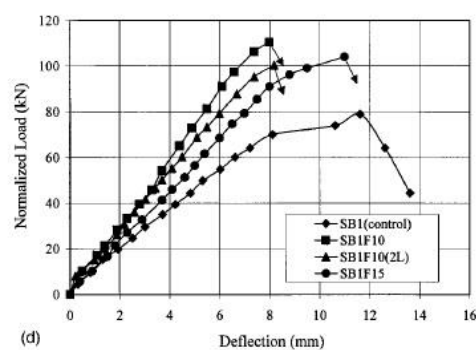
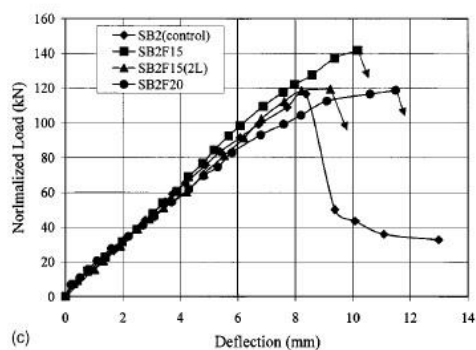
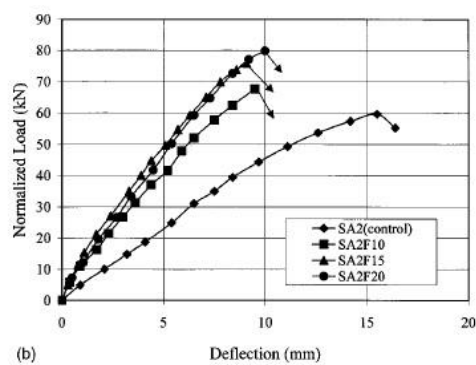
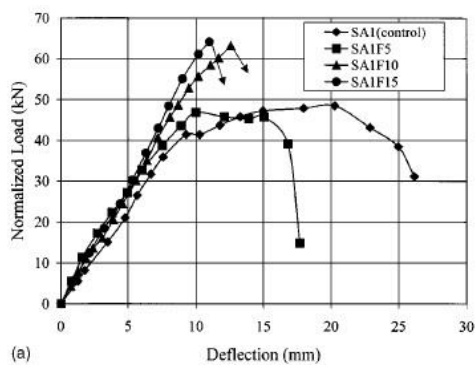
نمونه‌ها در هر چهار لبه خودروی یک قاب فولادی با پداستال‌هایی به عرض  $40$  میلی متر نصب گردیدند و از طریق پایه ستون به صورت مرکزی با افزایش یکنواخت در میزان بار تا رسیدن به گسیختگی بارگذاری شدند. بارگذاری در مد کنترل ضربه با نرخ افزایش  $1 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$  با استفاده از دستگاه MTS انجام گرفت. اندازه‌گیری‌های آزمایش شامل بزرگی بار اعمالی، خیز دال در محل ستون و کرنش در صفحات CFRP انجام گرفت. کرنش در صفحات CFRP با استفاده از کرنش‌سنج‌های الکتریکی، که در ناحیه دارای بیشترین ممان منفی (در محل اتصال دال به ستون) به وسط ضخامت صفحات متصل شده بودند، اندازه‌گیری شد. دو کرنش‌سنج نیز در دو جهت متعامد در هر دال تعبیه شدند. اندازه‌گیری‌های انجام شده توسط کرنش‌سنج‌ها در حین آزمایش توسط کامپیوتر ثبت گردید. در پایان هر آزمایش زاویه‌ای که تحت آن ترک‌های برشی از وجه ستون انتشار یافته بود اندازه‌گیری شد و الگوی ترک خوردگی و مد گسیختگی هر نمونه به دقت مورد بررسی قرار گرفت.

## • بررسی نتایج آزمایش

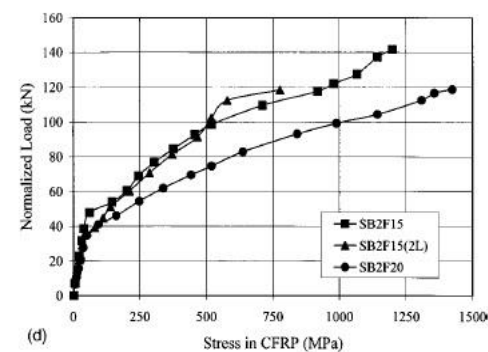
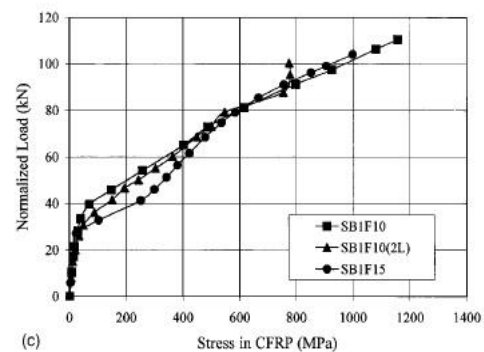
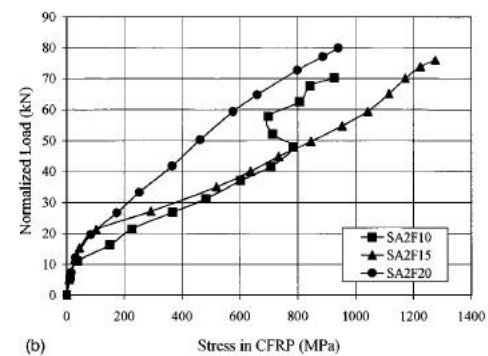
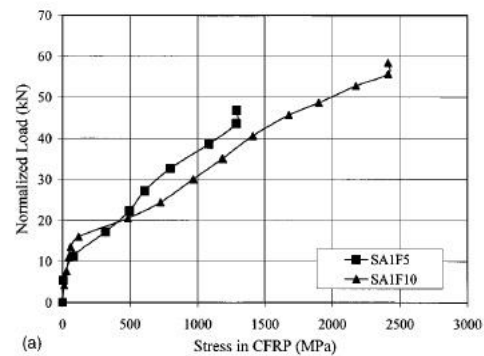
برای مقایسه نتایج در نمونه‌هایی که دارای مقاومت فشاری بتن متفاوت بودند، بار اعمالی اندازه‌گیری شده در هر گام بارگذاری از پاسخ نمونه‌ها با ضرب کردن بار اندازه‌گیری شده در  $\sqrt{\frac{34.5}{f_c}}$  به بتن با مقاومت با  $34/5$  MPa (5000 Psi) نرمال‌سازی شد. در رابطه فوق  $f_c$  مقاومت فشاری واقعی بتن در واحد MPa است. خلاصه‌ای از نتایج آزمایش که مد گسیختگی و ظرفیت مقاومت نهایی نرمال‌سازی شده نمونه‌ها را نشان می‌دهد در جدول (۳-۴) ارائه شده است. نمودار بارگذاری نرمال‌سازی شده در برابر تغییرشکل (خیز) نمونه‌ها در آزمایش‌های متفاوت در شکل (۳-۱۲ الف تا د) نمایش داده شده است. تنش‌های میانگین در صفحات CFRP با ضرب نمودن کرنش میانگین اندازه‌گیری شده در ضریب الاستیسیته صفحات CFRP به دست آمد. نمودار تغییرات بارگذاری نرمال‌سازی شده در برابر تنش در صفحات CFRP در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده متفاوت در شکل‌های (۳-۱۳ الف تا د) نمایش داده شده است.

جدول (۳-۴)، مدهای گسیختگی و مقاومت نهایی نرمال‌سازی شده

Specimen	Mode of Failure	Normalized load, $P_u$	
		(kN)	$P_u / P_{u(\text{control})}$
SA1 (control)	Flexural	49.2	1.00
SA1F5	Flex punch	47.4	0.96
SA1F10	Punching	65.4	1.33
SA1F15	Punching	64.1	1.30
SA2 (control)	Punching	60.5	1.00
SA2F10	Punching	70.1	1.16
SA2F15	Punching	77.7	1.28
SA2F20	Punching	80.0	1.32
SB1 (control)	Flex punch	78.8	1.00
SB1F10	Punching	114.5	1.45
SB1F15	Punching	104.0	1.32
SB1F10 (2L)	Punching	107.5	1.36
SB2 (control)	Punching	122.0	1.00
SB2F15	Punching	142.3	1.17
SB2F20	Punching	118.6	0.97
SB2F15 (2L)	Punching	123.3	1.01



شکل (۳-۱۲) پاسخ بار- تغییرمکان در نمونه‌ها (الف) سری A1، (ب) سری A2، (ج) سری B1، (د) سری B2



شکل (۳-۱۳) بار- پاسخ تنش در صفحات CFRP نمونه‌ها (الف) سری A1، (ب) سری A2، (ج) سری B1، (د) سری B2

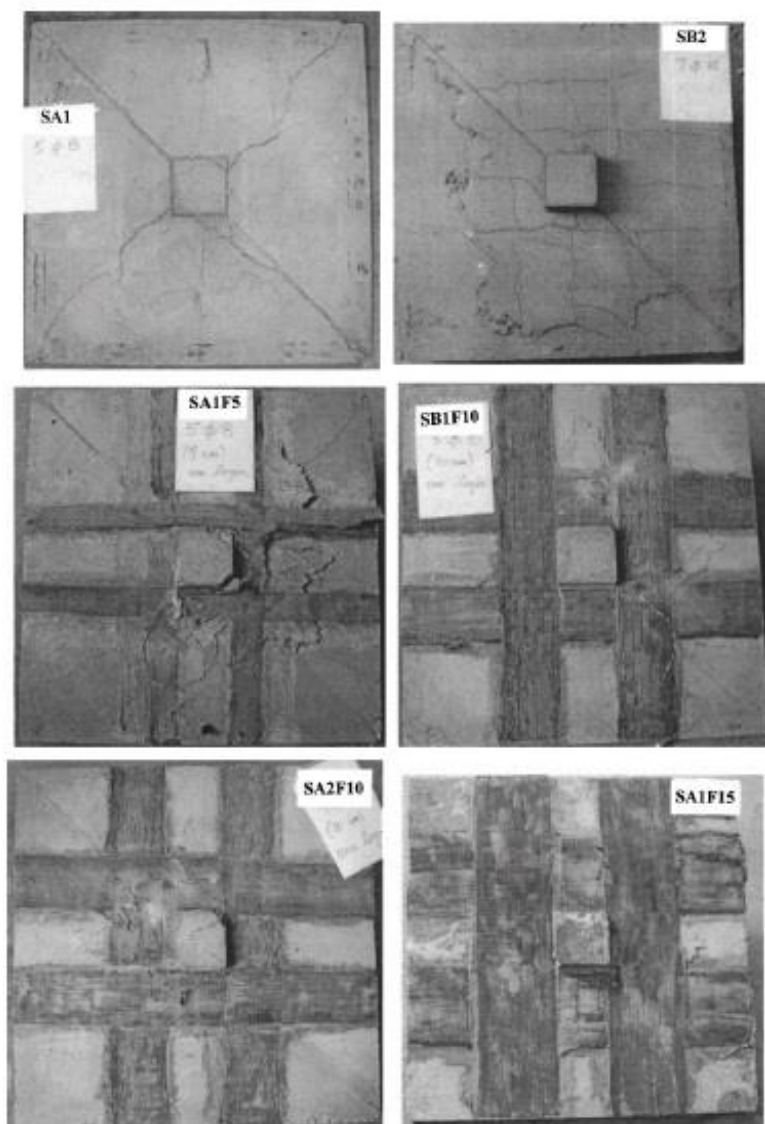
## • مدهای گسیختگی

نمونه SA1 در خمش و با شکل‌گیری خطوط تسلیم خمشی در راستای محیط پیرامون ستون گسیخته شد. خطوط تسلیم از گوشه‌های پایه ستون در جهات قطری به صورت منشعب به سمت نزدیک گوشه‌های دال گسترش یافتند. نمونه‌های SA1F5 و SB1 ترکیبی از گسیختگی خمشی و برش پانچ را تجربه کردند که در گسیختگی، هم خطوط تسلیم خمشی و هم ترک‌های ناشی از برش پانچ به طور هم‌زمان مشاهده شدند. در تمامی نمونه‌های دیگر علائم واضحی از گسیختگی برش دوطرفه مشاهده شد. الگوی شکل‌گیری ترک‌ها در شکل (۳-۱۴) نمایش داده شده است.

گسیختگی نمونه SA1F5 با شکسته شدن یکی از صفحات CFRP در ناحیه بحرانی دارای ممان حداکثر همراه بود. همچنین گسیختگی نمونه SB1F10 با لایه لایه شدگی صفحات CFRP در تکیه‌گاه‌ها که جداشدگی افقی یک لایه نازک بتن بین سطح دال و رزین چسباننده صفحات CFRP نیز در آن مشهود بود، همراه گردید. علاوه بر این، به دلیل استفاده از دو لایه CFRP که باعث ایجاد نیروهای زیادی در CFRP و در نتیجه تمرکز بالای برش افقی در حد واسط بین صفحات CFRP و بتن می‌گردید، نمونه‌های مسلح شده با دو لایه CFRP (نمونه‌های SB1F10 (دو لایه) و SB2F15 (دو لایه)) متحمل گسیختگی ناشی از جداشدگی صفحات CFRP شدند. در دیگر نمونه‌های مقاوم‌سازی شده در اثر وقوع تغییرشکل‌های برشی در هر دو طرف ترک‌ها هنگام وقوع برش پانچ، صفحات CFRP در بار گسیختگی در نزدیک ترک‌های برشی به صورت عرضی جدا شدند. صفحات CFRP هیچ‌گونه مقاومتی در جهت عرضی (خارج از صفحه) ندارند.

میانگین فاصله از خارجی‌ترین لبه ترک‌های برش پانچ در وجه کششی نمونه‌ها تا وجه پایه ستون برای نمونه SA1F10 برابر با  $2/43$  h، برای نمونه SA1F15 برابر با  $2/7$  h، برای نمونه SA2 برابر با  $2/6$  h و برای دیگر نمونه‌های باقی‌مانده بین  $1/8$  تا  $2/1$  h بود. که  $h$  ضخامت دال می‌باشد. در ظاهر، فاصله متناظر و زاویه‌ای که در آن ترک‌های برشی از وجه ستون انتشار می‌یابند برای نمونه کنترلی و

نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با CFRP یکسان بوده و از مساحت صفحات CFRP مورد استفاده تاثیر نمی‌پذیرد. به جز نمونه‌هایی که متحمل گسیختگی خمشی و یا ترکیب خمشی-برشی شدند، تمامی نمونه‌ها تحت یک رفتار ترد فرو ریختند که مشخصه گسیختگی برش پانچ می‌باشد.



شکل (۳-۱۴) الگوی ترک‌خوردگی تیپ در بار گسیختگی

## • پاسخ بار-تغییرمکان و ظرفیت مقاومت نهایی

پاسخ بار-تغییرمکان نمونه‌ها شامل یک مرحله سخت قبل از ترک‌خوردگی بود که با یک ناحیه الاستیک خطی ادامه می‌یافت، تا این‌که گسیختگی برش پانچ با یک رفتار ناگهانی رخ داده و منجر به سقوط شدید در مقاومت بارگذاری شود. همان‌طور که انتظار می‌رفت سختی پاسخ بار-تغییرمکان در نمونه‌های با ضخامت کمتر یا نمونه‌های با نسبت آرماتور کششی کمتر، کوچکتر بوده و خیزشان تحت بار نهایی بزرگتر بود. در نمونه‌هایی که گسیختگی خمشی یا ترکیب گسیختگی خمشی-برشی پانچ از خود نشان دادند، مرحله پس از ترک‌خوردگی با یک ناحیه تسلیم تقریباً افقی که ناشی از تسلیم شدگی آرماتورها است، ادامه یافت. تا این‌که نمونه‌ها در مد خمشی خالص (نمونه SA1) و یا ترکیب مد خمشی-برشی (نمونه‌های SA1F5 و SB1) گسیخته شدند.

با مقایسه پاسخ بار-تغییرمکان نمونه‌ها (شکل (۳-۱۲) الف و ب)) و نتایج بار نهایی نرمال‌سازی شده ارائه شده در جدول (۳-۴) مشاهده می‌شود که مقاوم‌سازی با CFRP، مقاومت ترک‌خوردگی (در پاسخ بار-تنش در شکل‌های (۳-۱۳) الف و ب) به وضوح مشخص است) و سختی خمشی نمونه‌ها را افزایش می‌دهد و باعث بهبود قابل توجهی در ظرفیت مقاومت نهایی می‌گردد. افزایش در مقاومت به نسبت مساحت CFRP به مساحت آرماتورهای داخلی و مد گسیختگی نمونه‌ها و صفحات CFRP بستگی دارد. ولی با افزایش در مساحت صفحات CFRP تمایل به کنده شدن صفحات از بتن رویه افزایش می‌یابد. در نمونه‌های سری A1، حدود ۳۳٪، در سری A2، ۲۸٪، در سری B1، ۴۵٪ و در سری B2، ۱۷٪ افزایش در ظرفیت مقاومت برشی نرمال‌سازی شده حاصل آمد.

از آنجایی که صفحات CFRP هیچ‌گونه مقاومتی در برابر بارهای عرضی ایجاد نمی‌کنند، افزایش ظرفیت برشی مشاهده شده در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با CFRP در مقایسه با نمونه‌های کنترلی

به نقش تسلیحات CFRP در محدود کردن گسترش ترک‌های کششی- خمشی و برشی از طریق افزایش ظرفیت خمشی نمونه‌ها نسبت داده می‌شود.

گسیختگی یک نوار CFRP در نمونه SA1F5 در تراز بارگذاری کمی بالاتر از بار تسلیم آرماتورهای داخلی، باعث افزایش سریع و ناگهانی خیز تا زمان وقوع گسیختگی مرکب خمشی- برش پانچ گردید (شکل (۳-۱۲ الف)). همچنین از آنجایی که جایگزین کردن صفحات CFRP به صورت دو لایه روی هم باعث وقوع گسیختگی زودرس آن‌ها به صورت جداسدگی می‌گردد، سهم نوارهای CFRP در مقاومت خمشی در این حالت به صورت کارآمدی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. به همین دلیل ظرفیت مقاومت برشی نمونه‌های SB1F10 (دو لایه) و SB2F15 (دو لایه) در مقایسه با نمونه‌های مشابه با یک لایه نوار CFRP تفاوت چندانی نشان نداد. از آنجایی که افزایش در ظرفیت خمشی و برشی با کاهش در شکل‌پذیری گسیختگی همراه است، مقاوم‌سازی اتصالات دال- ستون به روش فوق در نواحی با خطر لرزه‌ای بالا که رفتار شکل‌پذیر عامل اصلی بقای سازه بتنی تحت بارگذاری تناوبی زلزله می‌باشد، باید با احتیاط انجام شود.

#### • تنش در نوارهای CFRP

همان‌طور که در شکل (۳-۱۳ الف و ب) مشاهده می‌شود، تنش در نوارهای CFRP قبل از ترک‌خوردگی کوچک بودن و به تدریج پس از ترک‌خوردگی تا زمان وقوع گسیختگی به صورت خطی افزایش می‌یابد. مشابه با پاسخ بار- تغییرمکان، نرخ افزایش تنش با اعمال بار و تنش نهایی در بار گسیختگی به طور میانگین در نمونه دال با ضخامت ۵۵ mm در مقایسه با نمونه ۷۵ mm بزرگتر است. بسته به ضخامت نمونه، مد گسیختگی و مقاومت پیوستگی بین نوارهای CFRP و بتن، حداکثر تنش متناظر ایجاد شده در بار گسیختگی بین حداقل در حدود ۲۲٪ و حداکثر ۶۹٪ مقاومت کششی نهایی صفحات متغیر بود.

### ۳-۳-۳ - مقاوم‌سازی اتصالات میانی دال-ستون در برابر برش پانچ با استفاده از CFRP (شرف، سودکی، ون داسن، ۲۰۰۶) [17]

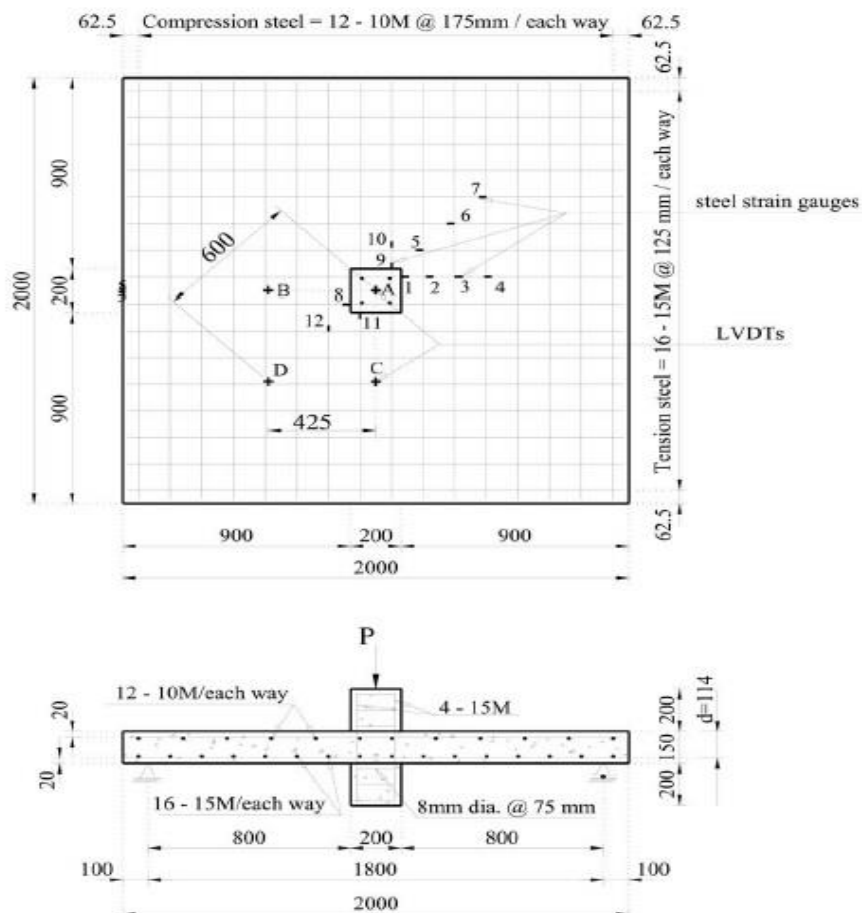
در این آزمایش مقاوم‌سازی اتصالات تمام مقیاس دال-ستون، در برابر بارهای ثقیلی، به صورت خارجی با استفاده از نوارهای CFRP چسبیده به وجه کششی دال مورد بررسی قرار گرفته است. آرایش‌ها و پیکربندی‌های مختلفی برای پلیمر مسلح به الیاف پیشنهاد شده و آرایش بهینه نوارهای FRP تعیین گردیده است.

#### برنامه آزمایشگاهی

##### • نمونه‌های آزمایش

شش نمونه تمام مقیاس اتصال دال-ستون با پیکربندی هندسی و جزئیات آرماتورگذاری یکسان ساخته شد. نمونه‌ها مشخص کننده بخشی از اتصال میانی دال - ستون محدود به خطوط عطف بودند. ابعاد و آرماتورهای دال از طریق تحلیل یک سیستم سقف معمولی با دهانه  $4 \times 4$  متر که در دو جهت در معرض بار ضریب دار برابر با  $10/85 \text{ KN/m}^2$  (بار مرده  $= 7/30$  و بار زنده  $= 3/55 \text{ KN/m}^2$ ) تعیین گردید. ابعاد دال برابر با  $2000$  میلی‌متر طول  $\times$   $2000$  میلی‌متر عرض  $\times$   $150$  میلی‌متر ضخامت بود و به صورت یکپارچه با یک ستون با مقطع عرضی مربعی به ضلع  $200$  میلی‌متر که به اندازه  $200$  میلی‌متر از بالا و پایین دال ادامه داشت، ساخته شده بود. نمایی از نمونه آزمایشگاهی و جزئیات آرماتورگذاری آن در شکل (۳-۱۵) نمایش داده شده است. لایه آرماتور کششی (نزدیک به سطح پایینی دال) از میلگرد سایز  $15M$  به فواصل  $125$  میلی‌متر در هر دو جهت تشکیل شده بود. پایه ستون در جهت طولی با تعداد  $4$  میلگرد سایز  $15M$  در چهار گوشه و با آرماتورهای عرضی از فولاد نرمه با قطر  $8$  میلی‌متر به فواصل  $75$  میلی‌متر مسلح شد.





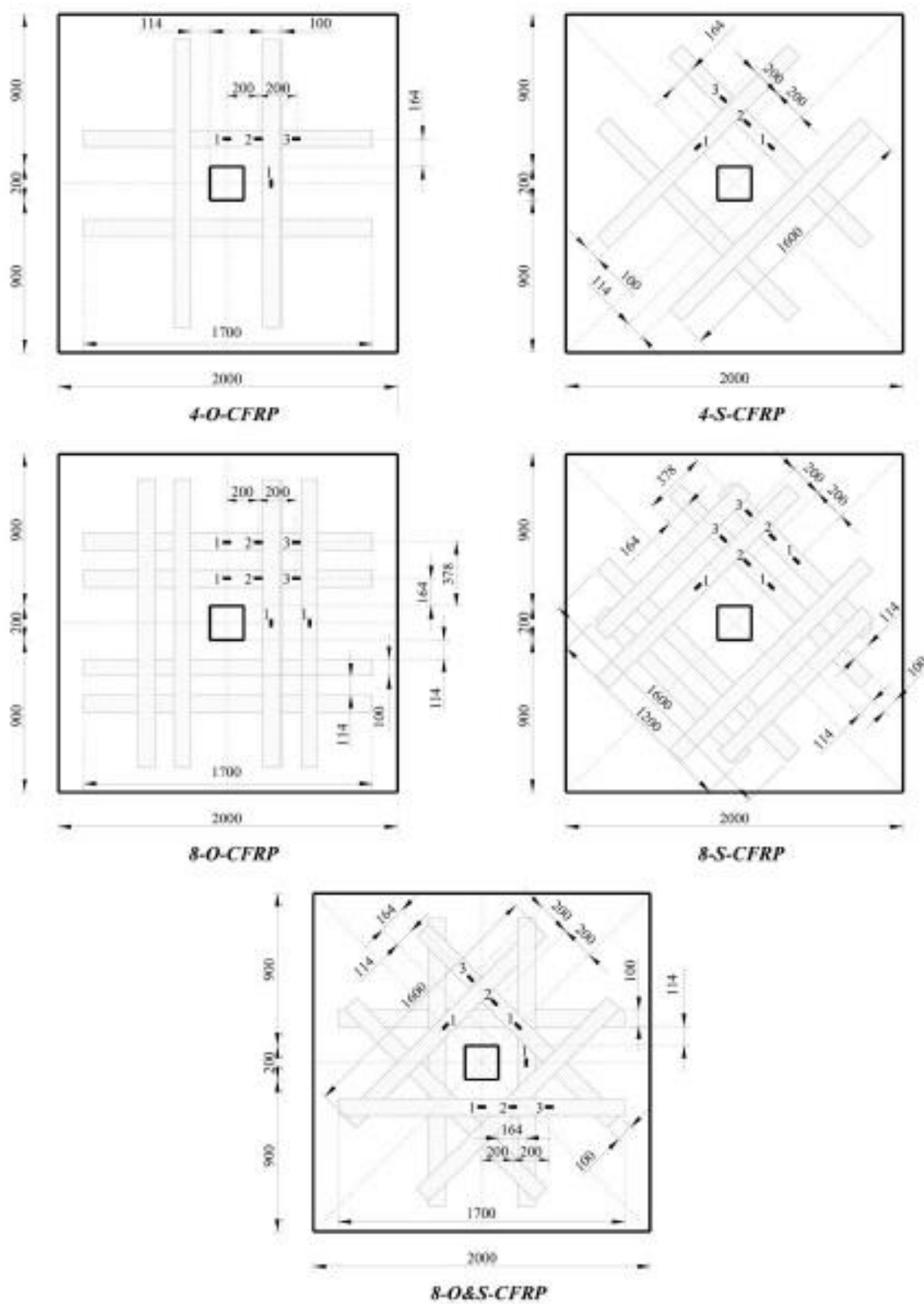
شکل (۳-۱۵) نمونه تیپ آزمایش و جزئیات آرماتورگذاری

از شش نمونه مذکور یکی به صورت تقویت نشده به عنوان نمونه کنترلی باقی ماند. پنج نمونه دیگر به صورت خارجی با استفاده از نوارهای CFRP چسبیده به وجه کششی دال با پیکربندی‌های مختلف تقویت شدند. جزئیات طراحی نمونه‌ها و CFRP‌های مسلح کننده در جدول (۳-۵) ارائه شده است. نمایی شماتیک از پنج نمونه تقویت شده با CFRP در شکل (۳-۱۶) نمایش داده شده است. تمامی نوارهای CFRP تا لبه داخلی تکیه گاه‌ها ادامه پیدا کردند، تا طول مهاری کافی برای نوارهای CFRP را تامین نمایند. یک تکه کوچک از نوار CFRP به صورت عرضی در انتهای نوارهای CFRP اصلی قرار گرفت، تا از جداسدگی بین نوارهای CFRP اصلی و سطح بتن جلوگیری کند.

جدول (۳-۵)، معرفی نمونه‌ها و تشریح الگوهای CFRP

Specimen designation	Number and scheme of CFRP strips	Description of CFRP strengthening configuration (see Fig. 2)
Control		
4-O-CFRP	4-Orthogonal strips	One line of CFRP strip offset from each column face by the slab effective depth ( $d$ ). Each CFRP strip is 1.70 m long.
4-S-CFRP	4-Skewed strips	One line of CFRP strip offset from each column corner by the slab effective depth ( $d$ ). Each CFRP strip is 1.60 m long.
8-O-CFRP	8-Orthogonal strips	Two lines of CFRP strips bonded orthogonally around the column faces with the offsets equal to the slab effective depth ( $d$ ).
8-S-CFRP	8-Skewed strips	Two lines of CFRP strips bonded diagonally around the column corners. The strips are offset from the column corners by the slab effective depth.
8-O&S-CFRP	8-Orthogonal and skewed strips	Two lines of orthogonal and skewed CFRP strips offset from each column face and corner, respectively, by the slab effective depth.

این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که در این آزمایش از نوارهای صلب جهت مقاوم‌سازی نمونه‌های تمام مقیاس استفاده شده است. در حالی که در تحقیقات گذشته تاثیر مقاوم‌سازی نمونه‌های کوچک مقیاس با صفحات انعطاف‌پذیر (هراجلی و سودکی (۲۰۰۳)) و یا نوارهای صلب (ونزول و سودکی (۲۰۰۳)) مورد آزمایش قرار گرفته بود. مقدار و پیکربندی نوارهای CFRP در این آزمایش برای فراهم‌آوری یک افزایش منطقی در عملکرد نهایی و سرویس اتصال انتخاب شدند. اندازه نوارها بر مبنای موجودیت تجاری انتخاب شدند. نوارهای متعامد در این آزمایش بدین منظور مورد استفاده قرار گرفتند تا با جهت آرماتورهای داخلی منطبق باشند و نوارهای مورب بدین منظور مورد استفاده قرار گرفتند زیرا تصور می‌شد که چنین طرحی منجر به پاسخ شکل‌پذیرتری قبل از گسیختگی می‌شود.



شکل (۱۶-۳) نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با CFRP

## • مشخصات مصالح

شش نمونه با دو گروه بتن ساخته شدند، سه نمونه در هر گروه. میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه برای گروه ۱ و ۲ به ترتیب ۲۵ و ۲۸ MPa بود. آرماتورهای فولادی کششی و فشاری به ترتیب از میلگرد آجدار نمره ۱۵ و ۱۰M با مقاومت تسلیم ۴۱۰ MPa بودند. CFRP های مسلح کننده مورد استفاده در مقاوم سازی از نوع CFRP نواری تک محوری Sika CarboDur S1012 بود. خمیر چسبیده مورد استفاده برای پیوستگی نوارهای Sika CarboDur S1012 به بتن، Sikadur 30 بود، که یک محصول دو مولفه‌ای (A و B) با مقاومت و ضریب الاستیسیته بالا می‌باشد. مشخصات مکانیکی Sika CarboDur و Sikadur 30 که توسط کارخانه سازنده گزارش شده است، در جدول (۳-۶) خلاصه شده است.

جدول (۳-۶)، مشخصات نوارهای CFRP و چسب

(a) CFRP strips (Sika CarboDur S1012)	
Width	100 mm
Thickness	1.2 mm
Modulus of elasticity	165 Gpa
Tensile strength	2,800 Mpa
Elongation at break	1.7%
Apparent density	1.5 g/cm <sup>3</sup>
(b) Adhesive paste (Sikadur 30)	
Density	2 kg/L
Tensile strength (at 7 days)	24.8 MPa
Elongation at break (at 7 days)	1%
Modulus of elasticity (at 7 days)	4.5 GPa
Shear strength (at 14 days)	24.8 MPa
Bond strength to concrete (2 days)	22 MPa

## • اجرای آزمایش و تجهیزات

نمونه‌ها تحت بارگذاری مرکزی یکنواخت قرار گرفتند تا گسیخته شوند. بارگذاری از طریق پایه ستون فوقانی توسط یک دستگاه محرک هیدرولیکی قابل کنترل با حداکثر ظرفیت ۵۳۰ KN (۱۲۰ Kips) و حداکثر حرکت (جابجایی) ۱۵۰ mm به نمونه وارد می‌شد. بارگذاری آزمایش تحت کنترل تغییر مکان

هدایت می‌شد تا از گسیختگی پانچ ناگهانی و کنترل نشده، در هنگامی که بارگذاری حداکثر می‌آید، جلوگیری شود. نرخ تغییر مکان در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۴۰ mm/min قرار داشت. وزن خود دال اندک بوده و در اندازه‌گیری بار قائم اعمالی اصلاح نشد.

خیز قائم نمونه در ۴ موقعیت مختلف با استفاده از مبدل‌های متغیر خطی تغییرمکان (LVDT) با حرکت ۲۵ mm اندازه‌گیری می‌شد. یکی از LVDT ها در زیر مرکز پایه ستون پایینی قرار داده شد تا خیز مرکزی نمونه را اندازه‌گیری کند. سه LVDT دیگر روی یک قاب فلزی تکیه‌گاهی صلب که روی سطح فوقانی دال قرار داشت، همان‌طور که در شکل (۳-۱۵) نمایش داده شده است، نصب شدند. دو LVDT در راستای خطوط مرکزی قطری قرار گرفتند تا خیز در ۴۲۵ میلی‌متری از مرکز دال که برابر با نصف فاصله بین مرکز دال و لبه داخلی تکیه‌گاه‌ها بود را اندازه‌گیری کنند. LVDT سوم روی خط قطری در ۶۰۰ میلی‌متری از مرکز دال قرار گرفت.

همان‌طور که در شکل (۳-۱۵) نمایش داده شده است، ۱۲ کرنش‌سنج در موقعیت‌های مختلف روی آرماتورهای فلزی در هر نمونه نصب شدند. بر مبنای تعداد و پیکربندی نوارهای CFRP چسبیده به رویه کششی دال، چهار یا هشت کرنش‌سنج روی نوارهای CFRP نصب شدند، همان‌طور که در شکل (۳-۱۶) نمایش داده شده است. موقعیت کرنش‌سنج‌ها جهت اندازه‌گیری حداکثر کرنش‌ها و برای ترسیم توزیع کرنش در آرماتورهای فلزی و نوارهای CFRP انتخاب شدند. قرائت از سلول بارگذاری، LVDT ها و کرنش‌سنج‌ها به وسیله سیستم نگهدارنده اطلاعات SCXI ثبت گردید. هنگامی که ستون به میان دال پانچ کرد، آزمایش متوقف شد.

## نتایج آزمایش

### • پاسخ بار - تغییرمکان

برای مقایسه رفتار نمونه‌های با مقاومت فشاری متفاوت، بار اندازه‌گیری شده هر نمونه به مقاومت فشاری بتن نمونه کنترلی (۲۸ MPa) نرمال‌سازی گردید. بار نرمال‌سازی شده با ضرب کردن بار اندازه‌گیری شده در  $\left(\frac{28}{f_c'}\right)^{\frac{1}{2}}$  به دست آمد. وزن خود دال کوچک بوده و در محاسبه بارهای قائم اعمالی صرف‌نظر گردید. خلاصه‌ای از نتایج آزمایش شامل بار نرمال‌سازی شده، خیز و سختی ظاهری برای تمامی نمونه‌ها در جدول (۷-۳) ارائه شده است. سختی به عنوان شیب نمودار بار - تغییرمکان محاسبه گردید.

جدول (۷-۳)، خلاصه‌ای از نتایج آزمایش

Specimen	Concrete strength $f_c'$ (MPa) <sup>a</sup>	Experimental load			Normalized load			Deflection			Precracking stiffness $E_{uncracked}$ (GPa) <sup>c</sup>	Postcracking stiffness $E_{cracked}$ (GPa) <sup>c</sup>
		$P_{cr}$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$P_{cr}$ (kN) <sup>b</sup>	$P_y$ (kN) <sup>b</sup>	$P_u$ (kN) <sup>b</sup>	$\delta_{cr}$ (mm)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_u$ (mm)		
Control	28	44	231	421	44	231	421	0.80	8.00	16.40	55.00	24.30
4-O-CFRP	25	55	323	420	58	342	445	0.84	8.33	11.45	69.05	35.47
4-S-CFRP	28	54	312	451	54	312	451	1.00	8.79	13.50	54.00	31.32
8-O-CFRP	25	57	343	456	60	363	483	0.86	8.20	11.50	69.77	38.82
8-S-CFRP	25	52	323	462	55	342	489	1.20	8.75	13.60	45.83	34.16
8-O&S-CFRP	28	64	310	477	64	310	477	1.12	7.38	11.95	57.14	37.92

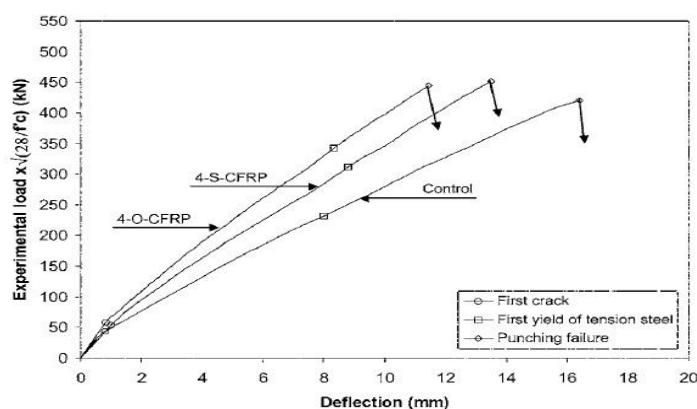
<sup>a</sup> $f_c'$  = concrete compressive strength at 28 days.

<sup>b</sup>Normalized load = experimental load  $\times \sqrt{(28/f_c')}$ . Load normalization is commonly used to offset the effect of different concrete compressive strength.

<sup>c</sup>Precracking and postcracking stiffnesses are calculated as the slope of load-deflection plots.

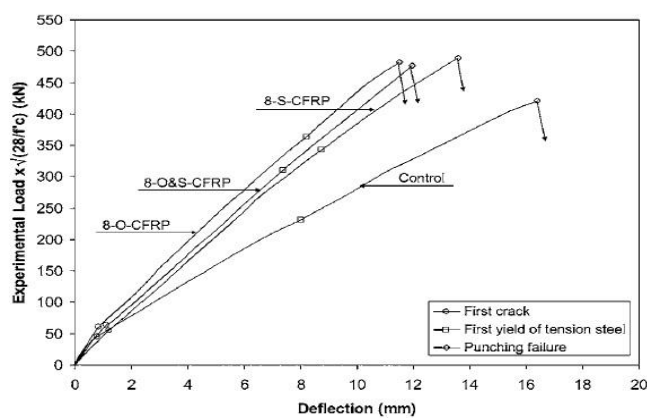
مقایسه‌ای از پاسخ بار - تغییرمکان تمامی شش نمونه آزمایش شده در شکل‌های (۱۷-۳) و (۱۸-۳) نمایش داده شده است. پاسخ بار - تغییرمکان، دو خطی بوده و می‌تواند به دو مرحله ترک‌نخورده و ترک‌خورده تقسیم گردد. مرحله ترک‌خورده می‌تواند به دو زیر مرحله تقسیم شود. مرحله پیش از تسلیم و مرحله پس از تسلیم. مرحله ترک‌خورده پیش از تسلیم از بار ترک خوردگی،  $P_{cr}$  تا بار تسلیم،  $P_y$  است. مرحله ترک‌خورده پس از تسلیم از بار تسلیم،  $P_y$  تا بار گسیختگی پانچ،  $P_u$ ، ادامه می‌یابد. تسلیم شدگی به تدریج با افزایش بار اعمالی از مرکز دال به سمت لبه‌ها گسترش یافت، که

باعث شکل‌گیری تعدادی خطوط تسلیم گردید. تراز بارگذاری که در آن آرماتورهای فلزی تسلیم می‌شوند، به مساحت CFRP و پیکربندی آن، که باعث باز توزیع بیشتر کرنش در فولاد به ناحیه ای دورتر از ناحیه ستونی شود، بستگی دارد. شکل‌گیری خطوط تسلیم تحت تاثیر نوارهای CFRP، که تمایل به جلوگیری از انتشار ترک دارند، قرار می‌گیرد. با افزایش بیشتر بار اعمالی ناحیه‌ای نزدیک به ستون وارد حالت پلاستیک شد و ستون از میان ضخامت دال پانچ نمود.



شکل (۱۷-۳) رفتار بار- تغییرمکان نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با چهار نوار CFRP

مرحله پس از نقطه پیک مستقیماً در انتهای مرحله ترک‌خورده، در بار گسیختگی پانچ،  $P_u$ ، همان‌طور که در شکل (۱۷-۳) و (۱۸-۳) نمایش داده شده است، شروع شد. به محض گسیختگی، ظرفیت باربری در تمامی نمونه‌ها شدیداً سقوط نمود. گسیختگی ناگهانی و ترد بود.



شکل (۱۸-۳) رفتار بار- تغییرمکان نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با هشت نوار CFRP

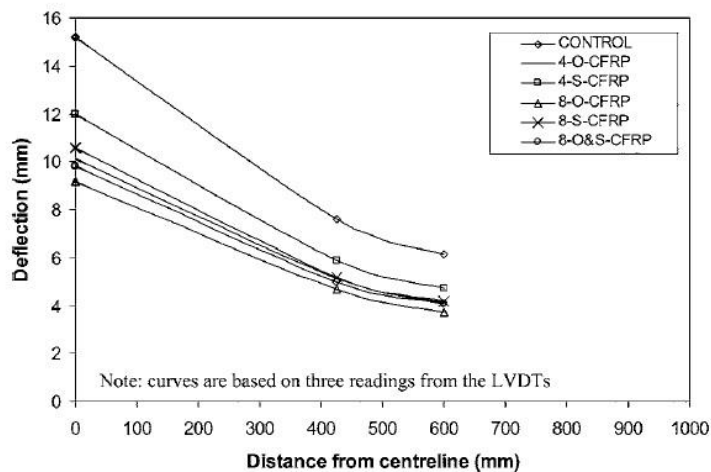
## • بار و خیز نهایی

نمونه کنترلی کمترین بار پانچ (421 KN) را تحمل کرد. تمامی نمونه‌های تقویت شده دارای بار نرمال شده بالاتری نسبت به نمونه کنترلی با نرخ افزایش بین 6 تا 16 درصد بودند. دو نمونه تقویت شده با چهار نوار، 4-O-CFRP و 4-S-CFRP، دارای افزایش تقریباً یکسانی در بار پانچ، به ترتیب 6 و 7 درصد بالاتر از نمونه کنترلی بودند. نمونه‌های تقویت شده با هشت نوار CFRP، افزایش بیشتری در بار پانچ، که در محدوده 13 تا 16 درصد بالاتر از نمونه کنترلی بود، از خود نشان دادند. با توجه به خیز نهایی، نمونه کنترلی دارای بالاترین مقدار خیز در بار نهایی متناظر بود. (به دلیل مشاهده اثر سخت‌کنندگی CFRP) مقدار خیز در بار نهایی نمونه‌های تقویت شده بین 70 تا 83 درصد مقدار خیز در نمونه کنترلی بود.

## • پروفیل خیز

خیز نمونه‌ها در 0، 425 و 600 میلی‌متری از مرکز دال با افزایش در بار اعمالی به طور پیوسته اندازه‌گیری شد. در هر تراز بارگذاری حداکثر مقدار خیز در مرکز دال بود و با افزایش فاصله از مرکز دال مقدار خیز کاهش می‌یافت. در شکل پروفیل خیز نمونه کنترلی و نمونه‌های تقویت شده در تراز بارگذاری 400 KN که به بار گسیختگی نمونه کنترلی، 421 KN، خیلی نزدیک می‌باشد، مقایسه شده است. نمونه کنترلی دارای حداکثر مقدار خیز در تمامی نواحی در میان نمونه‌های آزمایش شده بود. نمونه 4-S-CFRP دارای حداکثر میزان خیز در میان نمونه‌های تقویت شده، اما دارای خیز کمتری نسبت به نمونه کنترلی بود. نمونه 8-O-CFRP دارای حداقل پروفیل خیز در میان نمونه‌های تقویت شده بود.





شکل (۳-۱۹) پروفیل خیز در تراز بارگذاری 400 KN برای تمامی نمونه‌ها

#### • مشخصه‌های سختی

مقادیر سختی محاسبه شده برای نمونه‌های آزمایش، در جدول (۳-۷) ارائه شده است. برای تمامی نمونه‌ها مقادیر سختی در مرحله ترک‌نخورده ارائه شده است، که تقریباً دو برابر آن مقدار در مرحله پس از ترک می‌باشد. نمونه‌های تقویت شده سختی اولیه (ترک‌نخورده) بین ۸۳ تا ۱۲۷ درصد نمونه کنترلی، بسته به مساحت و پیکربندی نوارهای CFRP، از خود نشان دادند. روند مشخصی در تاثیر مقدار نوارهای CFRP روی سختی اولیه مشاهده نشد.

نمونه‌های تقویت شده با هشت نوار CFRP سختی کلی بالاتری نسبت به نمونه‌های تقویت شده با چهار نوار CFRP از خود نشان دادند. در صورتی که نوارهای CFRP دارای پیکربندی یکسان باشند، نمونه‌های تقویت شده با پیکربندی هشت‌وجهی بالاترین افزایش در سختی را از خود نشان دادند. افزایش سختی با مساحت CFRP‌های اضافه شده متناسب نبود.

## • الگوی ترک خوردگی و مدهای گسیختگی

آغاز ترک‌های خمشی در وجه کششی نمونه‌ها در مرحله ابتدایی اعمال بارگذاری شروع شد. ترک خوردگی ابتدا در ناحیه مرکزی دال به شکل ترک‌های خمشی ریز در جهت عمود بر آرماتورهای کششی ایجاد شد. با افزایش بارگذاری، ترک‌های متعامد بیشتری ایجاد شده و به سمت لبه‌های دال گسترش یافت. با افزایش بار، یک سری ترک‌های قطری از نزدیک گوشه‌های ستون شروع به شکل‌گیری نمود و به سمت لبه‌ها و گوشه‌های دال گسترش یافت. سرانجام ترک‌های قطری به یکدیگر متصل شده و دال در مد گسیختگی برش پانچ که ناگهانی و ترد است فرو ریخت. همچنین پس از گسیختگی، ترک‌های ریزی در پیرامون ستون در وجه فشاری دال مشاهده گردید.

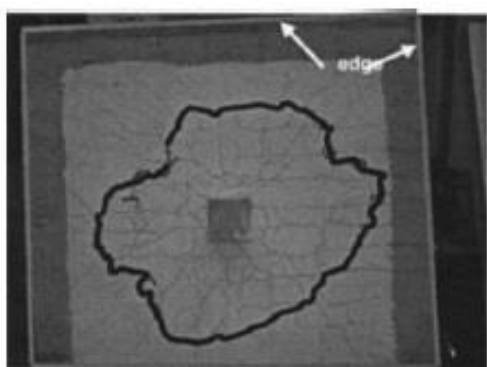
الگوی ترک خوردگی در وجه کششی نمونه‌ها پس از گسیختگی در شکل (۳-۲۰) نمایش داده شده است. در تمامی نمونه‌ها، مخروط گسیختگی برشی به طور میانگین در فاصله  $3/3$  تا  $3/9$  d از لبه ستون، که برابر با  $376$  تا  $445$  میلی متر از وجه ستون است، قرار داشت.

همان‌طور که در شکل (۳-۱۵) مشخص است، فاصله بین تکیه‌گاه تا وجه ستون برابر با  $800$  میلی‌متر می‌باشد. تمامی نمونه‌های تقویت شده دارای عرض ترک کمتری نسبت به نمونه کنترلی بودند. دلیل این امر تاثیر نوارهای CFRP در جلوگیری از انتشار ترک می‌باشد. مشاهده می‌شود باری که در آن برش پانچ رخ می‌دهد و شدت گسیختگی برش پانچ نمونه‌ها تحت تاثیر وجود CFRP‌های مسلح کننده قرار می‌گیرد. کنترل ترک در اثر نوارهای CFRP هنگامی بهینه خواهد بود که الیاف نوارهای CFRP در جهت عمود بر ترک‌ها باشند. اما در هر صورت شکل کلی ترک پانچ در نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با CFRP مشابه با نمونه کنترلی بود.

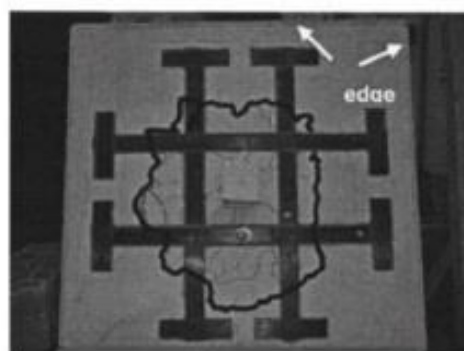
## • کرنش در فولاد

مقایسه‌ای از توزیع کرنش در فولاد در کرنش‌سنج‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در راستای محورهای متعامد برای تمامی نمونه‌ها در تراز بارگذاری  $400$  KN در شکل (۳-۲۱) نمایش داده شده است. رابطه کرنش فولاد

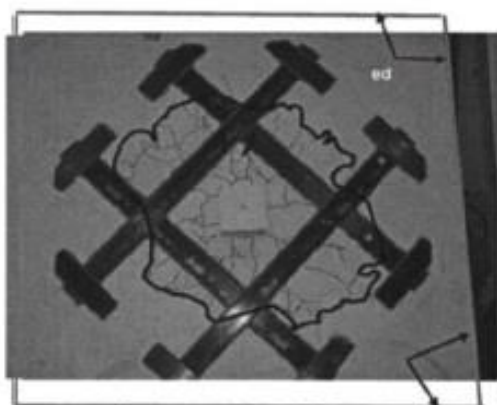
در برابر فاصله برای تمامی نمونه‌ها دارای یک پروفیل غیر خطی است. بالاترین مقادیر کرنش در فولاد در تمامی ترازهای بارگذاری و برای تمامی نمونه‌ها در کرنش‌سنج شماره ۱، که در وجه ستون قرار داشت، اندازه‌گیری شد. کرنش‌سنج‌های دورتر از پایه ستون، کرنش‌های کمتری را اندازه‌گیری کردند.



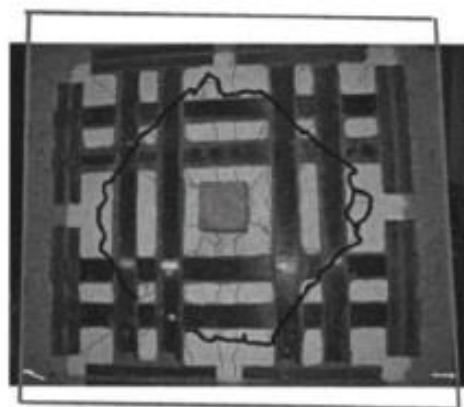
*Control specimen*



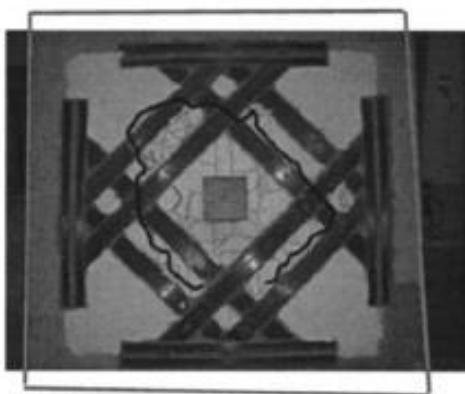
*Specimen 4-O-CFRP*



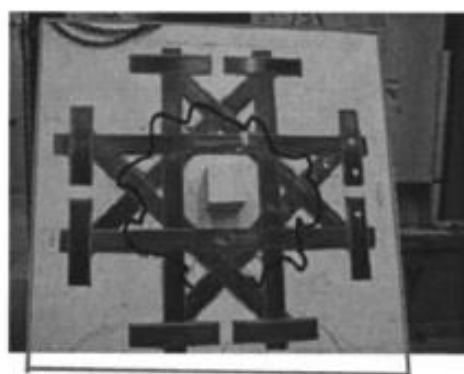
*Specimen 4-S-CFRP*



*Specimen 8-O-CFRP*



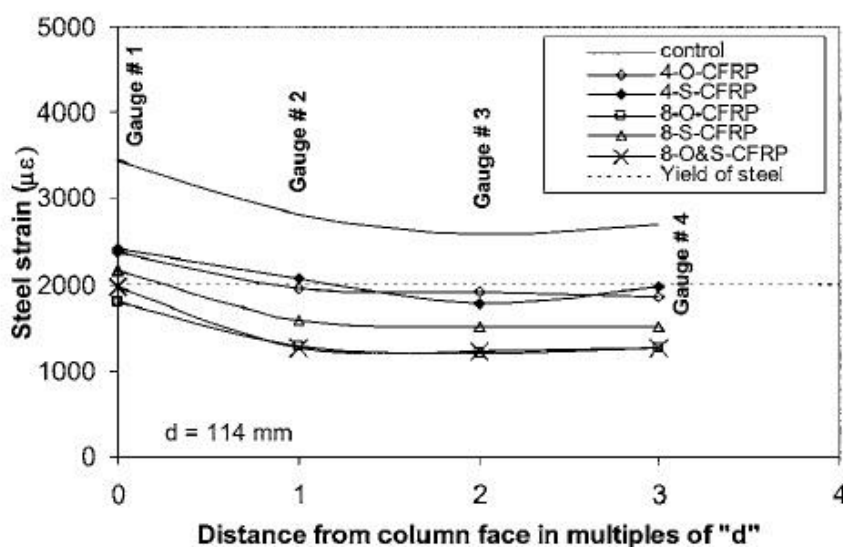
*Specimen 8-S-CFRP*



*Specimen 8-O&S-CFRP*

شکل (۳-۲۰) ترک‌های گسیختگی برش پانچ

تسلیم شدگی اولیه در آرماتورهای فولادی در وجه ستون رخ داد و سپس به تدریج از مرکز به سمت لبه‌های دال گسترش یافت. نمونه‌های تقویت شده با CFRP نسبت به نمونه کنترلی مقادیر کمتری از کرنش در فولاد را نمایش دادند. با افزایش مقادیر نوارهای CFRP، کرنش داخلی در فولاد کاهش یافته و آغاز گسیختگی پانچ به تاخیر افتاد. نمونه‌های تقویت شده با چهار نوار CFRP دارای مقادیر کرنش فولاد در حدود ۵۴ تا ۷۴ درصد این مقادیر کرنش در نمونه کنترلی بودند. در صورتی که کرنش فولاد در نمونه‌های تقویت شده با هشت نوار CFRP در حدود ۴۰ تا ۶۵ درصد کرنش فولاد در نمونه کنترلی بود.

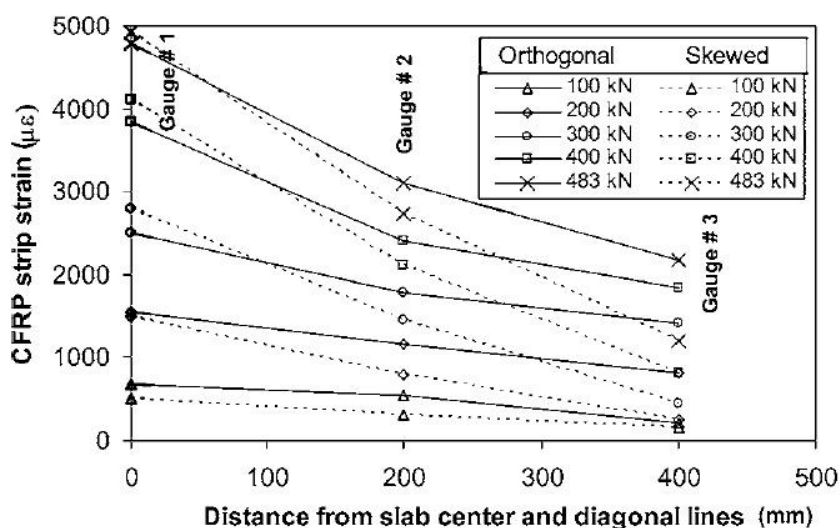


شکل (۳-۲۱) توزیع کرنش در آرماتورهای فولادی در راستای محورهای متعامد در تراز بارگذاری 400 KN

### • کرنش در FRP

نوارهای CFRP خارجی مقادیر کرنش در میلگردهای فولادی داخلی را کاهش دادند. زیرا نوارهای CFRP کرنش‌ها را از ناحیه مرکزی ستون به نواحی دورتر توزیع و تقسیم کرنش می‌کنند. پروفیل کرنش در CFRP در ترازهای مختلف بارگذاری برای نمونه 8-O&S-CFRP در شکل (۳-۲۲) نمایش داده شده است.

در تمامی مراحل بارگذاری، حداکثر کرنش‌ها توسط کرنش‌سنج‌های شماره ۱ در نوارهای متعامد و مورب اندازه‌گیری شد. زیرا آن‌ها در ناحیه دارای حداکثر تنش قرار داشتند. حداقل کرنش توسط کرنش‌سنج‌های شماره ۳ اندازه‌گیری شد. زیرا آن‌ها دورتر از ناحیه دارای حداکثر تنش قرار داشتند (در ۴۰۰ میلی متری از تار مرکزی و خط قطری). حداکثر کرنش‌های ایجاد شده در نوارهای CFRP متعامد و مورب به ترتیب برابر با ۴۷۸۴ و ۴۹۳۲  $\mu\epsilon$  اندازه‌گیری شد. این مقدار برابر با حدود ۲۸ و ۲۹ درصد کرنش کششی نهایی (گسیختگی) نوارهای CFRP می‌باشد. این مقدار کرنش مشابه با مقادیر گزارش شده توسط تان (۲۰۰۰) و چن و لی (۲۰۰۰) می‌باشد. گرادیان (شیب) کرنش در نوارهای CFRP حدود  $11 \frac{\mu\epsilon}{mm}$  بود، که بسیار کمتر از کرنش لازم جهت بروز پدیده پوست‌کن شدن، در کرنش  $88 \frac{\mu\epsilon}{mm}$  (ارائه شده توسط میلر و نانی (۲۰۰۰))، می‌باشد. بنابراین در اجرای این مقاوم‌سازی، پوست‌کن شدن نوارها باعث نگرانی نخواهد بود. مورد اخیر همچنین توسط اوسپینا (۲۰۰۰) و همکاران نیز مشاهده شده است.



شکل (۳-۲۲) پروفیل کرنش در نوارهای متعامد و مورب نمونه 8-O&S-CFRP



## **فصل ۴:**

**آشنایی با نرم افزار آباکوس و کالیبره کردن**

**نمونه‌های آزمایشگاهی**

#### ۴-۱- مقدمه

پس از مطالعه برنامه‌های آزمایشگاهی و بررسی نتایج آن‌ها، در این فصل مطالعات تحلیلی روی نمونه‌ها انجام می‌گیرد. در ابتدا لازم است مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از مدل‌های تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی صورت گیرد، سپس در صورت نزدیک بودن نتایج تحلیل و آزمایش به یکدیگر، می‌توان مدل‌ها را توسعه داده تا با دید جامع‌تری در مورد ظرفیت برش پانچ و مقاوم‌سازی دال‌ها قضاوت نماییم. برای انجام مطالعات تحلیلی در این پایان‌نامه از نرم‌افزار تحلیل المان محدود Abaqus که توانایی تحلیل غیر خطی سازه‌ها را دارا می‌باشد، استفاده شده است. مدل‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه در این برنامه به دلیل ماهیت رفتاری بتن و عوامل زیادی که بر آن تاثیرگذار می‌باشد، دقت و تبحر خاصی می‌طلبد و بایستی از صحت مدل‌سازی عضو بتنی در برنامه اطمینان حاصل نمود. لذا اطمینان از صحت مدل‌سازی و یا کالیبراسیون مدل اولین قدم در راه توسعه یک مدل واقع بینانه است. با مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی با نتایج واقعی و سعی در تطبیق آن‌ها، تاثیر عوامل مختلف بر دقت جواب‌ها و پارامترهای کلیدی که در روند رسیدن به حل صحیح تاثیر بیشتری دارند مشخص می‌شوند. در این فصل ابتدا به معرفی نرم‌افزار Abaqus پرداخته خواهد شد، سپس روال طی شده جهت کالیبراسیون مدل تحلیلی با استفاده از نتایج نمونه آزمایشگاهی ارائه شده در فصل سوم بیان می‌گردد.

#### ۴-۲- تاریخچه روش اجزاء محدود

اگر روش اجزاء محدود را محور اصلی روش‌های عددی به حساب آوریم، گرایش به کاربرد وسیع‌تر



روش‌های عددی را می‌توان در حوالی سال‌های جنگ جهانی دوم، مشاهده نمود. هرنیکوف<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۴ میلادی روش عددی را در تحلیل الاستیسیته قطعات در دستگاه‌های فضاوردی به کار گرفت. کوانت<sup>۲</sup> در سال ۱۹۴۳ موفق گردید با استفاده از توابع چند جمله‌ای ساده تغییر شکل‌های ناشی از پیچش در محیط پیوسته را به کمک تقسیم سطح محیط تحت پیچش به اجزاء مثلث شکل، به صورت عددی تحلیل نماید. برای اولین بار در سال ۱۹۶۰ نام «روش اجزاء محدود» بوسیله کلاف<sup>۳</sup> ارائه گردید. از این زمان به بعد کاربرد و توسعه روش‌های عددی به طرز بسیار وسیع و چشمگیری در تحلیل مسائل مختلف علمی و صنعتی مانند مکانیک سیالات، انتقال گرما و حرارت، تحلیل تنش و تغییر شکل نسبی در محیط‌های پیوسته، تحلیل میدان‌های الکترونیکی و الکترومغناطیسی و غیره متداول گشت. توسعه و تغییر این روش‌های عددی به وسیله زین کیویچ<sup>۴</sup> (۱۹۶۷) و اودن<sup>۵</sup> (۱۹۷۰) صورت پذیرفت. امروزه با کاربرد روش‌های عددی روند تغییر عوامل فیزیکی را به کمک روابط ریاضی، با هر درجه نامعینی و با هر پیچیدگی می‌توان به سادگی پیش‌بینی نموده و بسیاری از نیازهای انسان را با استفاده از روش‌های عددی در قالب حساب، به صورت حالت‌های محتمل در آینده پیش‌بینی نمود. به این ترتیب شروع فعالیت‌های جدی در کاربرد و توسعه روش‌های عددی را به طور موثر می‌توان در بیست سال اخیر دانست. گفتنی است که در طی این بیست سال تحقیقات در علوم و صنایع به دو بخش تجربی و بخش تحلیل عددی تقسیم گردیده است. یعنی شاخه دوم که در کنار کارهای تجربی جای می‌گیرد، به اتکای اطلاعات بدست آمده در چارچوب تئوری قادر خواهد بود پیش‌بینی‌های وسیع و تعمیم یافته را انجام داده و نتایج مطلوب را ارائه نماید.

---

<sup>۱</sup> Hrenikoff

<sup>۲</sup> Couant

<sup>۳</sup> Clough

<sup>۴</sup> Zienkiewic

<sup>۵</sup> Oden

استفاده از یک نظریه به صورت یک قالب ریاضی مطلوب و تبدیل آن از روابط پیچیده به روابط ساده و اجرای نهائی محاسبات توسط رایانه، نقش اساسی در تحلیل به کمک روش‌های عددی را دارا می‌باشند. بنیاد روش اجزاء محدود از مفاهیمی ساده بهره می‌گیرد، که می‌توان آن را در قالب دو رکن مورد بررسی قرار داد:

رکن اول آن است که هر سازه به تعدادی اجزاء کوچک تقسیم می‌گردد، که بیشترین اهمیت به مقدار تغییر شکل‌ها داده شده است. به گونه‌ای که کوچکی این مقادیر خطر وجود خطاها را تا حد بسیار زیادی از بین می‌برد. به این ترتیب حل مسئله، منجر به بدست آوردن تعدادی اعداد که شامل تغییرات مربوط به هر پهنه جزء است خواهد گردید. این نحوه تغییر شکل تقریبی می‌تواند به صورت هر تابع دلخواه نظیر چند جمله‌ای‌های ساده و یا حتی مثلثاتی و غیره معرفی گردد.

رکن دوم آن است که آثار ذکر شده با انتگرال‌گیری جمع‌پذیری داشته باشند. یا به عبارتی اطلاعات اجزاء محدود روی هم گذارده شود تا تغییر شکل‌ها و نیروهای حاصله در مجموع، هم نوع بودن خود را در

داخل و خارج حل تلاقی اجزاء حفظ نمایند. در این صورت با ارضاء شرایط مرزی، رسیدن به پاسخ صحیح امکان‌پذیر خواهد بود. در مهندسی بسیاری از مسائل وجود دارند که از روش تحلیلی قابل حل نبوده ولی با استفاده از روش‌های عددی از جمله روش اجزای محدود حل آن‌ها قابل دستیابی است. حل روش اجزاء محدود در این پایان‌نامه با استفاده از برنامه ABAQUS 6.13 انجام شده است که در آن امکانات مناسبی جهت مدل‌سازی اتصالات دال - ستون فراهم آمده است.

#### ۴-۳- تاریخچه برنامه ABAQUS

در ابتدا برنامه المان محدود ABAQUS برای کاربرد در مسایل انرژی هسته‌ای و مهندسی حفاری که بسیار پیچیده و غیرخطی هستند، طراحی شده بود. این برنامه براساس مسائل غیرخطی بنا شده و تئوری مورد استفاده در آن بر مبنای تحلیل غیرخطی المان محدود با جدیدترین روابط و روش‌های

ریاضیات که در راهنمای نرم افزار موجود است بنا شده است. به همین دلیل این برنامه توانایی بسیار بالایی برای شبیه‌سازی واقعیت دارد، به عبارت دیگر این برنامه توانایی در نظر گرفتن ظریف‌ترین اثرات را در مسائل بسیار پیچیده دارد.

ایده اصلی نرم افزار در رساله دکترای آقای دیوید هیبیت<sup>۱</sup> در سال ۱۹۷۲ میلادی، تحت عنوان «مکانیک محاسباتی بر پایه روش اجزای محدود» در دانشگاه براون<sup>۲</sup> ارائه شد. در سال ۱۹۷۸ هیبیت به همراه دو همکار خود کارلسون و سورنسون<sup>۳</sup> شرکت HKS را تأسیس کرد و آن‌ها در همان سال اولین ویرایش ABAQUS را منتشر ساختند. نام این بسته المان محدود از کلمه لاتین ABACUS به معنای چرتکه استخراج شده، ولی تلفظ رایج‌تر آن با نام آباکوس می‌باشد. در سال ۱۹۹۱ شرکت HKS تحلیل‌گر ABAQUS/Explicit را هم به مجموعه نرم‌افزار اضافه کرد و نرم افزار اصلی خود را منتشر ساخت. سرانجام در سال ۱۹۹۹ اولین نسخه گرافیکی، تحت عنوان ABAQUS/CAE به بازار عرضه شد. اولین نسخه گرافیکی ABAQUS نسخه ۶،۳ بود که شامل ۹ ماژول برای مدل سازی، حل و استخراج نتایج بود [18].

مزیت‌های نرم افزار آباکوس نسبت به سایر نرم افزارهای المان محدود:

- سهولت در استفاده و یادگیری سریع به علت داشتن محیط گرافیکی جذاب و تقسیم بندی روند مدل سازی و تحلیل به صورت ماژول‌های جداگانه (ایجاد قطعات، مونتاژ، تعیین تماس، تعریف شرایط مرزی، نیرویی و غیره...) در مقایسه با نرم افزارهایی مانند ANSYS.
- داشتن Help بسیار کامل که در آن در بخش‌های جداگانه تئوری و نحوه اجرای دستورات در محیط گرافیکی و همچنین مثال‌های متنوع ارائه شده است.

---

<sup>۱</sup> David Habitt

<sup>۲</sup> Brown

<sup>۳</sup> Karlsson & Sorenson

- تحلیل دقیق، نتایج معتبر و همچنین سرعت حل بیشتر در مقایسه با نرم‌افزارهایی مانند ANSYS.

- داشتن دو حل گر Standard & Explicit

Abaqus/standard : قابلیت حل گستره وسیعی از مسایل خطی و غیرخطی شامل مسایل استاتیکی، دینامیکی، انتقال حرارت و غیره را دارد. این محصول دستگاه معادلات را در هر بازه زمانی (Increment) قابل تغییر، بصورت Implicit حل می‌کند.

Abaqus/Explicit: برای حل مسایل ویژه از قبیل مسایل دینامیکی گذرا مانند برخورد، انفجار، مچالگی، شکل‌دهی و مسایل شبه استاتیکی مناسب است. این محصول دستگاه معادلات را در هر بازه زمانی (Increment) که به صورت خودکار بر اساس شرایط پایداری انتخاب شده، بصورت Explicit حل می‌کند.

Abaqus/CAE : یک رابط گرافیکی است که می‌تواند به سرعت مدل هندسی را ساخته یا از نرم‌افزار مدل‌سازی دیگر، وارد کند. با استفاده از این قسمت می‌توان مدل هندسی قطعه را گسسته سازی کرد و خواص مواد آن را تعیین و شرایط مرزی و بار اعمالی را مشخص کرد.

### ۴-۳-۱ - قابلیت‌های نرم افزار ABAQUS

به طور کلی می‌توان گفت نرم‌افزار ABAQUS دارای قابلیت‌های زیر می‌باشد:

توانایی بالا در حل دقیق مسائل دینامیکی غیرخطی و غیرخطی گذرا که بیشتر تحلیل‌های عددی این نوع مسائل به کمک این نرم افزار انجام می‌شوند.

دارا بودن مدل‌های رفتاری پیشرفته و گوناگون به همراه امکان تعریف خسارت در مواد مانند فلزات، کامپوزیت‌ها، لاستیک، فوم، مواد ویسکوالاستیک، مواد پیزوالکتریک، بتن، خاک، پلیمرها، سیالات و...

محدوده وسیعی از انواع المان‌ها از قبیل المان‌های یک، دو و سه بعدی، المان تیر، المان غشایی<sup>۱</sup> و المان پوسته<sup>۲</sup> را شامل می‌شود.

توانایی قاعده‌سازی و فرمول‌بندی برای تغییر مکان‌ها، چرخش‌ها و کرنش‌های بزرگ را دارد. قابلیت مدل‌سازی شکست.

تعیین نتایج خروجی برحسب نیاز کاربر از قبیل: تنش، کرنش، تغییر مکان، شتاب، نیروها و عکس‌العمل‌ها، سطح شکست، انرژی و..

قابلیت تعریف انواع برهم‌کنش‌ها از قبیل تماس صفحه<sup>۳</sup> و تماس گوناگون یک قطعه (خودتماسی<sup>۴</sup>). افزایش خودکار زمان در خلال انتگرال ضمنی زمانی<sup>۵</sup> برای تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی.

انتقال فایل و ارتباط با سایر نرم‌افزارها مانند CATIA, SolidWorks و Pro/ENGINEER.

امکان استفاده از Keywords برنامه که قابلیت‌ها و امکانات بیشتری را در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

امکان استفاده از زیر روال<sup>۶</sup> برای اضافه کردن یک قابلیت جدید به نرم‌افزار مانند ایجاد مدل رفتاری یک ماده جدید.

امکان استفاده از زبان برنامه نویسی پایتون برای کاربردهای پیشرفته، مانند مطالعه پارامتری.

با توجه به مزایا و قابلیت‌های ذکر شده، برنامه ABAQUS جهت مدل‌سازی و آنالیز نمونه‌ها انتخاب گردید.

---

<sup>۱</sup> Membrane

<sup>۲</sup> Shell

<sup>۳</sup> Surface to Surface

<sup>۴</sup> Self-Contacting

<sup>۵</sup> Implicit time

<sup>۶</sup> Subroutine

## ۴-۴- شبیه‌سازی رفتار فشاری و کششی بتن

در ABAQUS دو روش ترک پخشی<sup>۱</sup> و خسارت پلاستیسیته<sup>۲</sup> جهت مدل‌سازی رفتار بتن وجود دارد. روش اول معمولاً برای سازه‌های ساده تحت بار یکنواخت استفاده می‌شود. روش ترک پخشی بر مبنای فرمولاسیون خسارت پلاستیسیته می‌باشد که شامل نمایان ساختن و منتشر کردن ترک‌های بسیار ریز می‌باشد. در روش ترک پخشی، براساس اندازه شبکه‌بندی، ممکن است در همگرایی حل، مشکل ایجاد شود. روش خسارت پلاستیسیته دارای حساسیت کمتری به تغییرات شبکه‌بندی بوده و بیشتر در سازه‌ها، تحت بارهای سیکلی و دینامیکی استفاده می‌شود. در اینجا جهت مدل‌سازی دال‌ها از روش خسارت پلاستیسیته استفاده شده است.

### ۴-۴-۱- اصول فرمول‌بندی خسارت پلاستیسیته بتن

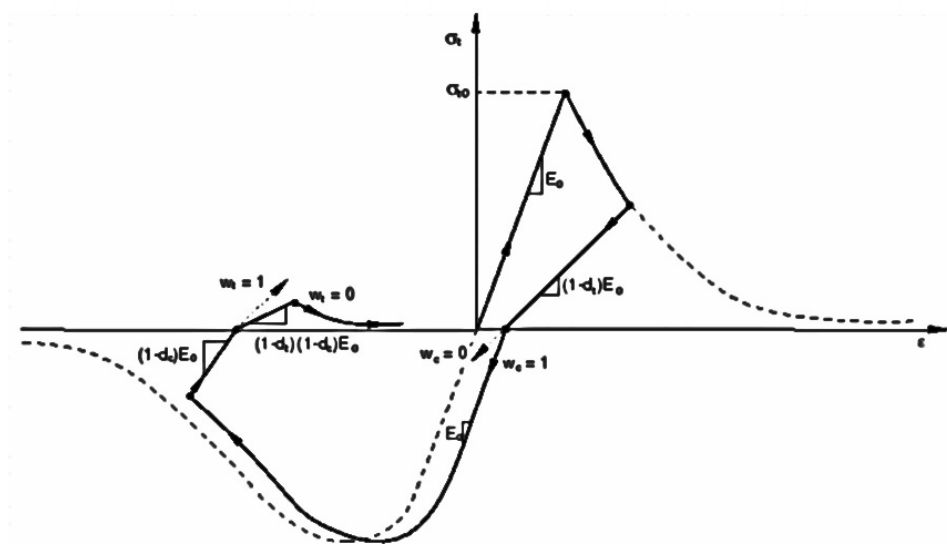
از مدل آسیب‌دیدگی پلاستیک برای شبیه‌سازی رفتار بتن استفاده می‌شود. در این مدل فرض می‌شود که خردشدگی فشاری بتن و ترک خوردگی آن مکانیزم‌های اصلی شکست می‌باشند. هر دوی این پدیده‌ها ناشی از شروع و گسترش ترک‌ها می‌باشند. بیشترین تفاوت میان خسارت پلاستیسیته و ترک پخشی، توانایی اختصاص تخریب فشاری و کششی می‌باشد. هنگامی که المان پلاستیک می‌شود، روش خسارت پلاستیسیته باعث کاهش سختی الاستیک شده، از این رو المان نمی‌تواند به مقاومت اولیه‌اش برگردد، که این امر به ویژه در بارگذاری سیکلی بسیار مهم است. محدوده تنزل و از هم پاشیدگی توسط کاربر تعریف می‌شود. قضیه خسارت پلاستیسیته توسط شکل (۴-۱) توضیح داده می‌شود، که در آن سختی رفتار بتن را تحت بارهای سیکلی نمایش می‌دهد. در کشش ترک باعث

---

<sup>۱</sup> Smeard Crack

<sup>۲</sup> Damage Plasticity

خسارت بخشی از ماده شده که می‌تواند با پارامتر  $d_t$  تعریف شود هنگامی که المان باربرداری می‌شود مدول الاستیسیته به  $E_0(1-d_t)$  تغییر می‌کند.



شکل (۱-۴) رفتار المان بتن تحت بار سیکلی [19]

اگر المان تحت کشش مجدداً تحت فشار قرار گیرد، رفتار الاستیک با پارامتر  $W_c$  تعریف می‌شود و مدول الاستیسیته در فشار بصورت  $E_0(-d_t + W_c \times d_t)$  تعریف می‌شود. چنانچه ترک‌ها تحت تاثیر سختی فشاری قرار نداشته باشند، فرض می‌شود مقدار پارامتر  $W_c$  برابر یک باشد. هنگامی که مقدار پارامتر  $W_c$  برابر صفر می‌شود (تخریب کامل)، سختی فشاری برابر سختی کشش می‌شود. به همین روش خسارت در فشار را می‌توان شرح داد. خردشدگی اولیه مقطع در فشار با پارامتر  $d_c$  و خواص اولیه در کشش با پارامتر  $W_t$  تعریف می‌شود. رفتار خسارت ایزوتروپیک است. پارامترهای خسارت پلاستیسیته در برنامه ABAQUS عبارتند از:

۱- پلاستیسیته

۲- رفتار فشاری

۳- رفتار کششی

## • پارامترهای پلاستیسیته

پنج پارامتر مورد نیاز جهت حل تابع پلاستیک دراگر - پراگر و تابع تسلیم شامل: زاویه انبساط برشی  $\Psi$  خروج از مرکزیت، نسبت مقاومت فشاری یکسان دو محوری به مقاومت فشاری تک محوری، پارامتر لزجت و پارامتر  $K_c$  باید تعریف شود. جهت به دست آوردن مقادیر دقیق این پارامترها، باید آزمایش‌های گوناگونی بر روی مصالح انجام شود. به علت فقدان اطلاعات کافی در آزمایش‌های تجربی مقالات مرجع، از پارامترهای پیش فرض در ABAQUS یا پیشنهاد شده در دیگر منابع استفاده شده است.

## • زاویه انبساط برشی $\Psi$

زاویه انبساط برشی، نسبت تغییرات حجم در کرنش برشی است. در فرمول دراگر - پراگر مقدار زاویه انبساط برای المان تحت فشار تک محوری تعیین می‌شود. البته لازم به ذکر است که پارامترهای پلاستیک استفاده شده در تعریف مصالح بتن، با تغییر کرنش‌های پلاستیک تغییر می‌کنند، لیکن در این بررسی به علت محدودیت نرم‌افزار مورد استفاده جهت آنالیز عددی، مقدار آنها در تمام طول آنالیز ثابت فرض شده است که این خود باعث وجود اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و نتایج حاصل از اجزاء محدود می‌گردد.

## • رفتار فشاری

به علت اینکه مقاله‌های مرجع فاقد منحنی تنش - کرنش فشاری بتن بوده، لذا رابطه تنش - کرنش بتن با استفاده از رابطه ارائه شده توسط هاگنستاد<sup>۱</sup> (۱۹۵۱) به شرح زیر استفاده گردید [21].

---

<sup>۱</sup> Hognestad



$$f_c = f_c \left[ 2 \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right) - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0} \right)^2 \right] \quad 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_0$$

$$f_c = \left( \frac{0.15f'_c}{\varepsilon_0 - \varepsilon_{ct}} \right) \cdot (\varepsilon_c - \varepsilon_0) + f'_c \varepsilon_0 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035$$

$$\varepsilon_0 = 4700 \sqrt{f'_c} \text{ Mpa} \quad \varepsilon_0 = 1.8 \frac{f'_c}{\varepsilon_c}$$

که در آن  $f_c$  تنش در بتن و  $f'_c$  مقاومت ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای بتنی باشد.  $\varepsilon_0$  کرنش در نقطه تنش حداکثر و  $\varepsilon_{ct}$  کرنش نهایی بتن که برابر است با ۰/۰۰۳۵.

#### ۴-۵- کالیبره کردن نرم‌افزار

در این قسمت به بررسی و کالیبره کردن نرم‌افزار توسط دو نمونه کار آزمایشگاهی می‌پردازیم. کار آزمایشگاهی اول توسط بینسی و بایراک در سال ۲۰۰۳ بر روی مقاوم‌سازی اتصال دال-ستون با استفاده از FRP که نمونه کنترلی آن کالیبره گردیده و کار آزمایشگاهی دوم توسط شرف، سودکی، ون داسن در سال ۲۰۰۶ با چسباندن صفحات FRP به وجه کششی دال مقاوم‌سازی گردیده که نمونه تقویت با ۴ صفحه FRP در راستای آرماتورهای طولی کالیبره گردید. در اینجا به شرح مدلسازی و کالیبره کردن در نرم‌افزار ABAQUS می‌پردازیم.

در مدلسازی انجام شده موارد زیر قابل توجه است:

در مدل‌های عددی درجات آزادی سازه (نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی) بسیار محدود و تنها در گره‌ها تعریف شده است (تغییر شکل بقیه نقاط تابع المان شکل انجام می‌شود)، لذا مدل‌های عددی الزاماً سختی بیشتری نسبت به مدل آزمایشگاهی خواهند داشت.

برخی اطلاعات مربوط به رفتار مصالح به کار رفته در آنالیز عددی در متون مرجع مربوط به آزمایشات تجربی وجود نداشت، هرچند سعی گردید این اطلاعات لازم از منابع و مراجع دیگر به طور مناسبی تعیین گردد، لکن این موارد می‌تواند باعث اختلاف در نتایج شود.

در مدل‌سازی به روش معمول اجزا محدود، المان‌ها قادر به ترک خوردگی نمی‌باشند، هرچند که در مدل ترک پخشی و خسارت پلاستیسیته این اثرات تا حدودی لحاظ می‌گردند. که البته جهت کالیبراسیون تنظیمات دقیق‌تری در خسارت پلاستیسیته بتن انجام شده است.

#### ۴-۵-۱ - نمونه کنترلی کالیبره شده آزمایش بینرسی و بایراک

#### ۴-۵-۱-۱ - مشخصات هندسی و مصالح دال

نمونه دال آزمایشگاهی مذکور دارای ابعاد  $2133 \times 2133$  میلی‌متر در پلان و ۱۵۲ میلی‌متر ضخامت بود. که معرف یک دال تمام مقیاس که از نقاط عطف بریده شده بود، می‌باشد. نمونه دال در ۴ لبه خود روی غلطک‌های فولادی که بیانگر تکیه‌گاه ساده بود قرار داشت که به منظور آنکه مدل‌سازی هرچه دقیق‌تر و مشابه حالت واقعی باشد تکیه‌گاه تماسی زیر آزمایش مدل شده است. در این نمونه، ستون وجود نداشت و بارگذاری از طریق یک بلوک مربعی به ابعاد  $304 \times 304$  میلی‌متر به دال وارد می‌شد. این دال با آرماتورهای نمره ۶ آمریکایی به فواصل ۱۳۵ میلی‌متر در وجه تحتانی مسلح شده بود. مشخصات مصالح به کار رفته در نمونه آزمایشگاهی در جدول (۴-۱) خلاصه شده است.

جدول (۴-۱)، مشخصات نمونه دال آزمایشگاهی

Materials	Elastic modulus (MPa)	Compressive strength (MPa)	Yield stress (MPa)	Yield strain ( $\mu$ strain)	Ultimate tensile stress (MPa)	Ultimate tensile strain ( $\mu$ strain)
Concrete	—	28.3	—	—	—	—
Steel	204,000	—	448	2241	703	110,000
Carbon fiber reinforced polymer	72,400	—	—	—	876	12,100
Epoxy	3,180	—	—	—	72.4	50,000

در اینجا با توجه به تقارن دال حول دو محور اصلی، جهت کاهش زمان تحلیل، یک چهارم از دال مدل‌سازی شد و در نواحی مرزی از شرایط مرزی تقارن استفاده گردید.

## • فرضیات مدل‌سازی

فرضیات برای مدل‌سازی این اتصال در چند قسمت خلاصه می‌شود که به ترتیب اهمیت در ذیل آورده شده است.

### - مدل‌سازی بخش بتنی:

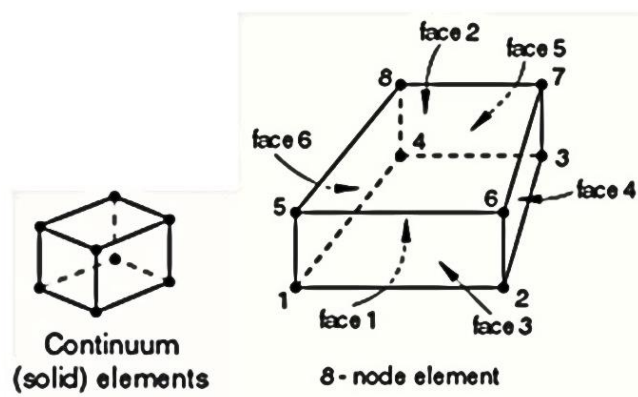
جهت مش‌بندی، بتن به المان‌های آجری شکل تقسیم شده‌اند تا نتیجه توزیع تنش به طرز مناسبی در آنالیز سه‌بعدی به دست آید. المان‌های آجری گوناگونی در ABAQUS وجود دارد، برای مش‌بندی از المان C3D8R مطابق شکل (۲-۴) استفاده شده است که مخفف معانی زیر می‌باشد:

C: Continuum stress/displacement

3D: Three dimensional element

8: 8-node brick (Linear order)

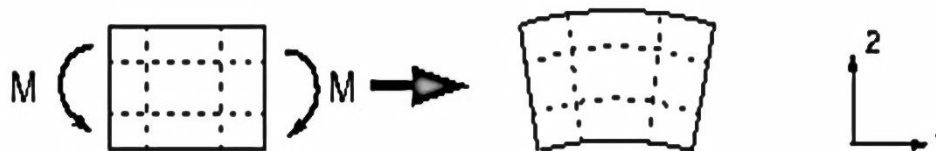
R: Reduced integration



شکل (۲-۴) المان به کاررفته در بتن بر اساس راهنمای ABAQUS

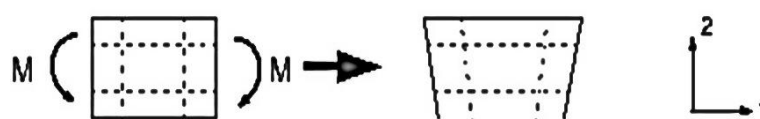
در میان المان‌های خطی دو المان وجود دارد که می‌توان آن‌ها را در آنالیز در نظر گرفت: المان‌های با انتگرال‌گیری کامل و المان‌های با انتگرال‌گیری کاهش یافته. در مسائل هنگامی که سازه‌ها برای خمش در نظر گرفته می‌شوند، المان‌ها با انتگرال کامل نتایج ضعیفی را به علت پدیده قفل شدگی برشی ارائه می‌دهند. این پدیده را هنگامی که خمش خالص وجود دارد، می‌توان به شرح زیر توضیح

داد. رفتار این المان‌ها در شکل (۳-۴) نشان داده شده است.



شکل (۳-۴) رفتار واقعی المان تحت خمش خالص

همان‌طور که در شکل (۳-۴) مشاهده می‌شود، در المان تغییر شکل داده نشده طول خطوط خط‌چین عمودی با هم برابر است. در المان تغییر شکل داده شده نیز به علت این که تحت خمش خالص انحناء ثابت است، طول خطوط خط‌چین عمودی ثابت می‌ماند. تقریب رفتار واقعی در آنالیز اجزاء محدود بستگی به نوع المان و تعداد نقاط انتگرال‌گیری دارد. در اینجا نقاط انتگرال‌گیری نقاط گوسی هستند که جهت انتگرال‌گیری تابع به کار رفته در انتگرال‌گیری عناصر ماتریس سختی و یا بارگذاری، در درجات آزادی گره‌ها مورد نیاز است. المان با انتگرال‌گیری کامل C3D8R دارای ۸ نقطه انتگرال‌گیری می‌باشد که شامل دو نقطه انتگرال‌گیری در هر جهت المان است. وقتی چنین المانی تحت خمش خالص قرار می‌گیرد، طول خطوط بالایی و پایینی المان تغییر می‌کند ولی نمی‌توانند خم شده یا انحناء بردارند. شکل (۴-۴) نشان می‌دهد که در این المان زاویه خطوط خط‌چین عمودی بعد از تغییر شکل با خطوط خط‌چین افقی به صورت ۹۰ درجه نمی‌باشد، یعنی المان تحت مود برشی نیز قرار دارد. تنش برشی در این‌گونه المان‌ها، حتی اگر مدل دارای شبکه‌بندی ریزی باشند باعث ایجاد نتایج غیر صحیح می‌باشد (تنش برشی اضافی غیر واقعی در المان به وجود می‌آید). برای کم کردن اثر قفل شدگی برشی در المان‌های توپر خطی از نقاط انتگرال‌گیری کاهش یافته استفاده شده است.



شکل (۴-۴) المان با انتگرال‌گیری کامل تحت خمش خالص

برای مدل‌سازی بتن شیوه‌ها و گزینه‌های مختلفی در این نرم‌افزار موجود است که با توجه به اینکه بتن دارای رفتاری ترد و شکننده می‌باشد، از گزینه Concrete Damaged Plasticity استفاده شده است. در این گزینه امکان وارد نمودن نقاط مختلف منحنی تنش- کرنش بتن در کشش و فشار وجود دارد. در ABAQUS دو مکانیزم برای انهدام بتن پیش‌بینی شده است. مکانیزم اول، ترک خوردگی تحت کشش و مکانیزم دوم خرد شدگی تحت فشار می‌باشد. منحنی‌های تنش- کرنش بتن معمولی به شرح ذیل و با پارامترهای اشاره شده تعریف می‌گردد.

منحنی تنش- کرنش بتن تحت کشش از یک رابطه خطی تا رسیدن به تنش  $\sigma_{t0}$  (مقاومت کششی نهایی) پیروی می‌کند. از این نقطه به بعد با شروع ترک خوردگی‌ها در بتن، شاخه نرم شونده منحنی آغاز می‌گردد که با موضعی شدن تنش‌ها و افزایش عرض ترک در یک صفحه همراه است. شکل (۴-۵)

منحنی تنش- کرنش بتن تحت فشار از یک رابطه خطی تا رسیدن به تنش  $\sigma_{T0}$  (تسلیم اولیه) به صورت خطی حرکت می‌کند. سپس مرحله غیر خطی و افزایش منحنی شروع می‌شود و تا نقطه مربوط به تنش  $\sigma_{cu}$  (تنش نهایی) ادامه می‌یابد که همان نقطه‌ی مقاومت فشاری بتن است. از این نقطه به بعد شاخه نرم شونده منحنی آغاز می‌گردد و بتن تحت فشار خرد می‌گردد (شکل ۴-۶).

پارامترهای  $d_c$  و  $d_t$  پارامترهایی هستند که کاهش سختی بتن را بر اثر باربرداری در شاخه نرم شونده نشان می‌دهند که بر اثر ترک خوردگی و یا انهدام بخشی از بتن اتفاق می‌افتد. این کاهش سختی (مدول الاستیسیته در هنگام باربرداری نمونه‌های بتنی رخ می‌دهد که در شکل‌های (۴-۵) و (۴-۶) نشان داده شده‌اند. این دو پارامتر مقادیری بین ۰ تا ۱ دارند که ۰ نشان دهنده‌ی بتن بدون خسارت و ۱ بیانگر از دست رفتن تمام مقاومت بتن می‌باشد.  $E_0$  نیز نشان دهنده مدول الاستیسیته بتن قبل از تحمل خسارت است. معادلات مربوط به تنش و کرنش به صورت زیر نوشته می‌شود.

$$\sigma_t = (1 - d_t)E_0(\varepsilon_t - \tilde{\varepsilon}_t^{pl})$$

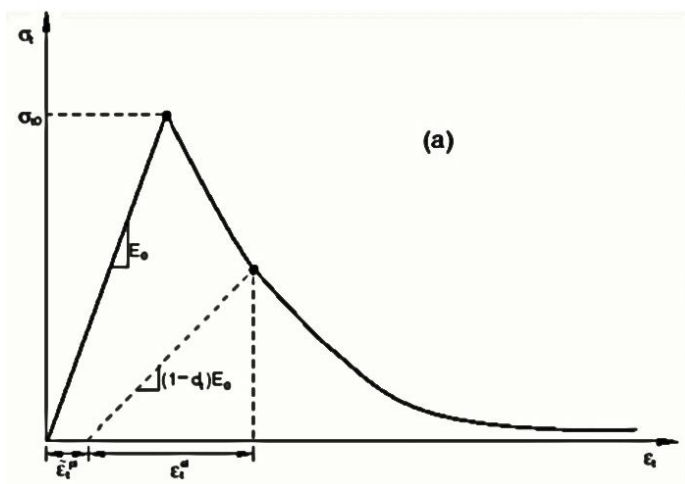
$$\sigma_c = (1 - d_c)E_0(\varepsilon_c - \tilde{\varepsilon}_c^{pl})$$

که در آن:

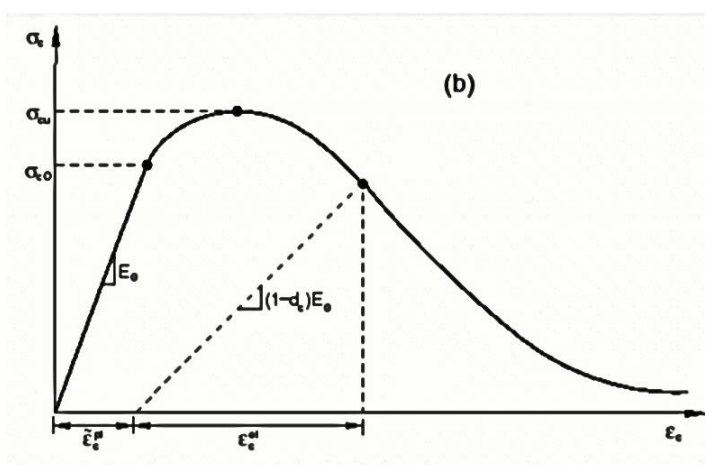
$d_t$  و  $d_c$  = ضرایب کاهش مدول الاستیسیته بتن تحت فشار و کشش

$\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$  و  $\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$  = کرنش پلاستیک بتن تحت فشار و کشش

$\varepsilon_t$  و  $\varepsilon_c$  = کرنش کل بتن تحت فشار و کشش

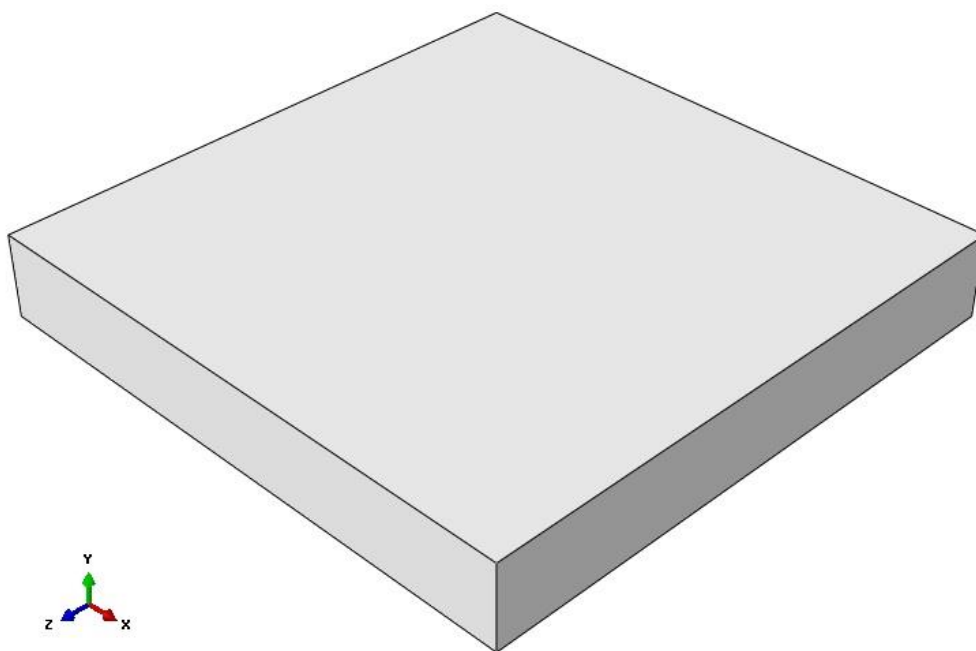


شکل (۵-۴) منحنی تنش-کرنش بتن معمولی تحت کشش



شکل (۶-۴) منحنی تنش-کرنش بتن معمولی تحت فشار

هندسه مدل‌سازی شده دال بتنی نمونه ctrl.1 در نرم‌افزار در شکل زیر نشان داده شده است.



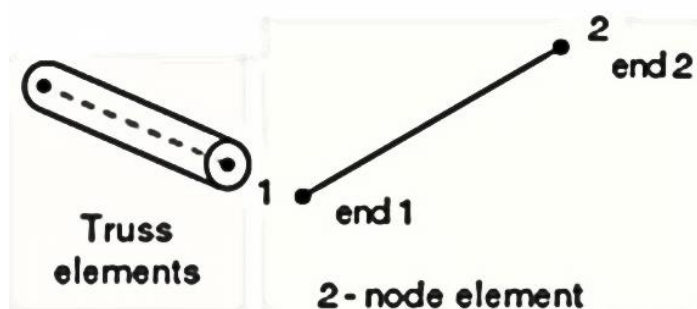
شکل (۷-۴) دال بتنی مدل‌سازی شده

### - مدل آرماتورهای فولادی

ABAQUS دو روش جهت اختصاص آرماتور در المان دارد. در روش اول، از المان تیر و یا خرپا جهت معرفی آرماتور استفاده می‌شود و آرماتورها در المان‌های پیوسته ادغام می‌شوند. ادغام شدن بدین معنی است که درجه آزادی انتقالی در گره‌های المان ادغام شده حذف شده و مطابق مقادیر درونیابی المان پیوسته میزبان در نظر گرفته می‌شود. در روش دوم آرماتورها در یک یا چند لایه به صورت میلگردهایی با فاصله یکنواخت معرفی می‌شوند. لایه‌های آرماتور به صورت لایه‌های پخش شده در حجم المان با ضخامت ثابتی برابر با مساحت هر میلگرد تقسیم بر فاصله میلگردها در نظر گرفته می‌شود. روش دوم با آرماتورهای پخشی پیوستگی کامل در امتداد طولی آرماتور با المان پیوسته را

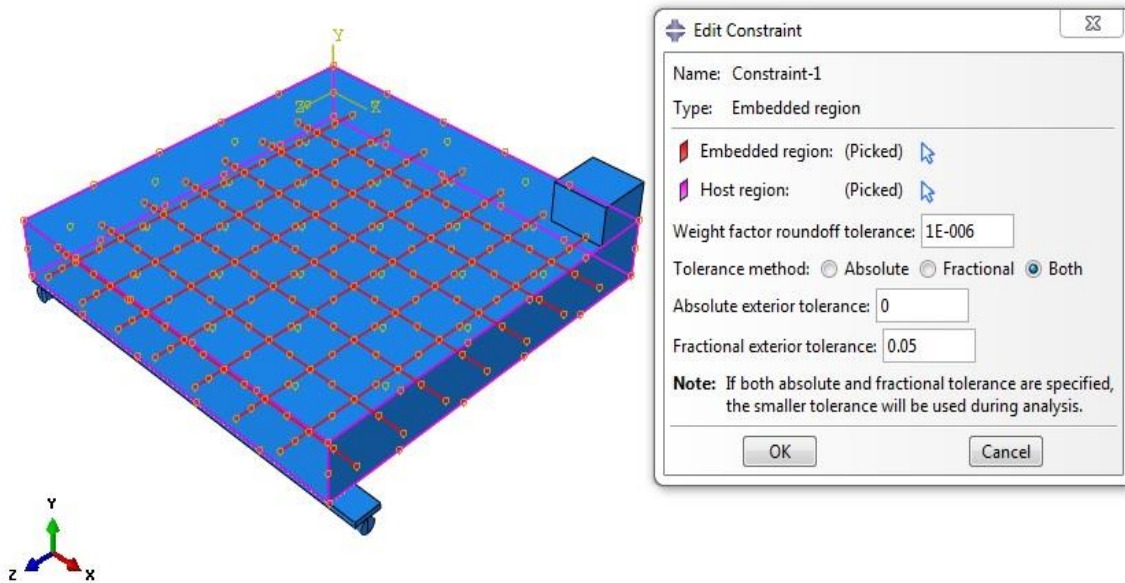
ایجاب می‌کند، در صورتی که در روش اول با آرماتورهای ادغام شده فرض می‌شود که پیوستگی کامل فقط در نقاط گره المان معرف میلگرد و با المان میزبان وجود دارد. از این رو، اگر المان آرماتور ادغام شده فقط در نقاط لبه المان میزبان گره داشته باشد، آرماتورها مابین نقاط آزاد گره‌ها می‌باشند. ولی اگر از المان‌های خرابایی مرتبه بالا (المان با بیش از دو گره) ادغام شده در المان میزبان استفاده شود، می‌توان فرض کرد پیوستگی کامل در تمام نقاط گره‌ای بین المان خرابایی میلگرد و المان میزبان تامین شده است. در این پایان‌نامه مدل‌سازی آرماتورها براساس روش اول و با استفاده از المان خرابایی ساده انجام شده است. در مقاله مرجع به ضریب پواسون اشاره‌ای نشده است که آن را برابر  $0.3$  در نظر می‌گیریم. طبق مقاله مرجع برای آرماتورهای طولی دال مدول الاستیسیته  $204000 \text{ MPa}$  و تنش جاری شدن  $448 \text{ MPa}$  و تنش گسیختگی  $703 \text{ MPa}$  در نظر گرفته شده است.

جهت آنالیز از مدل الاستیک-پلاستیک برای مدل‌سازی رفتار فولاد استفاده شده است، در این روش فولاد تا رسیدن به تنش تسلیم، الاستیک بوده و در این نقطه تحت بار ثابت جاری می‌شود. پارامترهای مورد نیاز این مدل، مدول الاستیسیته  $E_s$ ، ضریب پواسون و تنش تسلیم فولاد می‌باشد. مطابق شکل (۸-۴) جهت مش بندی آرماتورها از المان سه‌بعدی خرابایی خطی T3D2 استفاده گردید.

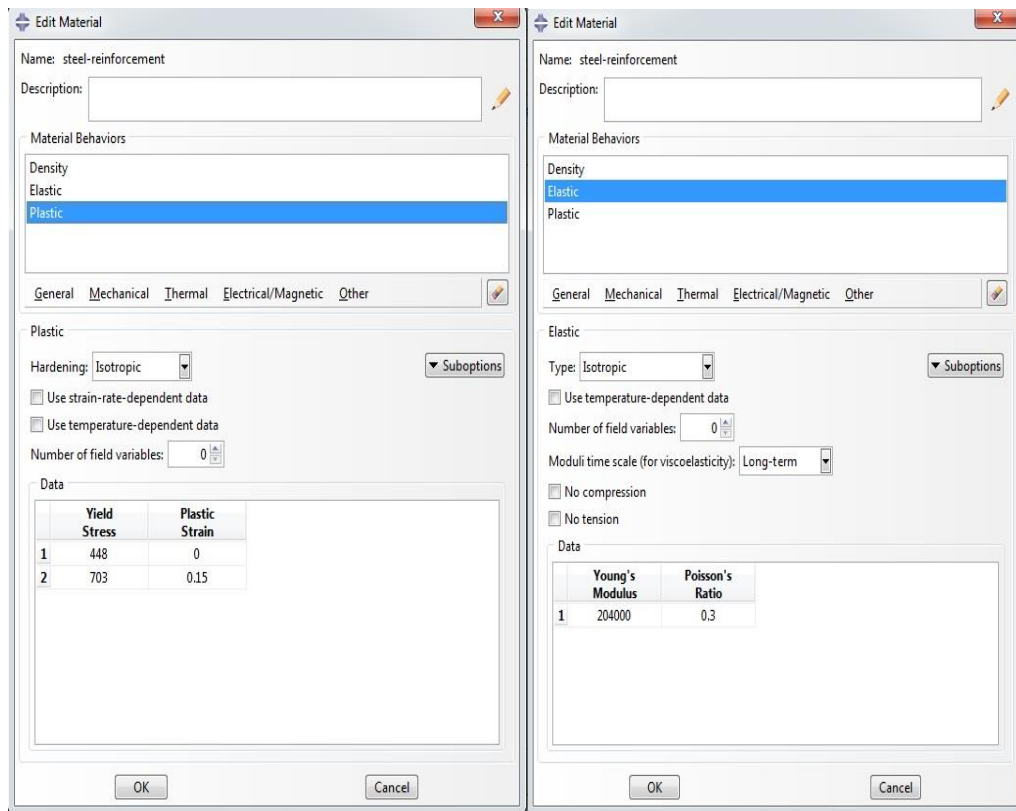


شکل (۸-۴) المان خرابایی به کار رفته به عنوان آرماتور طولی دال





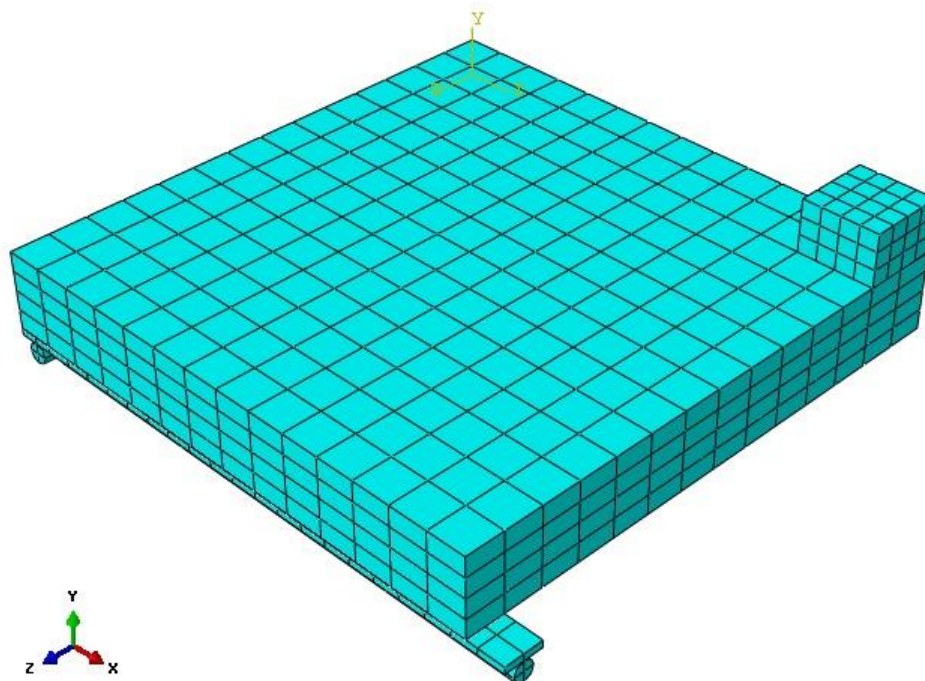
شکل (۹-۴) آرماتورهای دال و خصوصیات ناحیه ادغام شده (Embedded region) در ABAQUS



شکل (۱۰-۴) خصوصیات آرماتورهای فولادی

## - شبکه‌بندی

در این مدل، شبکه‌بندی احجام به صورت دستی انجام گرفت. با توجه به مطالعات انجام شده تاکنون، استفاده از شبکه‌بندی دستی نتایج دقیق‌تری نسبت به استفاده از قابلیت شبکه‌بندی خودکار توسط نرم‌افزار حاصل می‌دهد. با توجه به فواصل قرارگیری آرماتورها، نمونه کنترلی با المان‌های مربعی به ابعاد ۷۶ میلی‌متر شبکه‌بندی شد و با توجه به عمق موثر آرماتورهای فولادی ( $d=3/4 h$ ) از تعداد چهار المان در راستای ارتفاع دال استفاده شد. مدل شبکه‌بندی شده نمونه مذکور در شکل (۴-۱۱) نمایش داده شده است.

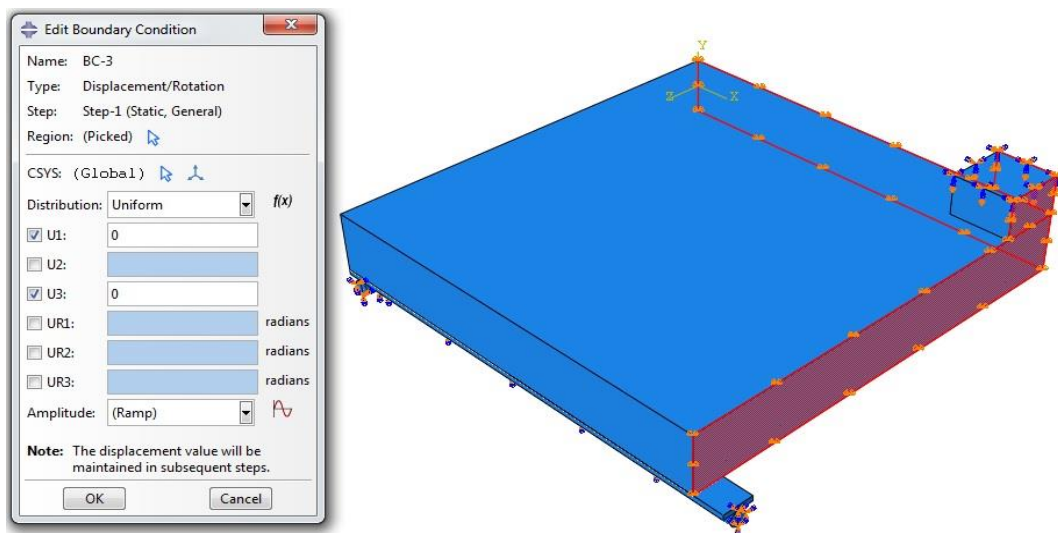


شکل (۴-۱۱) مدل شبکه‌بندی شده نمونه ctrl.1

## - شرایط مرزی

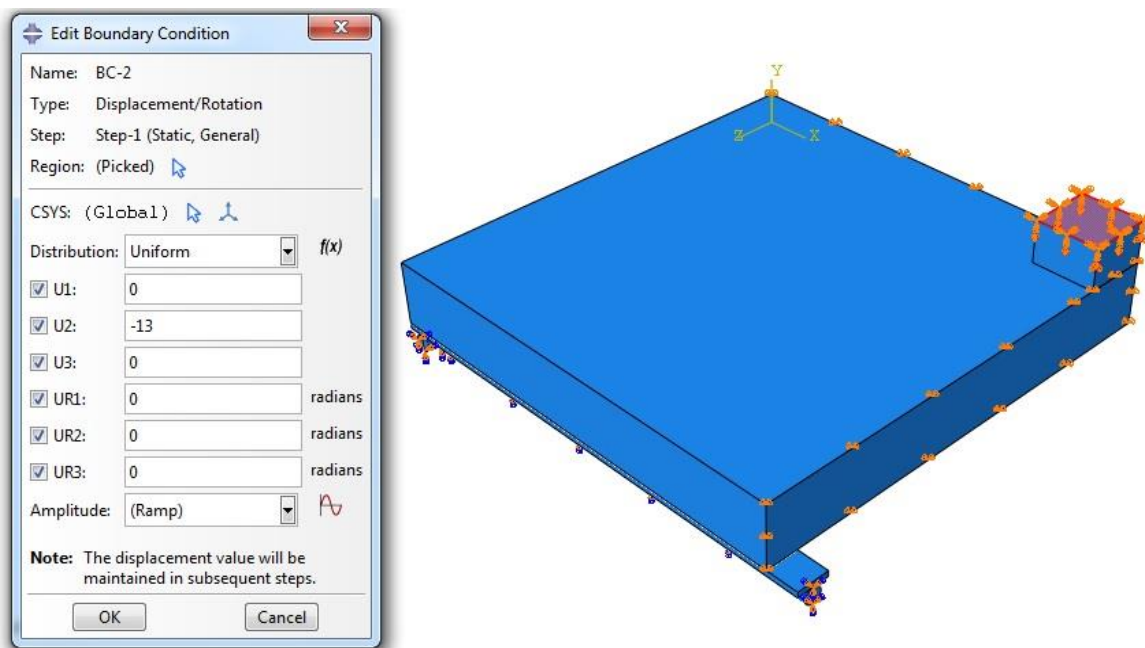
نمونه دال در ۴ لبه خود روی غلطک‌های فولادی که بیانگر تکیه‌گاه ساده بود قرار داشت و به منظور آنکه مدل‌سازی هرچه دقیق‌تر و مشابه حالت واقعی باشد، تکیه‌گاه تماسی زیر نمونه مدل شده است.

از آنجا که به دلیل تقارن، فقط یک چهارم از دال مدل سازی شده بود، به سطوح واقع در دو لبه داخلی دال شرایط مرزی متقارن اختصاص داده شد.



شکل (۴-۱۲) شرایط مرزی تقارن

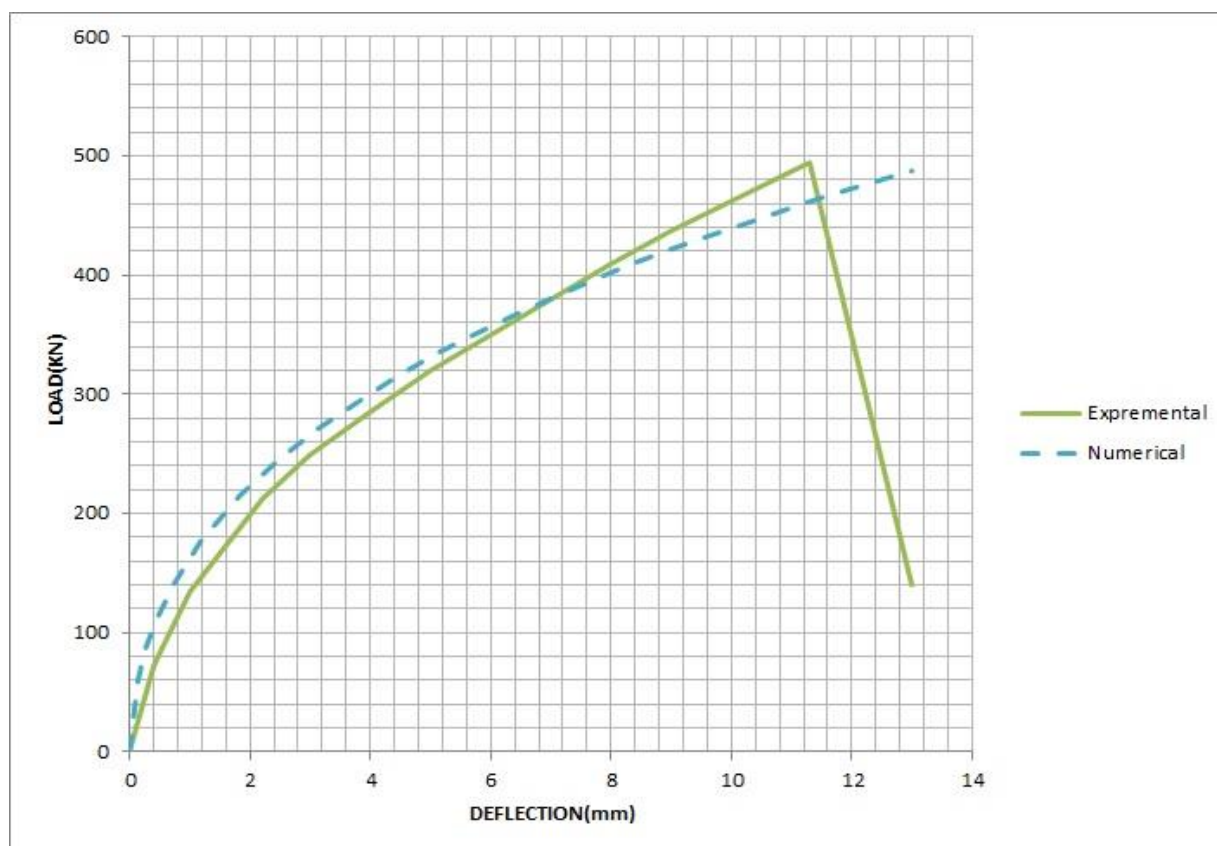
تغییر مکان حاصل از نمونه آزمایشگاهی به صورت متمرکز بر بلوک شبیه ساز ستون اعمال گردید، و در خروجی نرم افزار Abaqus، بار را به ما می دهد. به این دلیل از روش کنترل تغییر مکان استفاده گردید که در نمودار بار- تغییر مکان، تغییر مکان همواره در حال افزایش می باشد.



شکل (۴-۱۳) نحوه بارگذاری

## - نتایج تحلیل

جهت به دست آوردن یک مدل تحلیلی که با دقتی مناسب با نمونه آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد، تحلیل‌های زیادی انجام پذیرفت. در واقع از ابتدا، هدف از کالیبراسیون نمونه، تطبیق کامل منحنی بار- تغییرمکان آن با نمونه آزمایشگاهی بود، که بسیار مشکل‌تر از تطبیق دادن صرفاً بار و تغییرمکان نهایی نمونه با نتایج آزمایشگاهی است. در شکل زیر مقایسه بین نتایج حاصل از آزمایش و نتایج تحلیل ارائه شده است، همانطور که مشاهده شد نتایج نزدیکی مناسبی با یکدیگر دارند.



شکل (۴-۱۴) نمودار کالیبره شده پاسخ بار- تغییرمکان نمونه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی

همان طور که در شکل (۴-۱۴) مشاهده می شود پاسخ بار- تغییر مکان نمونه، چند خطی بوده و می تواند به دو مرحله ترک نخورده و ترک خورده تقسیم گردد. نقطه ای که پاسخ بار- تغییر مکان از پاسخ الاستیک اولیه منحرف شود می تواند به عنوان نقطه نخستین ترک خوردگی پذیرفته شود. مرحله ترک خورده به دو زیر مرحله پیش از تسلیم و پس از تسلیم تقسیم می شود. مرحله ترک خورده پیش از تسلیم از بار ترک خوردگی،  $P_{cr}$ ، تا بار تسلیم،  $P_y$ ، است. مرحله ترک خورده پس از تسلیم از بار تسلیم،  $P_y$ ، تا بار نهایی،  $P_u$ ، ادامه می یابد. مقادیر بار ترک خوردگی، تسلیم شدگی در آرماتورها و گسیختگی نمونه آزمایشگاهی و اجزای محدود و همچنین نسبت آنها در جدول زیر آمده است:

جدول (۴-۲): مقادیر بار ترک خوردگی، تسلیم شدگی و نهایی نمونه ها

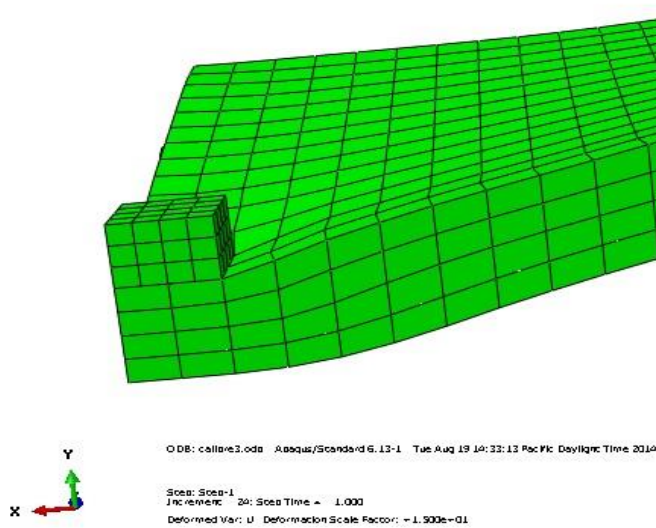
مدل	بار ترک خوردگی بتن (KN)	بار جاری شدن آرماتور (KN)	بار گسیختگی (KN)
آزمایشگاهی	۸۱/۱	۴۸۷	۴۹۴
اجزای محدود	۱۰۰/۳۳	۴۶۶/۴۸	۴۸۵/۷۳
نسبت اجزای محدود به آزمایشگاهی	۱/۲۳۷	۰/۹۵	۰/۹۸

مشاهده می شود، مدل تحلیلی نسبت به نمونه آزمایشگاهی سختی بیشتری را از خود نمایش داده است، دلایل این مورد را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- مدل المان محدود به دلیل کاهش درجات آزادی در المان ها به صورت ذاتی از نمونه آزمایشگاهی سخت تر است.
- ۲- اتصال بین آرماتورهای فولادی و دال بتنی به صورت کاملاً پیوسته ( بدون در نظر گرفتن لغزش) فرض شده است.

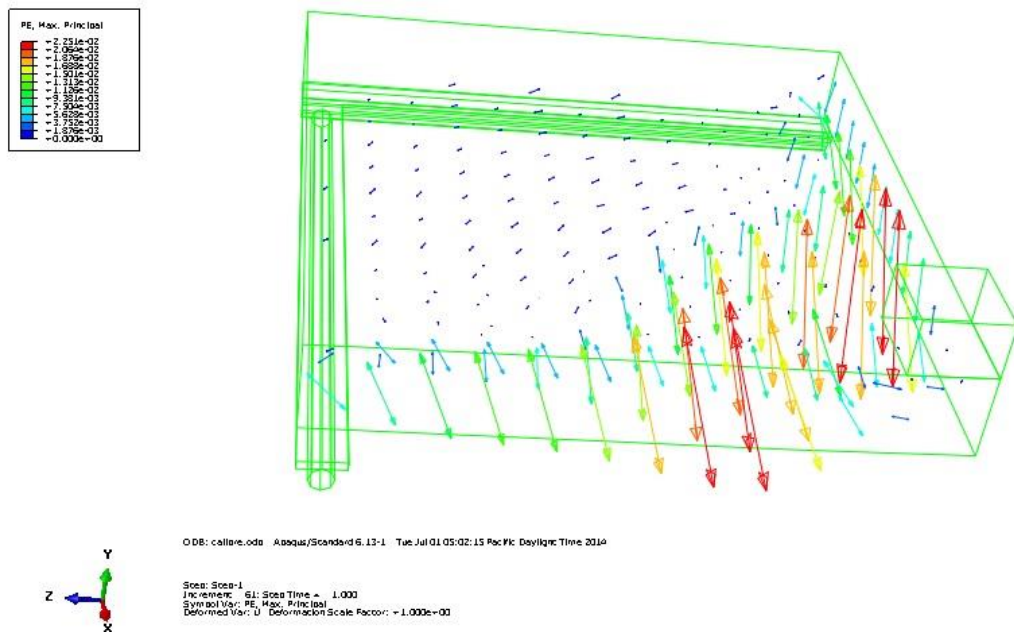
## - الگوهای ترک خوردگی

مدل تغییر شکل یافته نمونه ctrl.1 در شکل زیر نمایش داده شده است.

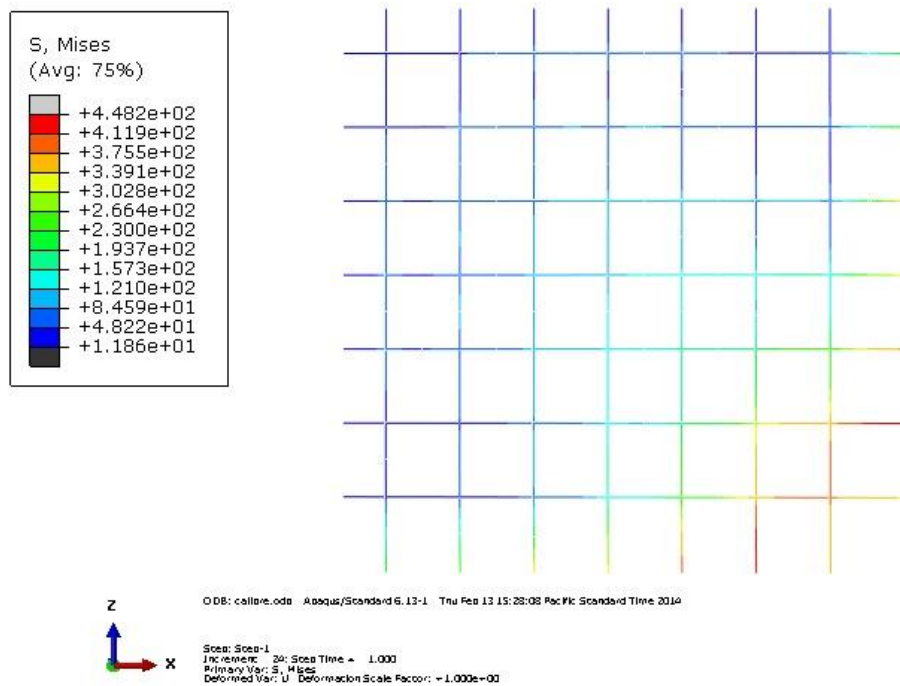


شکل (۴-۱۵) تغییر شکل نمونه ctrl.1

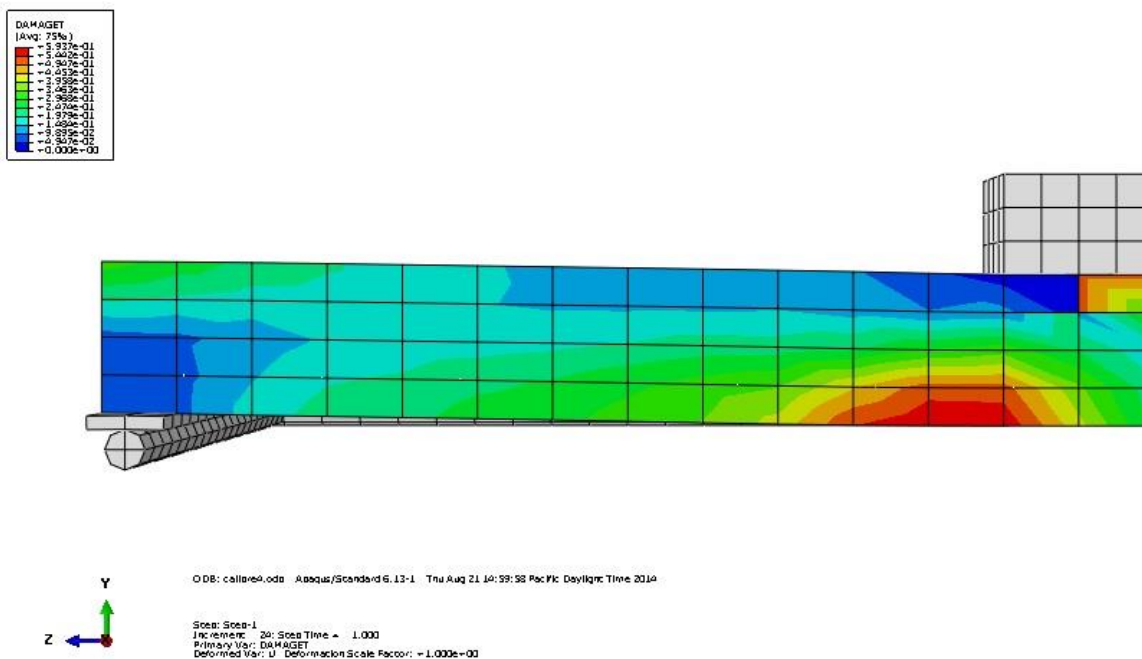
در شکل زیر الگوی ترک خوردگی نمونه ctrl.1 نمایش داده شده است، در این شکل بردارها واگرا بوده و بیانگر کششی بودن پارامتر هستند و بزرگی آنها شدت ترک را نشان می‌دهد. همچنین راستای آنها عمود بر صفحه ترک می‌باشد که همگی بیانگر ترک‌های مورب برشی هستند.



شکل (۴-۱۶) الگوی ترک‌ها



شکل (۴-۱۷) جاری شدن آرماتورها در محل پایه شبیه‌سازی شده ستون



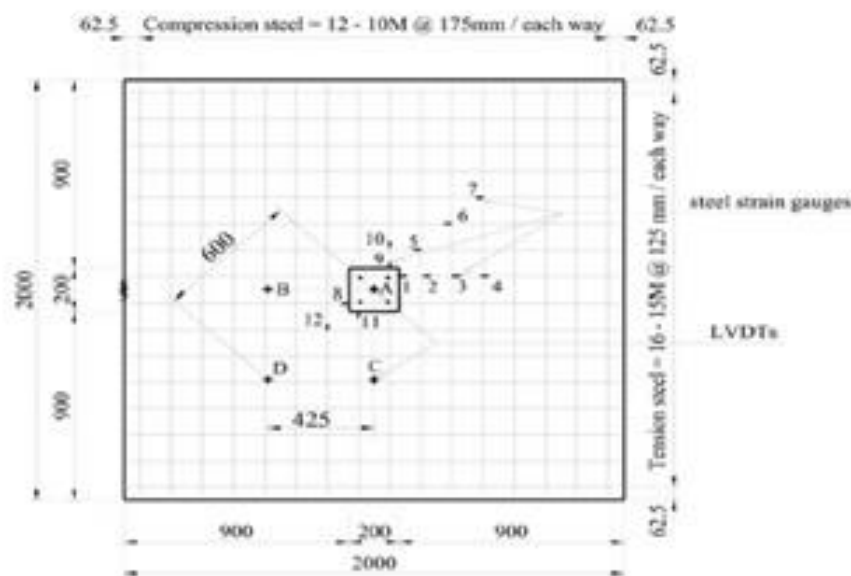
شکل (۴-۱۸) تخریب بتن در ناحیه کششی

#### ۴-۵-۲- نمونه کالیبره شده آزمایش شرف، سودکی، ون داسن

#### ۴-۵-۲-۱- مشخصات هندسی و مصالح دال

نمونه دال آزمایشگاهی مذکور دارای ابعاد  $2000 \times 2000$  میلی‌متر در پلان و ۱۵۰ میلی‌متر ضخامت بود.

و به صورت یکپارچه با یک ستون با مقطع عرضی مربعی به ضلع ۲۰۰ میلی‌متر که به اندازه ۲۰۰ میلی‌متر از بالا و پایین دال ادامه داشت، ساخته شده بود. نمایی از نمونه آزمایشگاهی و جزئیات آرماتورگذاری آن در شکل (۴-۱۹) نمایش داده شده است.



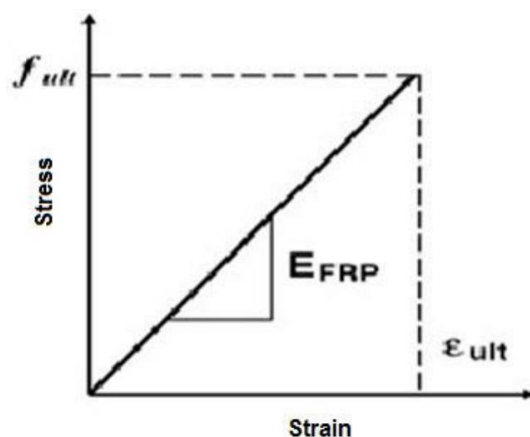
شکل (۴-۱۹) جزئیات آرماتورگذاری

#### صفحات FRP:

در این مدل فرض شده است که چسبندگی کامل بین FRP و بتن وجود دارد. هرچند در عمل این گونه نیست و خرابی بر اثر جداشدگی چسب از بتن اتفاق می‌افتد و هیچ گاه از تمام ظرفیت FRP استفاده نمی‌شود. از مدل شکست ترد برای شبیه‌سازی رفتار نوارهای CFRP استفاده شده است. در این روش فرض می‌شود رفتار ورقه‌های CFRP تا رسیدن به کرنش نهایی خطی است. در این نقطه



ترک گسترش می یابد و ماده تمام ظرفیت باربری خود را یکباره از دست می دهد. پارامترهای مورد نیاز این مدل، مدول الاستیسیته  $E_{CFRP}$ ، مدول برشی  $G_{CFRP}$  و ضریب پواسون پلیمرهای الیافی می باشد.



شکل (۴-۲۰) نمودار تنش - کرنش لایه های CFRP

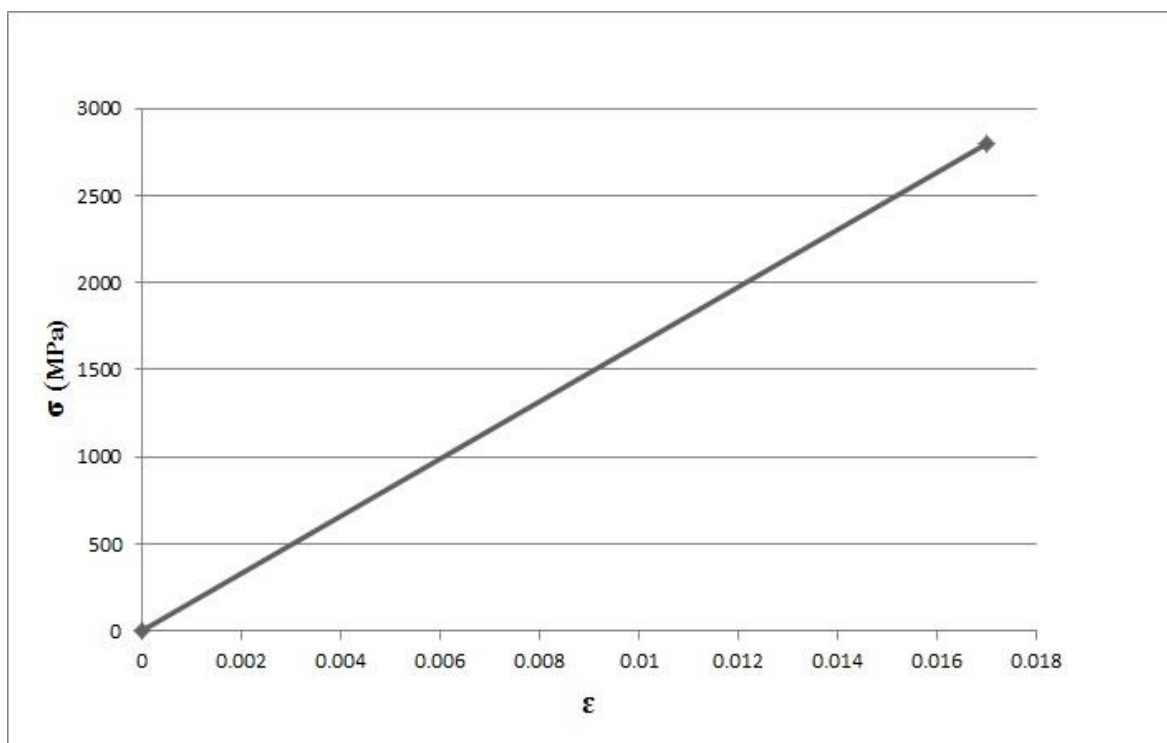
#### - مشخصات مصالح (CFRP):

پلیمر مسلح به الیاف (FRP) مصالحی غیر ایزوتروپیک هستند، به این معنی که مشخصات آنها در همه راستاها یکسان نمی باشند. در این مطالعه مصالح اورتوتروپیک به صورت عرضی ایزوتروپیک در نظر گرفته شده اند. بدین معنی که مشخصات پلیمر مسلح به الیاف (FRP) در راستاهای عمود بر الیاف یکسان است. مشخصات مصالح CFRP های مورد استفاده در این مطالعه در جدول (۴-۳) ارائه شده است.

جدول (۴-۳)، مشخصات مصالح (CFRP)

نوع الیاف	مدول الاستیسیته (Gpa)	نسبت پواسون	مدول برشی (Gpa)	ضخامت لایه (mm)
CFRP	$E_x = 165$	$\nu_{xy} = 0.22$	$G_{xy} = 8$	1
	$E_y = 12.1$	$\nu_{yz} = 0.3$	$G_{yz} = 4.65$	
	$E_z = 12.1$	$\nu_{xz} = 0.22$	$G_{xz} = 8$	

مشخصات مصالح پلیمری مسلح به الیاف به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. نمودار تنش - کرنش صفحات پلیمری مرکب کربنی در راستای الیاف در شکل (۴-۲۱) نمایش داده شده است.

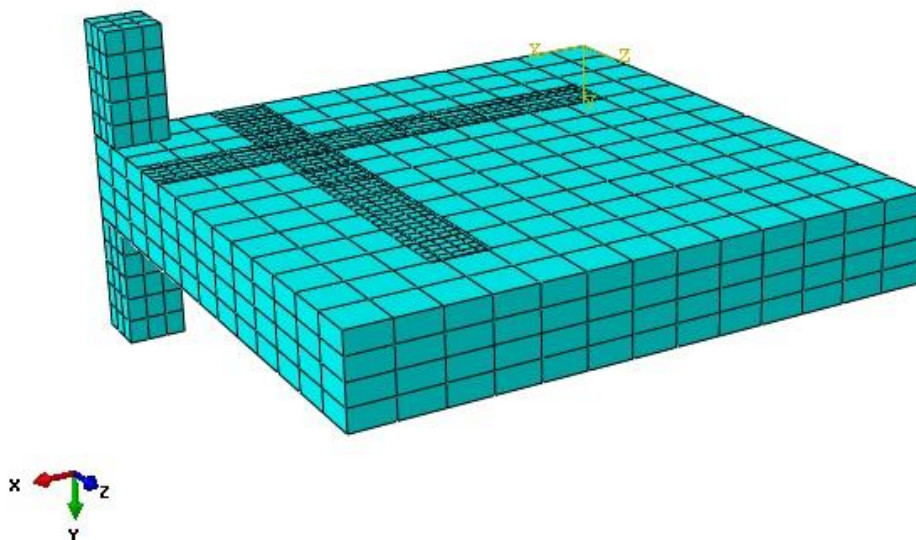


شکل (۴-۲۱) نمودار تنش - کرنش صفحات پلیمری مرکب کربنی در راستای الیاف

#### - شبکه‌بندی

در این مدل، شبکه‌بندی احجام به صورت دستی انجام گرفت. با توجه به مطالعات انجام شده تاکنون، استفاده از شبکه‌بندی دستی نتایج دقیق‌تری نسبت به استفاده از قابلیت شبکه‌بندی خودکار توسط نرم‌افزار حاصل می‌دهد. نمونه تقویت شده با المان‌های مربعی به ابعاد ۷۶ میلی‌متر شبکه‌بندی گردید و با توجه به عمق موثر آرماتورهای فولادی ( $d=3/4 h$ ) از تعداد چهار المان در راستای ارتفاع دال استفاده شد و همچنین در این مدل FRP با المان‌های مربعی به ابعاد ۵ میلی‌متر شبکه‌بندی گردیدند،

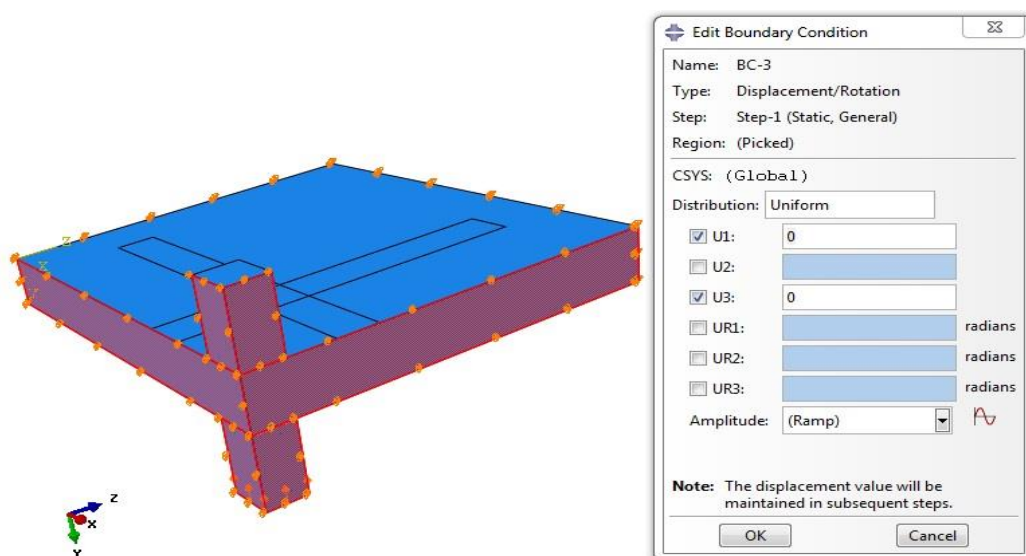
که جواب نزدیکی در نمودار بار- تغییر مکان نسبت به نمونه آزمایشگاهی بدست آمد. مدل شبکه‌بندی شده نمونه مذکور در شکل (۴-۲۲) نمایش داده شده است.



شکل (۴-۲۲) شبکه‌بندی نمونه تقویت شده

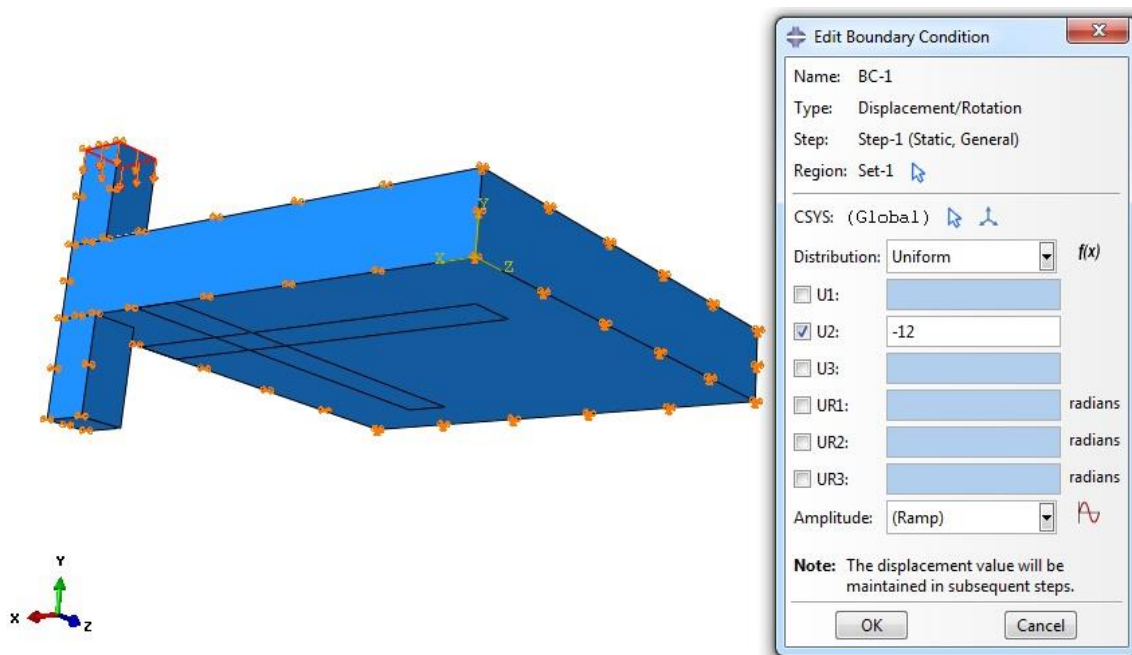
### - شرایط مرزی

از آنجا که به دلیل تقارن، فقط یک چهارم از دال مدل سازی شده بود، به سطوح واقع در دو لبه داخلی دال شرایط مرزی متقارن اختصاص داده شد.



شکل (۴-۲۳) شرایط مرزی تقارن

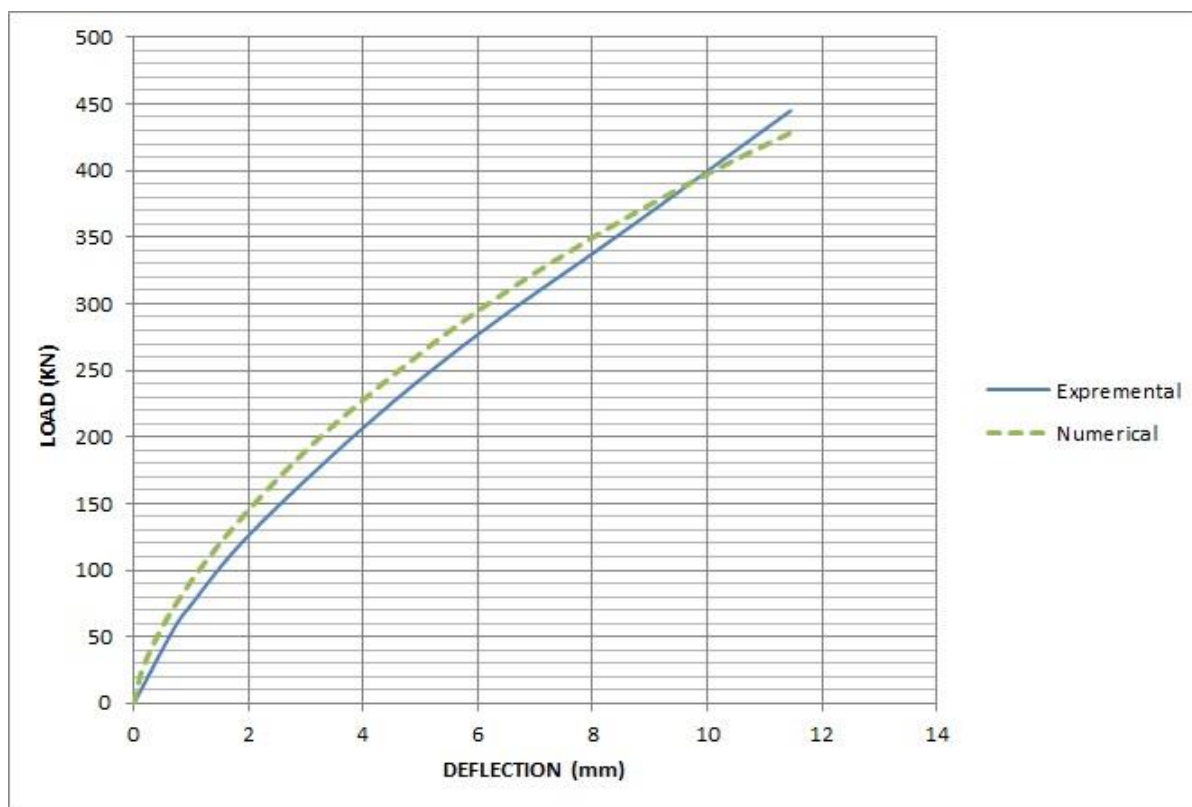
تغییرمکان حاصل از نمونه آزمایشگاهی به صورت متمرکز بر بلوک شبیه‌ساز ستون اعمال گردید، و در خروجی نرم افزار Abaqus، بار را به ما می‌دهد. به این دلیل از روش کنترل تغییرمکان استفاده گردید که در نمودار بار- تغییرمکان، تغییرمکان همواره در حال افزایش می‌باشد.



شکل (۴-۲۴) نحوه بارگذاری

## - نتایج تحلیل

جهت به دست آوردن یک مدل تحلیلی که با دقتی مناسب با نمونه آزمایشگاهی مطابقت داشته باشد، تحلیل‌های زیادی انجام پذیرفت. در واقع از ابتدا، هدف از کالیبراسیون نمونه، تطبیق کامل منحنی بار- تغییرمکان آن با نمونه آزمایشگاهی بود، که بسیار مشکل‌تر از تطبیق دادن صرفاً بار و تغییرمکان نهایی نمونه با نتایج آزمایشگاهی است. در شکل زیر مقایسه بین نتایج حاصل از آزمایش و نتایج تحلیل ارائه شده است، همانطور که مشاهده می‌شود نتایج، نزدیکی مناسبی با یکدیگر دارند.



شکل (۴-۲۵) نمودار کالیبره شده پاسخ بار- تغییرمکان نمونه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی

همان‌طور که در شکل (۴-۲۵) مشاهده می‌شود پاسخ بار- تغییرمکان نمونه، چند خطی بوده و می‌تواند به دو مرحله ترک نخورده و ترک خورده تقسیم گردد. نقطه‌ای که پاسخ بار- تغییرمکان از پاسخ الاستیک اولیه منحرف شود می‌تواند به عنوان نقطه نخستین ترک خوردگی پذیرفته شود. مرحله ترک خورده به دو زیر مرحله پیش از تسلیم و پس از تسلیم تقسیم می‌شود. مرحله ترک خورده پیش از تسلیم از بار ترک خوردگی،  $P_{cr}$ ، تا بار تسلیم،  $P_y$ ، است. مرحله ترک خورده پس از تسلیم از بار تسلیم،  $P_y$ ، تا بار نهایی،  $P_u$ ، ادامه می‌یابد. مقادیر بار ترک خوردگی، تسلیم شدگی در آرماتورها و گسیختگی نمونه آزمایشگاهی و اجزای محدود و همچنین نسبت آنها در جدول زیر آمده است:

جدول (۴-۴): مقادیر بار ترک خوردگی، تسلیم شدگی و نهایی نمونه‌ها

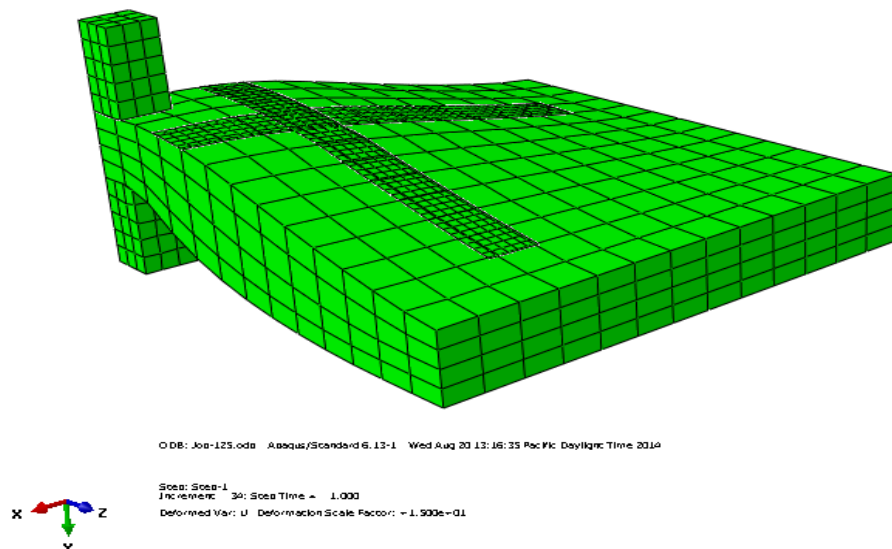
مدل	بار ترک خوردگی بتن (KN)	بار جاری شدن آرماتور (KN)	بار گسیختگی (KN)
آزمایشگاهی	۵۸	۳۴۲	۴۴۵
اجزای محدود	۷۱/۲۸	۳۵۸/۹۷	۴۲۸/۳۳
نسبت اجزای محدود به آزمایشگاهی	۱.۲۲	۱.۰۴	۰.۹۶

مشاهده می‌شود، مدل تحلیلی نسبت به نمونه آزمایشگاهی سختی بیشتری را از خود نمایش داده است، دلایل این مورد را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- ۱- مدل المان محدود به دلیل کاهش درجات آزادی در المان‌ها به صورت ذاتی از نمونه آزمایشگاهی سخت‌تر است.
- ۲- اتصال بین آرماتورهای فولادی و دال بتنی به صورت کاملاً پیوسته (بدون در نظر گرفتن لغزش) فرض شده است.
- ۳- عدم مدل‌سازی لایه چسب و فرض چسبندگی کامل لایه‌های ورق تقویت و سطح بتن با استفاده از روش تماس مقید

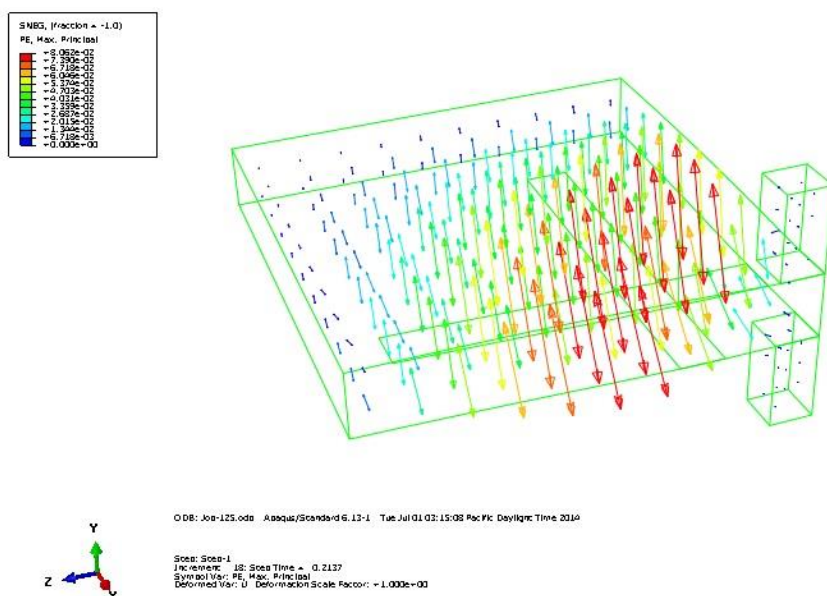
#### - الگوهای ترک خوردگی

مدل تغییر شکل یافته نمونه در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل (۴-۲۶) تغییر شکل نمونه

در شکل زیر الگوی ترک خوردگی نمونه نمایش داده شده است، در این شکل بردارها واگرا بوده و بیانگر کششی بودن پارامتر هستند و بزرگی آنها شدت ترک را نشان می‌دهد. همچنین راستای آنها عمود بر صفحه ترک می‌باشد که همگی بیانگر ترک‌های مورب برشی هستند.



شکل (۴-۲۷) الگوی ترک‌ها





## **فصل ۵:**

**مقاوم‌سازی اتصالات دال – ستون و انجام**

**مطالعات پارامتریک**

## ۵-۱- مقدمه

پس از حصول اطمینان از صحت نتایج تحلیل‌ها در نرم‌افزار ABAQUS نوبت به تعریف نمونه‌های تحلیلی می‌رسد. در این بخش روش‌های مختلف تقویت و مقاوم‌سازی دال‌های موجود و پارامترهای تاثیرگذار روی ظرفیت برش پانچ دال‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. برخلاف نمونه‌های آزمایشگاهی که در آن‌ها محدودیت‌های زیادی برای مشاهده و حصول نتایج وجود دارد و معمولاً نمونه‌ها در مقیاس کوچکتر و با محدودیت‌های زیادی مورد آزمایش قرار می‌گیرند، در مدل‌سازی المان محدود، این محدودیت‌ها کمتر وجود داشته و امکان مدل‌سازی یک نمونه نزدیک به واقعیت به مراتب ساده‌تر خواهد بود.

مدل‌سازی دال بدون ستون بتنی یک شبیه‌سازی واقع‌گرایانه از ناحیه اتصال نمی‌باشد. در این بخش به منظور تعیین حساسیت نتایج تحلیل نسبت به وجود ستون، نمونه‌ای مشابه با نمونه کالیبره شده ولی دارای پایه ستون مدل‌سازی شد و تحت عنوان Ctrl نامگذاری گردید. یک پایه ستون با ابعاد  $304 \times 304$  میلی‌متر و ارتفاعی معادل با ۳ برابر ضخامت دال در هر دو وجه دال مدل‌سازی شد و با تعداد ۱۶ عدد آرماتور نمره ۱۴ مسلح گردید، همچنین پایه ستون با آرماتورهای برشی به قطر ۸ میلی‌متر و به فواصل ۷۶ میلی‌متر در برابر برش مسلح شد.

## ۵-۲- مقاوم‌سازی اتصالات دال - ستون و مطالعات پارامتریک روی نمونه‌های تقویت شده

### ۵-۲-۱- مقاوم‌سازی اتصالات دال - ستون با استفاده از صفحات پلیمری مسلح به الیاف (FRP)

در این بخش مقاوم‌سازی اتصالات دال - ستون با استفاده از صفحات پلیمری مسلح به الیاف (FRP) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. جهت انجام مطالعات مقاوم‌سازی در این بخش، تعداد شش مدل المان

محدود به صورت خارجی با استفاده از صفحات CFRP چسبیده به وجه کششی دال، با پیکربندی‌های مختلف متعامد و مورب، مورد مقاوم‌سازی قرار گرفتند.

مقدار و پیکربندی صفحات CFRP در این مطالعه برای فراهم‌آوری یک افزایش منطقی در عملکرد نهایی و سرویس اتصال انتخاب شدند. صفحات CFRP مورد استفاده در این مطالعه دارای ابعاد  $1 \times X$   $100 \times 1930$  میلی‌متر بودند، که به وجه کششی نمونه‌ها چسبانیده شدند. فاصله لبه یا گوشه ستون از صفحات CFRP و همچنین فاصله صفحات CFRP از یکدیگر برابر با ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. صفحات متعامد بدین منظور مورد استفاده قرار گرفتند تا با جهت آرماتورهای داخلی منطبق باشند و صفحات مورب بدین منظور مورد استفاده قرار گرفتند، زیرا تصور می‌شد که چنین طرحی منجر به پاسخ شکل‌پذیرتری قبل از گسیختگی می‌شود.

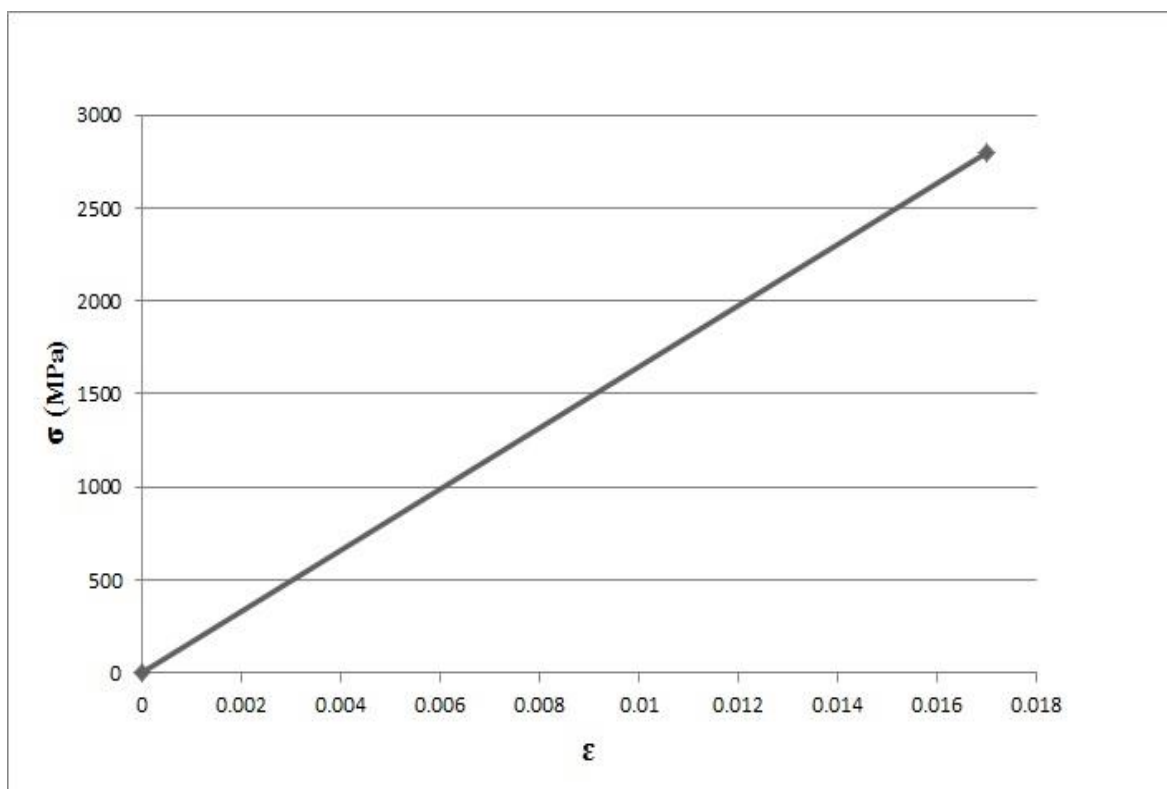
### • مشخصات مصالح

پلیمر مسلح به الیاف (FRP) مصالحی غیر ایزوتروپیک هستند، به این معنی که مشخصات آن‌ها در همه راستاها یکسان نمی‌باشند. در این مطالعه مصالح اورتوتروپیک به صورت عرضی ایزوتروپیک در نظر گرفته شده‌اند. بدین معنی که مشخصات (FRP) در راستاهای عمود بر الیاف یکسان است. مشخصات مصالح CFRP‌های مورد استفاده در این مطالعه در جدول (۵-۱) ارائه شده است.

جدول (۵-۱)، مشخصات مصالح (CFRP)

نوع الیاف	مدول الاستیسیته (Gpa)	نسبت پواسون	مدول برشی (Gpa)	ضخامت لایه (mm)
	$E_x = 165$	$\nu_{xy} = 0.22$	$G_{xy} = 8$	
CFRP	$E_y = 12.1$	$\nu_{yz} = 0.3$	$G_{yz} = 4.65$	1
	$E_z = 12.1$	$\nu_{xz} = 0.22$	$G_{xz} = 8$	

مشخصات مصالح پلیمری مسلح به الیاف به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. نمودار تنش - کرنش صفحات پلیمری مرکب کربنی در راستای الیاف در شکل (۵-۱) نمایش داده شده است.



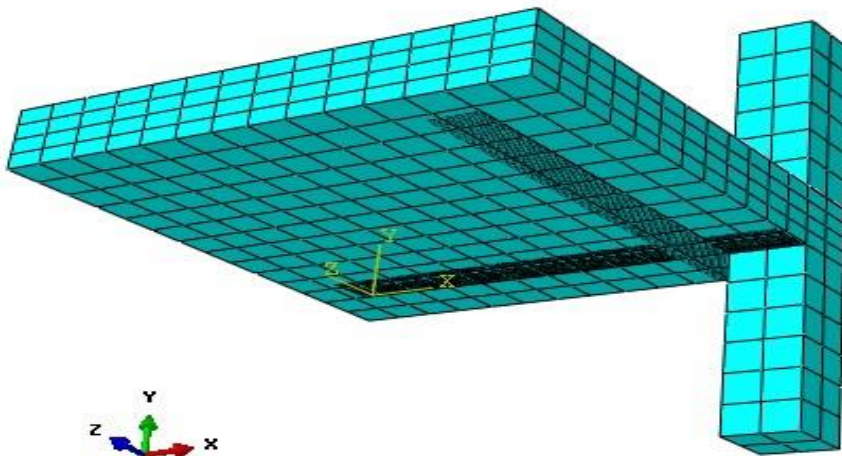
شکل (۵-۱) نمودار تنش - کرنش صفحات پلیمری مرکب کربنی در راستای الیاف

- انواع حالات قرارگیری صفحات CFRP

نمونه‌ها مطابق با تعداد نوارهای پلیمری به کار رفته در تقویت آن‌ها و موقعیت قرارگیری نامگذاری شدند. نوارهای دارای الگوی متعامد با حرف O (مخفف: Orthogonal) و نوارهای دارای الگوی مورب با حرف S (مخفف: Skewed) و از لحاظ موقعیت قرارگیری صفحات، صفحات چسبیده به ستون را با حرف a (مخفف: adjacent to column) و صفحات با فاصله از ستون را با حرف o (مخفف: offset column) مشخص شده‌اند.

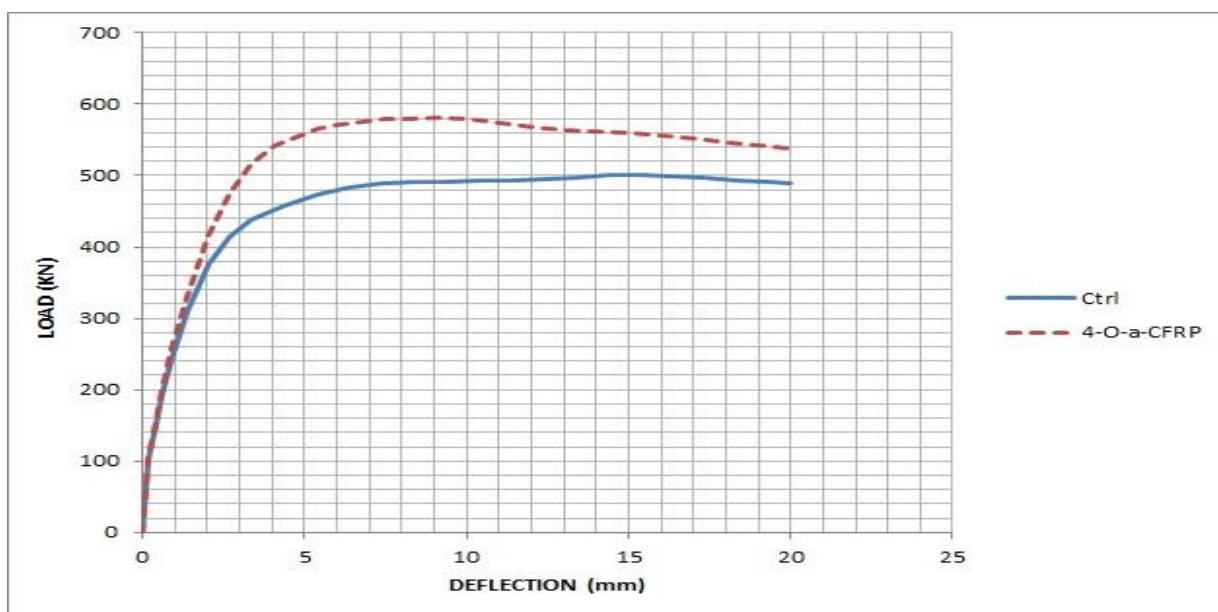
- روش اول مقاومسازی:

برای مقاومسازی صفحات CFRP در راستای آرماتورهای طولی و در نزدیکی ستون به وجه کششی دال چسبانیده شده‌اند.



شکل (۲-۵) شبکه‌بندی نمونه تقویت‌شده 4-O-a-CFRP

نمودار بار- تغییرمکان نمونه تقویت شده با صفحات FRP و با مشخصات فوق به همراه نمودار بار- تغییرمکان نمونه تقویت نشده در شکل زیر آمده است:



شکل (۳-۵) نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های Ctrl و 4-O-a-CFRP

مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه ctrl و نمونه 4-O-a-CFRP و تغییرات نمونه تقویت شده نسبت به نمونه کنترلی در جدول زیر آمده است.

جدول (۲-۵): مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌های ctrl و 4-O-a-CFRP

نمونه	مقادیر نهایی	
	$P_u$ (KN)	$\Delta_u$ (mm)
ctrl	۵۰۰/۳۱	۱۴/۳۷
4-O-a-CFRP	۵۸۱/۲۴	۹/۱۱۲
تغییر نسبت به نمونه ctrl (%)	+ ۱۶/۱۷	- ۳۶/۶

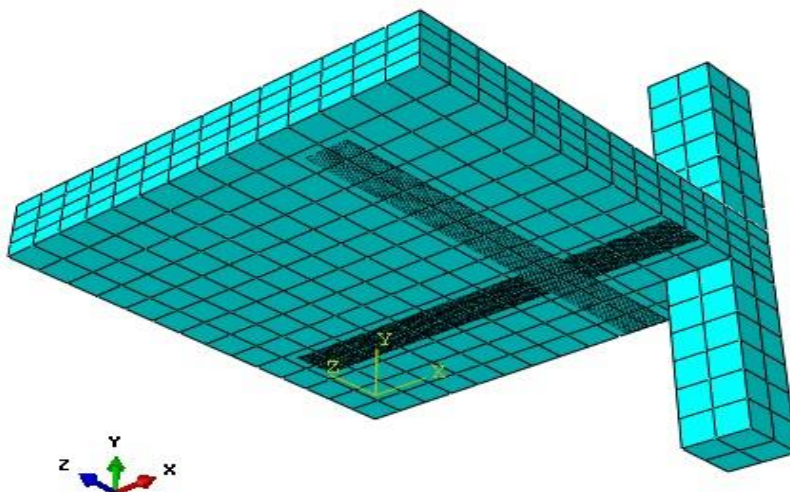
مقادیر شکل پذیری اتصال و نیز درصد تغییر، شکل پذیری نمونه مطالعه شده در این بخش نسبت به شکل پذیری نمونه ctrl به صورت کمی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۳-۵): مقادیر شکل پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و 4-O-a-CFRP

نمونه	شکل پذیری اتصال		
	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_u$ (mm)	$\mu$
ctrl	۶/۱۲۰	۱۴/۳۷	۲/۳۴۰
4-O-a-CFRP	۶/۲۴۰	۹/۱۱۲	۱/۴۵۰
تغییر شکل پذیری (%)			- ۳۸/۰۳

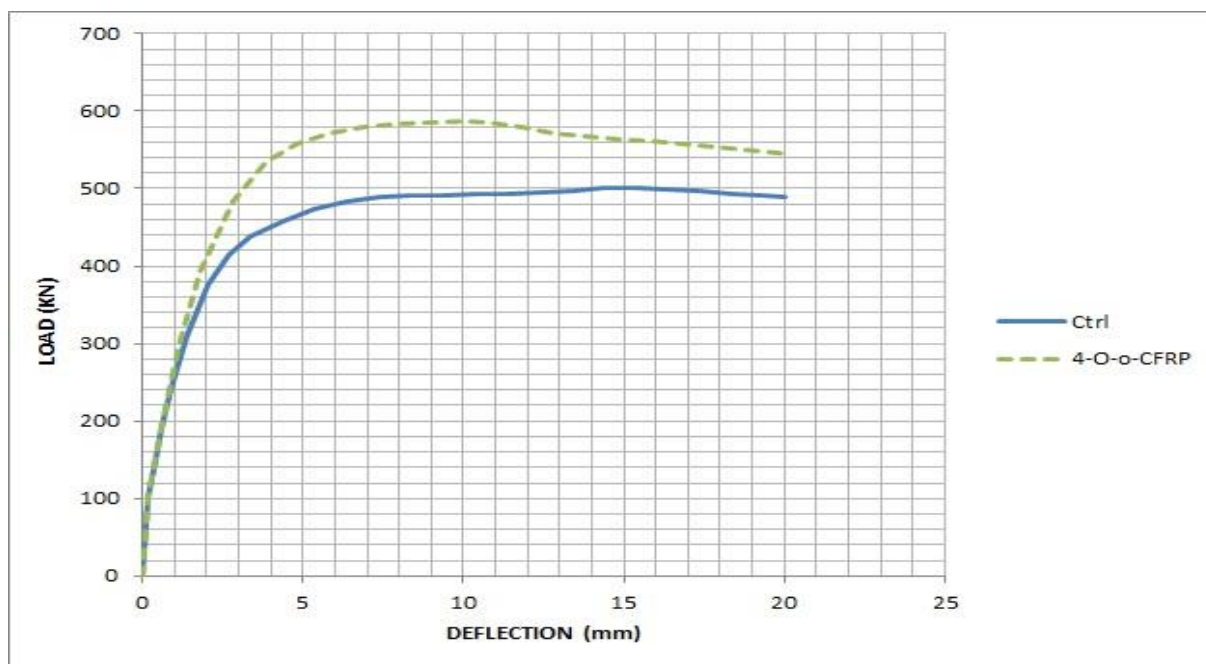
- روش دوم مقاومسازی:

برای مقاومسازی، صفحات CFRP در راستای آرماتورهای طولی به وجه کششی دال چسبانیده شده‌اند و فاصله صفحات از ستون ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد.



شکل (۴-۵) شبکه‌بندی نمونه تقویت شده 4-O-o-CFRP

نمودار بار- تغییرمکان نمونه تقویت شده با صفحات FRP و با مشخصات فوق به همراه نمودار بار- تغییرمکان نمونه تقویت نشده در شکل زیر آمده است:



شکل (۵-۵) نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های Ctrl و 4-O-o-CFRP

مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه ctrl و نمونه 4-O-o-CFRP و تغییرات نمونه تقویت شده نسبت به نمونه کنترلی در جدول زیر آمده است.

جدول (۴-۵): مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌های ctrl و 4-O-o-CFRP

نمونه	مقادیر نهایی	
	$P_u$ (KN)	$\Delta_u$ (mm)
ctrl	۵۰۰/۳۱	۱۴/۳۷
4-O-o-CFRP	۵۸۷/۵۹	۱۰/۱۲۰
تغییر نسبت به نمونه ctrl (%)	+ ۱۷/۴۵	- ۲۹/۶

مقادیر شکل پذیری اتصال و نیز درصد تغییر، شکل پذیری نمونه مطالعه شده در این بخش نسبت به شکل پذیری نمونه ctrl به صورت کمی در جدول زیر ارائه شده است.

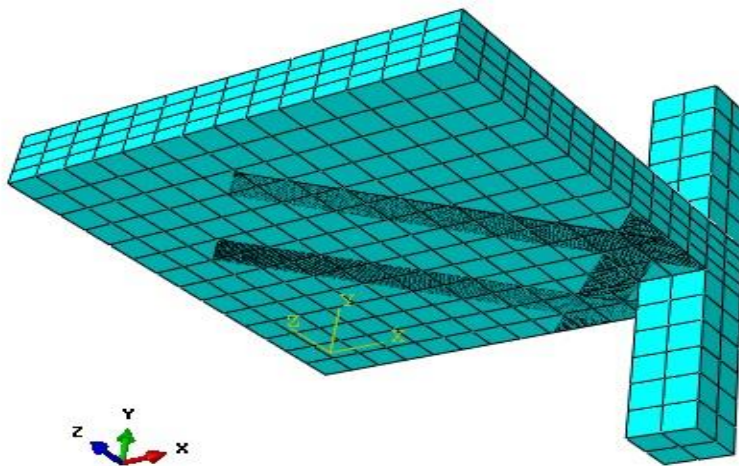
جدول (۵-۵): مقادیر شکل پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و 4-O-o-CFRP

نمونه	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_u$ (mm)	شکل پذیری اتصال
			$\mu$
ctrl	۶/۱۲۰	۱۴/۳۷	۲/۳۴۰
4-O-o-CFRP	۶/۴۵۰	۱۰/۱۲۰	۱/۵۶۰
تغییر شکل پذیری (%)			- ۳۳/۳



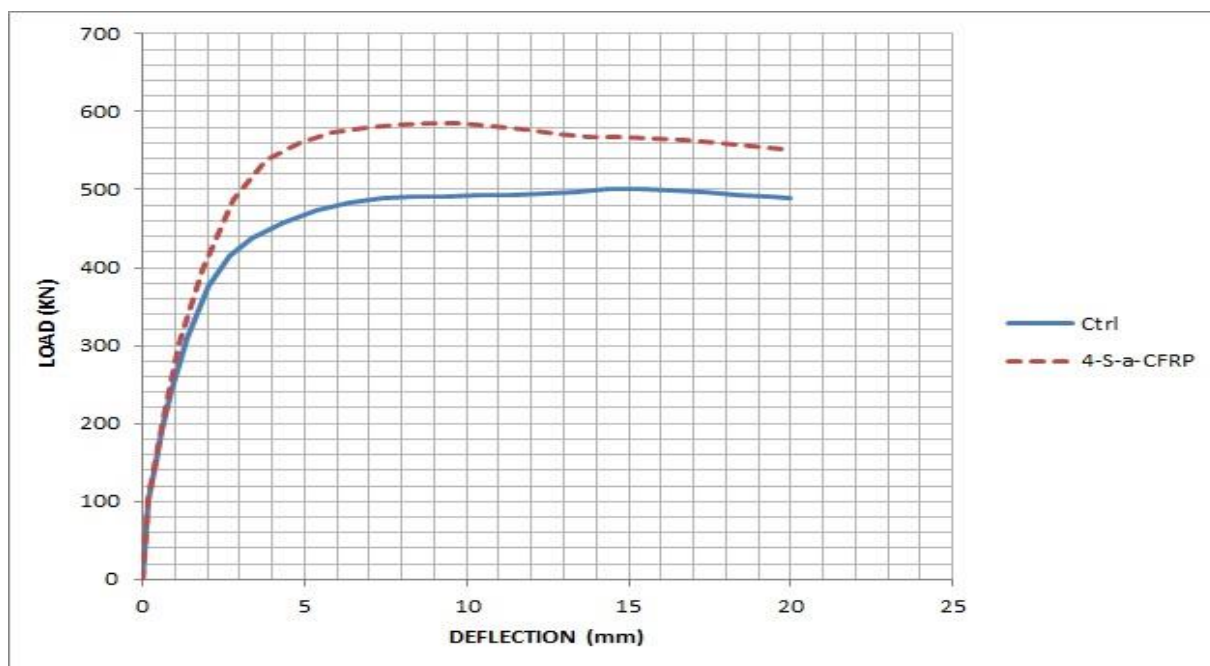
- روش سوم مقاومسازی:

برای مقاومسازی صفحات CFRP به صورت مورب و در نزدیکی ستون به وجه کششی دال چسبانیده شده‌اند.



شکل (۵-۶) شبکه‌بندی نمونه تقویت شده 4-S-a-CFRP

نمودار بار- تغییرمکان نمونه تقویت شده با صفحات FRP و با مشخصات فوق به همراه نمودار بار- تغییرمکان نمونه تقویت نشده در شکل زیر آمده است:



شکل (۵-۷) نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های Ctrl و 4-S-a-CFRP

مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه ctrl و نمونه 4-S-a-CFRP و تغییرات نمونه تقویت شده نسبت به نمونه کنترلی در جدول زیر آمده است.

جدول (۵-۶): مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌های ctrl و 4-S-a-CFRP

نمونه	مقادیر نهایی	
	$P_u$ (KN)	$\Delta_u$ (mm)
ctrl	۵۰۰/۳۱	۱۴/۳۷
4-S-a-CFRP	۵۸۵/۵۲	۹/۸۲۰
تغییر نسبت به نمونه ctrl (%)	+ ۱۷/۰۳	- ۳۱/۶۶

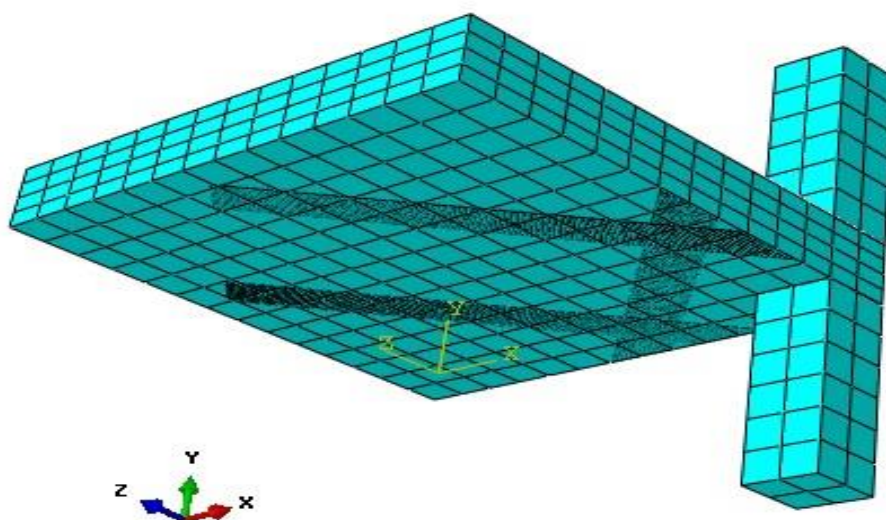
مقادیر شکل پذیری اتصال و نیز درصد تغییر، شکل پذیری نمونه مطالعه شده در این بخش نسبت به شکل پذیری نمونه ctrl به صورت کمی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۵-۷): مقادیر شکل پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و 4-S-a-CFRP

نمونه	شکل پذیری اتصال		
	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_u$ (mm)	$\mu$
ctrl	۶/۱۲۰	۱۴/۳۷	۲/۳۴۰
4-S-a-CFRP	۶/۳۱۰	۹/۸۲۰	۱/۵۵۰
تغییر شکل پذیری (%)			- ۳۳/۷۶

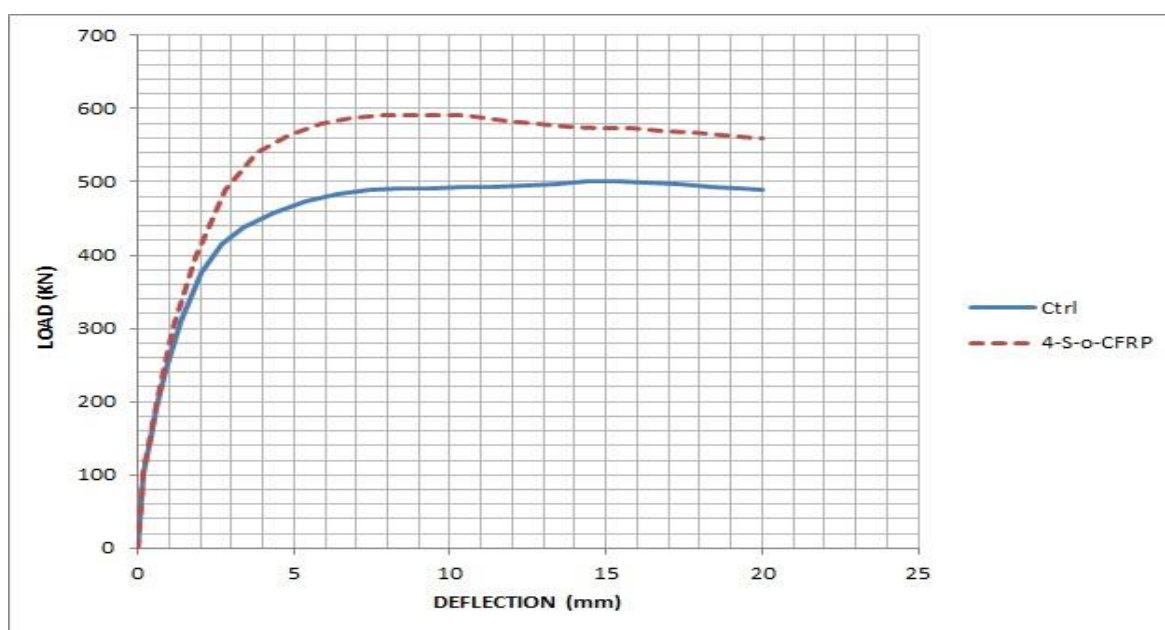
- روش چهارم مقاومسازی:

برای مقاومسازی صفحات CFRP به صورت مورب و با فاصله ۱۰۰ میلی متر از گوشه ستون به وجه کششی دال چسبانیده شده‌اند.



شکل (۸-۵) شبکه‌بندی نمونه تقویت شده 4-S-0-CFRP

نمودار بار- تغییرمکان نمونه تقویت شده با صفحات FRP و با مشخصات فوق به همراه نمودار بار- تغییرمکان نمونه تقویت نشده در شکل زیر آمده است:



شکل (۹-۵) نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های ctrl و 4-S-0-CFRP

مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه ctrl و نمونه 4-S-o-CFRP و تغییرات نمونه تقویت شده نسبت به نمونه کنترلی در جدول زیر آمده است.

جدول (۵-۸): مقادیر بار و تغییر مکان نمونه‌های ctrl و 4-S-o-CFRP

نمونه	مقادیر نهایی	
	$P_u$ (KN)	$\Delta_u$ (mm)
ctrl	۵۰۰/۳۱	۱۴/۳۷
4-S-o-CFRP	۵۹۱/۷۰۸	۱۰/۴۲۵
تغییر نسبت به نمونه ctrl (%)	+ ۱۸/۲۶	- ۲۷/۴۵

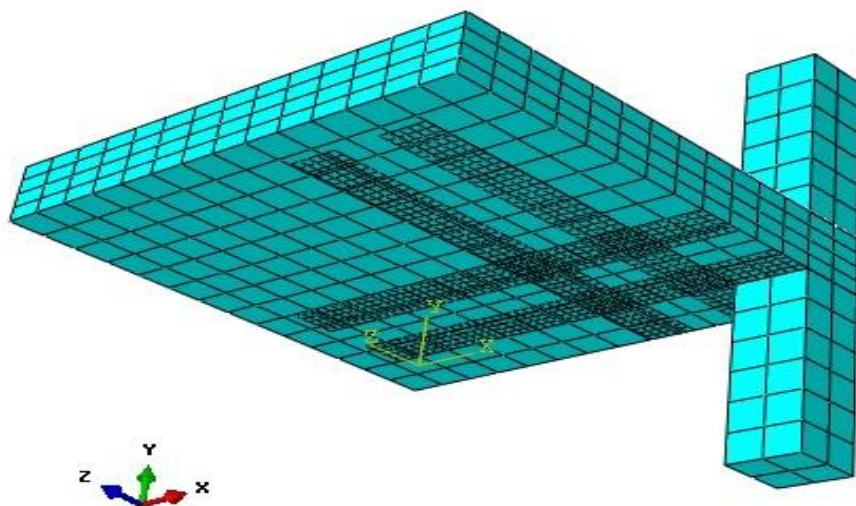
مقادیر شکل پذیری اتصال و نیز درصد تغییر، شکل پذیری نمونه مطالعه شده در این بخش نسبت به شکل پذیری نمونه ctrl به صورت کمی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۵-۹): مقادیر شکل پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و 4-S-o-CFRP

نمونه	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_u$ (mm)	شکل پذیری اتصال
			$\mu$
ctrl	۶/۱۲۰	۱۴/۳۷	۲/۳۴۰
4-S-o-CFRP	۶/۹۱۰	۱۰/۴۲۵	۱/۵۰۰
تغییر شکل پذیری (%)			- ۳۵/۸

- روش پنجم مقاومسازی:

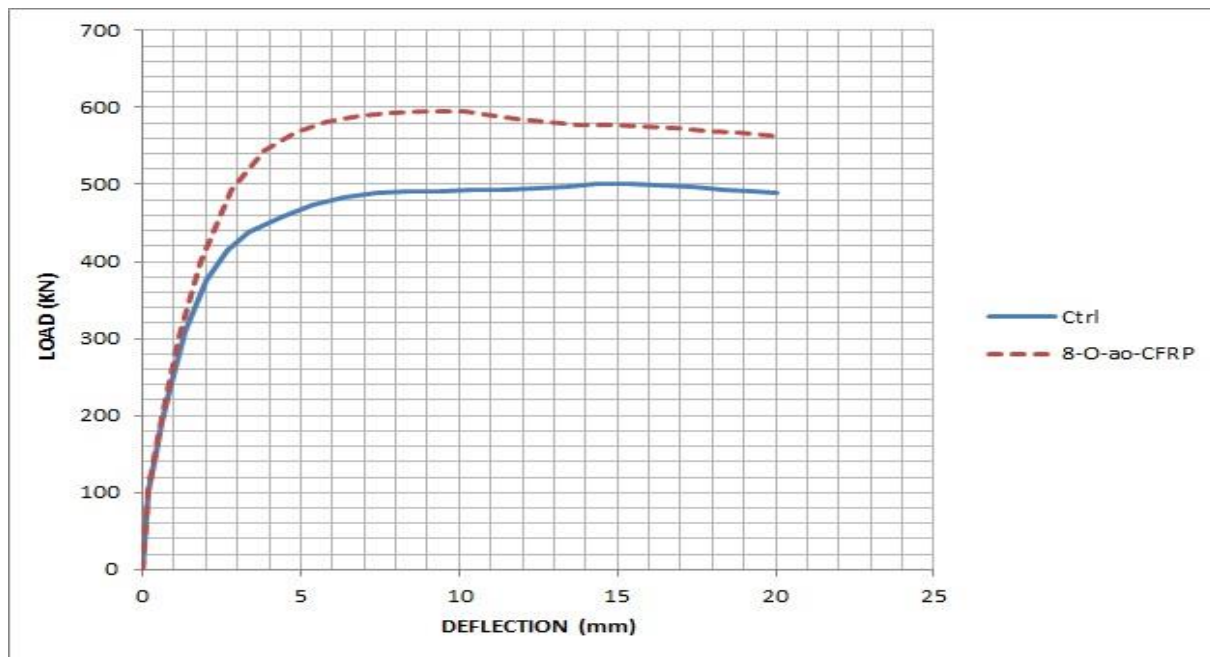
برای مقاومسازی تعداد ۸ صفحه CFRP در راستای آرماتورهای طولی به وجه کششی دال چسبانیده شده است، همچنین فاصله صفحات از یکدیگر ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد.



شکل (۵-۱۰) شبکه‌بندی نمونه تقویت‌شده 8-O-ao-CFRP

نمودار بار- تغییرمکان نمونه تقویت‌شده با صفحات FRP و با مشخصات فوق به همراه نمودار

بار- تغییرمکان نمونه تقویت‌نشده در شکل زیر آمده است:



شکل (۵-۱۱) نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های Ctrl و 8-O-ao-CFRP

مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه ctrl و نمونه 8-O-ao-CFRP و تغییرات نمونه تقویت شده نسبت به نمونه کنترلی در جدول زیر آمده است.

جدول (۵-۱۰): مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه‌های ctrl و 8-O-ao-CFRP

نمونه	مقادیر نهایی	
	$P_u$ (KN)	$\Delta_u$ (mm)
ctrl	۵۰۰/۳۱	۱۴/۳۷
8-O-ao-CFRP	۶۰۰	۱۰/۲۳۰
تغییر نسبت به نمونه ctrl (%)	+ ۱۹/۹۲	- ۲۸/۸۱

مقادیر شکل پذیری اتصال و نیز درصد تغییر، شکل پذیری نمونه مطالعه شده در این بخش نسبت به شکل پذیری نمونه ctrl به صورت کمی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۵-۱۱): مقادیر شکل پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و 8-O-ao-CFRP

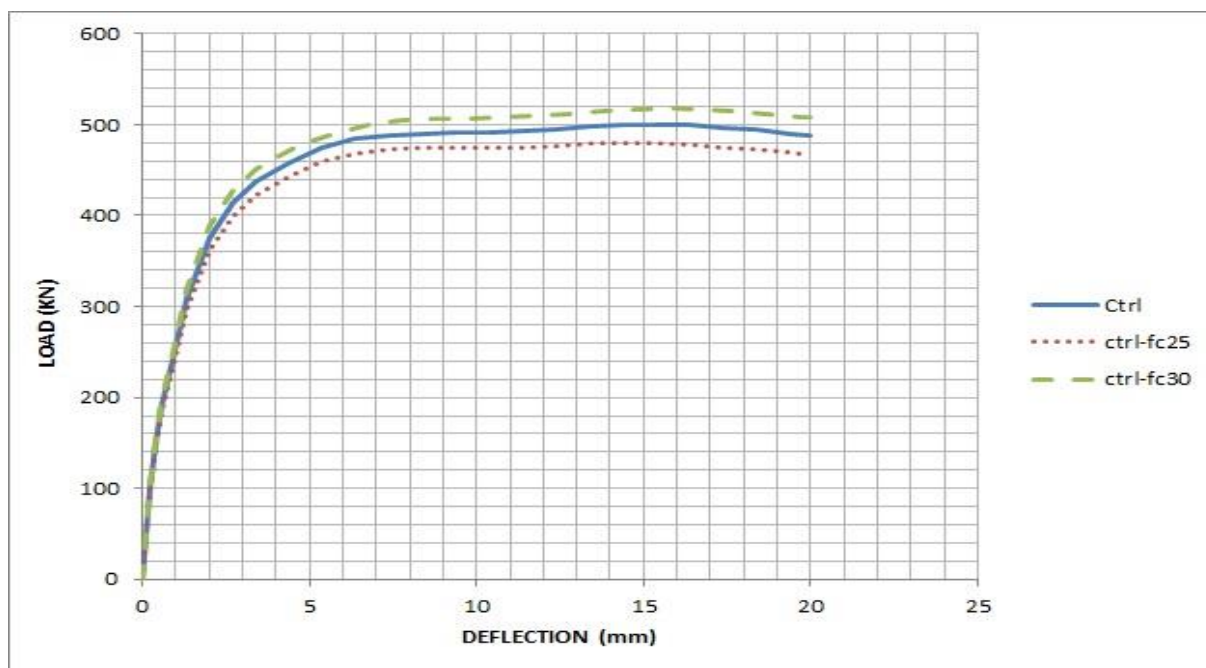
نمونه	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_u$ (mm)	شکل پذیری اتصال
			$\mu$
ctrl	۶/۱۲۰	۱۴/۳۷	۲/۳۴۰
8-O-ao-CFRP	۶/۳۲۰	۱۰/۲۳۰	۱/۶۱۰
تغییر شکل پذیری (%)			- ۳۱/۱۹

## ۵-۲-۲- مطالعات پارامتریک روی اتصالات دال- ستون مقاومسازی شده با صفحات پلیمری مسلح به الیاف (FRP)

### ۵-۲-۲-۱- بررسی تاثیر مقاومت فشاری بتن بر ظرفیت اتصال

مقاومت فشاری بتن به دلیل آن که در مقاومت حوزه فشاری بتن در هنگام وقوع برش پانچ نقش تعیین کننده‌ای دارد، عامل موثری در تعیین میزان ظرفیت باربری اتصال به حساب می‌آید. در این بخش به منظور بررسی تاثیر مقاومت فشاری بتن بر ظرفیت باربری و شکل‌پذیری اتصال، علاوه بر نمونه ctrl که با بتن با مقاومت فشاری  $27/5 \text{ Mpa}$  ساخته شده بود، ۲ نمونه دیگر که از لحاظ هندسی مشابه با نمونه ctrl ولی به ترتیب با بتن با مقاومت فشاری  $25 \text{ Mpa}$  و  $30 \text{ Mpa}$  ساخته شده بودند، مدل‌سازی شدند و به ترتیب تحت عناوین ctrl-d 25 و ctrl-d 30 نام گرفتند. در ادامه نمونه‌های فوق تحت کنترل تغییرمکان مورد تحلیل قرار گرفتند.

نمودارهای بار- تغییرمکان حاصل از تحلیل مدل‌های فوق به همراه نمودار بار- تغییرمکان نمونه ctrl در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل (۵-۱۲) نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های ctrl و ctrl-fc25 و ctrl-fc30

مقادیر بارهای نهایی و تغییرمکان متناظر با هر کدام از این بارها نیز برای هر سه نمونه در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۵-۱۲): مقادیر بار و تغییرمکان نهایی نمونه‌های ctrl و ctrl-fc25 و ctrl-fc30

نمونه	مقادیر نهایی	
	$P_u$ (KN)	$\Delta_u$ (mm)
ctrl	۵۰۰/۳۱	۱۴/۳۷
ctrl-fc 25	۴۷۹/۷۷	۱۳/۴۸
ctrl-fc 30	۵۱۸/۰۹	۱۵/۷۲

درصد تغییر مقادیر بار و تغییرمکان نهایی نمونه‌ها نسبت به نمونه ctrl در جدول زیر آمده است.

جدول (۵-۱۳): درصد تغییر مقادیر بار و تغییرمکان نهایی نمونه‌های ctrl-fc25 و ctrl-fc30 نسبت به نمونه ctrl

نمونه	تغییر مقادیر نهایی (درصد) نسبت به نمونه ctrl	
	$P_u$ (%)	$\Delta_u$ (%)
ctrl-fc 25	- ۴/۱۱	- ۶/۲۰
ctrl-fc 30	+ ۳/۵۵	+ ۹/۴۰

مقدار شکل‌پذیری اتصال و نیز درصد تغییر، شکل‌پذیری نمونه‌های مطالعه شده در این بخش نسبت به شکل‌پذیری نمونه ctrl به صورت کمی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۵-۱۴): مقادیر شکل‌پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و ctrl-fc25 و ctrl-fc30

نمونه	شکل‌پذیری اتصال			تغییر شکل‌پذیری (درصد) نسبت به نمونه ctrl
	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_u$ (mm)	$\mu$	
ctrl	۶/۱۲۰	۱۴/۳۷	۲/۳۴۰	----
ctrl-fc 25	۵/۹۸۰	۱۳/۴۸	۲/۲۵۰	- ۳/۸۴
ctrl-fc 30	۶/۱۷۰	۱۵/۷۲	۲/۵۴۰	+ ۸/۵۴



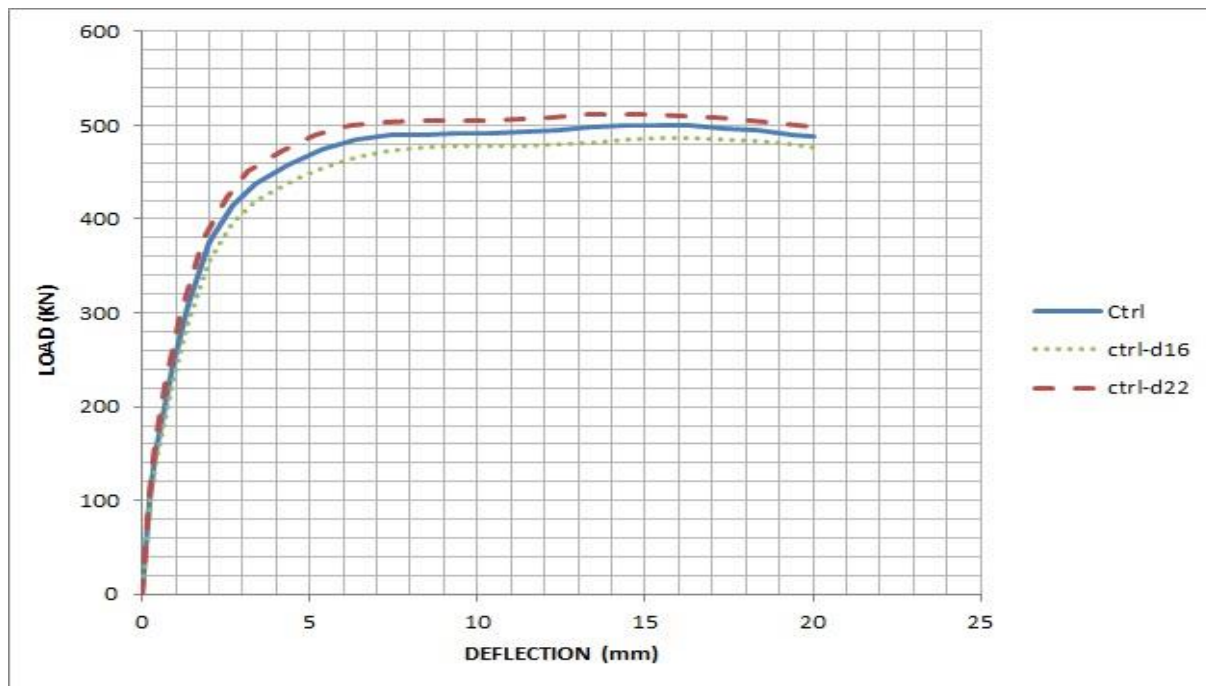
با توجه به نتایج حاصل مشاهده می‌شود افزایش مقاومت فشاری بتن باعث افزایش ظرفیت باربری نمونه‌ها شده است. همچنین با افزایش مقاومت فشاری بتن، ظرفیت تغییرمکان و مقدار شکل‌پذیری دال نیز افزایش یافته است.

ترک‌های پانچ که منجر به گسیختگی پانچ می‌گردند به طور ناگهانی شکل نمی‌گیرند و با شکل‌گیری ترک‌های ریز داخلی آغاز می‌گردند. به دلیل شکل‌گیری تدریجی ترک‌های ریز، مقاومت فولاد به تدریج فعال می‌شود. سرانجام گسیختگی برش پانچ در ناحیه فشاری و قبل از گسترش تسلیم‌شدگی به نواحی دورتر از مجاورت ستون به وقوع می‌پیوندد. همان‌طور که اشاره شد با افزایش مقاومت فشاری بتن، به دلیل افزایش مقاومت ناحیه بتن فشاری واقع در بالای ترک‌های مورب، شکست برش پانچ به تاخیر می‌افتد، بنابراین تنش در فولاد به تدریج فعال شده و تسلیم‌شدگی آرماتورها به نواحی دورتر از مجاورت ستون گسترش می‌یابد. لذا با به تاخیر افتادن شکست برش پانچ، آرماتورها فرصت بیشتری برای رفتار شکل‌پذیر یافته و در نتیجه ظرفیت تغییرمکان و مقدار شکل‌پذیری دال افزایش می‌یابد.

#### ۵-۲-۲-۲- بررسی تاثیر مقدار آرماتور بر ظرفیت اتصال

در این بخش به منظور بررسی تاثیر مقدار آرماتور بر ظرفیت باربری و شکل‌پذیری اتصال، علاوه بر نمونه ctrl که دارای آرماتور کششی نمره ۶ آمریکایی ( با قطر ۱۹ میلی‌متر) و به فواصل ۱۳۵ میلی‌متر در هر دو جهت بود، ۲ نمونه دیگر که از نظر هندسی با نمونه ctrl مشابه ولی به ترتیب دارای آرماتورهای کششی به قطر ۱۶ و ۲۲ میلی‌متر و به فواصل ۱۳۵ میلی‌متر در هر دو جهت بودند، مدل‌سازی شدند و به ترتیب تحت عناوین ctrl-d 16 و ctrl-d 22 نامگذاری شدند. در ادامه این نمونه‌ها تحت کنترل تغییرمکان مورد تحلیل قرار گرفتند.

نمودارهای بار- تغییرمکان حاصل از تحلیل مدل‌های فوق به همراه نمودار بار- تغییرمکان نمونه ctrl در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل (۵-۱۳) نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های ctrl و ctrl-d16 و ctrl-d22

مقادیر بارهای نهایی و تغییرمکان متناظر با هر کدام از این بارها نیز برای هر سه نمونه در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۵-۱۵): مقادیر بار و تغییرمکان نهایی نمونه‌های ctrl و ctrl-d16 و ctrl-d22

نمونه	مقادیر نهایی	
	$P_u$ (KN)	$\Delta_u$ (mm)
ctrl	۵۰۰/۳۱	۱۴/۳۷
ctrl-d 16	۴۸۶/۲۷	۱۶/۴۰
ctrl-d 22	۵۱۲/۲۶	۱۲/۹۷۰

درصد تغییر مقادیر بار و تغییرمکان نهایی نمونه‌ها نسبت به نمونه ctrl در جدول زیر آمده است. جدول (۵-۱۶): درصد تغییر مقادیر بار و تغییرمکان نهایی نمونه‌های ctrl-d16 و ctrl-d22 نسبت به نمونه ctrl

نمونه	تغییر مقادیر نهایی (درصد) نسبت به نمونه ctrl	
	Pu(%)	$\Delta u$ (%)
ctrl-d 16	- ۲/۸۰	+ ۱۴/۱۳
ctrl-d 22	+ ۲/۳۸	- ۹/۷۵

مقدار شکل‌پذیری اتصال و نیز درصد تغییر، شکل‌پذیری نمونه‌های مطالعه شده در این بخش نسبت به شکل‌پذیری نمونه ctrl به صورت کمی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۵-۱۷): مقادیر شکل‌پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و ctrl-d16 و ctrl-d22

نمونه	شکل‌پذیری اتصال			تغییر شکل‌پذیری (درصد) نسبت به نمونه ctrl
	$\Delta y$ (mm)	$\Delta u$ (mm)	$\mu$	
ctrl	۶/۱۲۰	۱۴/۳۷	۲/۳۴۰	----
ctrl-d 16	۶/۳۴۰	۱۶/۴۰	۲/۵۸۰	+ ۱۰/۲۵
ctrl-d 22	۵/۹۷۰	۱۲/۹۷۰	۲/۱۷۰	- ۷/۲۷

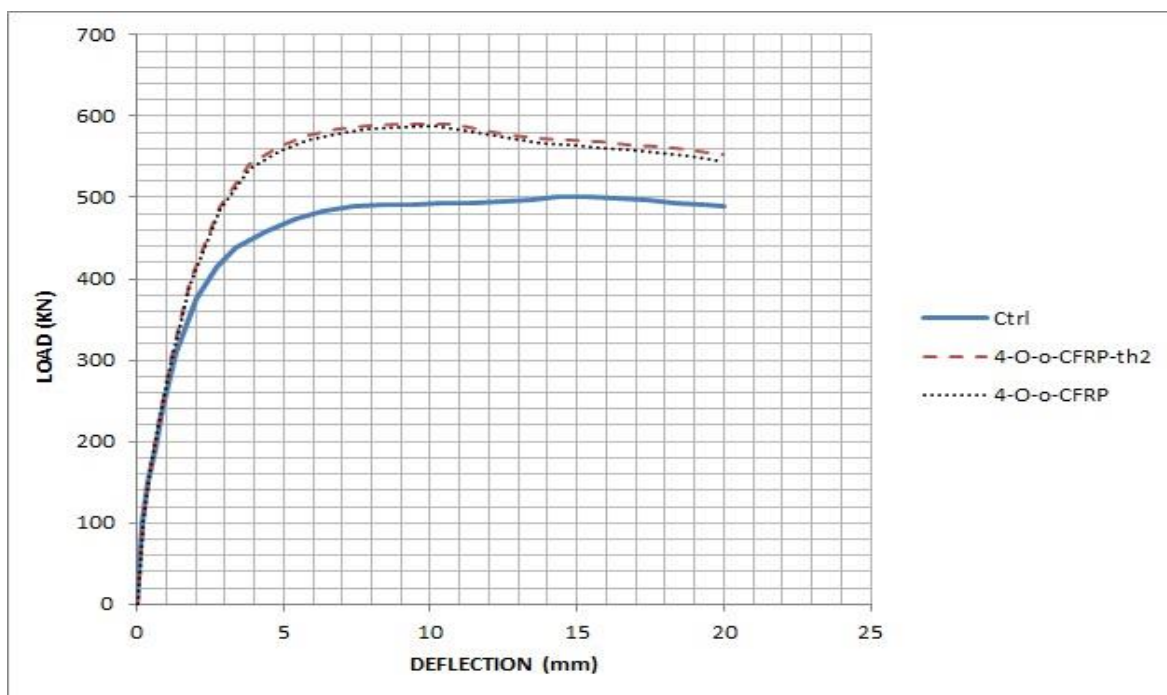
با توجه به نتایج فوق مشاهده می‌شود، افزایش در مقدار آرماتور باعث افزایش در ظرفیت باربری نمونه‌ها شده است. ولی با افزایش در مقدار آرماتور، ظرفیت تغییرمکان دال کاهش یافته است و همچنین مشاهده می‌شود با افزایش مقدار آرماتور، شکل‌پذیری اتصال کاهش یافته است.

با افزایش مقدار فولاد اتصال، قبل از گسترش تسلیم‌شدگی آرماتورها به نواحی دورتر از مجاورت ستون، گسیختگی برش پانچ در ناحیه بتن فشاری به وقوع می‌پیوندد. لذا تغییرمکان نهایی اتصال را کاهش می‌دهد. لیکن با کاهش مقدار فولاد اتصال، به دلیل کاهش نیروی مقاوم فولاد، تسلیم‌شدگی آرماتورها به نواحی دورتر از مجاورت ستون گسترش می‌یابد و شکست برش پانچ به تاخیر می‌افتد و آرماتورها فرصت بیشتری برای رفتار شکل‌پذیر یافته و در نتیجه ظرفیت تغییرمکان و مقدار شکل‌پذیری دال افزایش می‌یابد.

### ۵-۲-۲-۳- بررسی تاثیر ضخامت صفحات پلیمری مسلح بر ظرفیت اتصال

در این بخش جهت مطالعه تاثیر ضخامت صفحات پلیمری مسلح به الیاف بر ظرفیت اتصال، نمونه‌ای مشابه با نمونه 4-O-o-CFRP مدل‌سازی شد. لیکن جهت مقاوم‌سازی نمونه، از صفحات CFRP به ابعاد

۲ X ۱۰۰ X ۱۹۳۰ میلی‌متر که به وجه کششی نمونه چسبانیده شده بودند، استفاده شد. فاصله لبه ستون از صفحات CFRP برابر با ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نمونه حاصل تحت عنوان 4-O-o-CFRP-th2 نامگذاری شد، در ادامه نمونه فوق تحت کنترل تغییر مکان مورد تحلیل قرار گرفت. در نمونه مقاوم‌سازی شده 4-O-o-CFRP-th2 نیز، هیچ‌گونه ترک برشی در محدوده مسلح شده با صفحات CFRP مشاهده نشد و سطوح گسیختگی به خارج از ناحیه مسلح شده انتقال یافت. نمودار بار- تغییر مکان حاصل از تحلیل مدل فوق به همراه نمودار بار- تغییر مکان نمونه 4-O-o-CFRP نمایش داده شده است.



شکل (۵-۱۴) نمودار بار- تغییر مکان نمونه‌های Ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-CFRP-th2

مقادیر بار و تغییرمکان نهایی نمونه 4-O-o-CFRP و 4-O-o-CFRP-th2 در جدول زیر آمده است.

جدول (۵-۱۸): مقادیر بار- تغییرمکان ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-CFRP-th2

نمونه	مقادیر نهایی	
	$P_u$ (KN)	$\Delta_u$ (mm)
ctrl	۵۰۰/۳۱	۱۴/۳۷
4-O-o-CFRP	۵۸۷/۵۹	۱۰/۱۲۰
4-O-o-CFRP-th2	۵۹۰/۰۶	۱۰/۱۶۰

مقدار شکل‌پذیری نمونه‌های مطالعه شده در این بخش و شکل‌پذیری نمونه ctrl به صورت کمی در جدول زیر ارائه شده است.

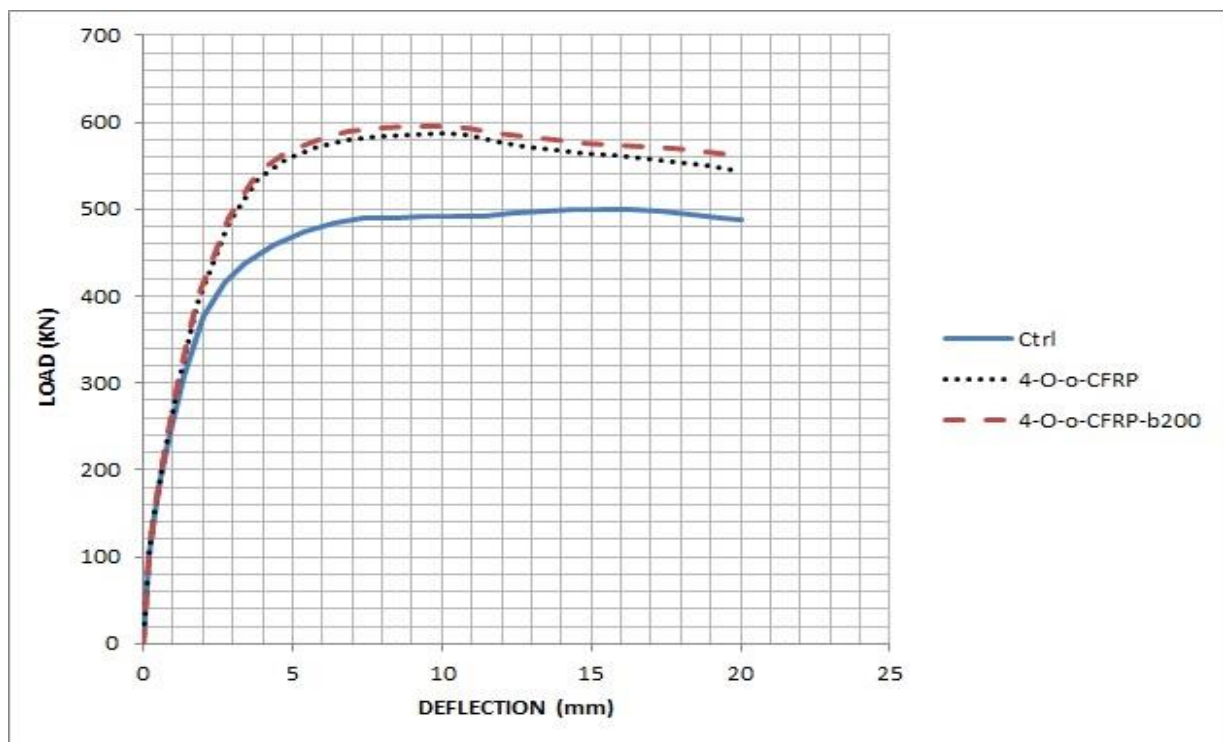
جدول (۵-۱۹): مقادیر شکل‌پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-CFRP-th2

نمونه	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_u$ (mm)	شکل‌پذیری اتصال
			$\mu$
ctrl	۶/۱۲۰	۱۴/۳۷	۲/۳۴۰
4-O-o-CFRP	۶/۴۵۰	۱۰/۱۲۰	۱/۵۶۰
4-O-o-CFRP-th2	۶/۶۸۰	۱۰/۱۶۰	۱/۵۲۰

با توجه به نتایج فوق مشاهده می‌شود، افزایش ضخامت صفحات پلیمری مسلح به الیاف از ۱ به ۲ میلی‌متر باعث افزایش ظرفیت باربری نمونه 4-O-o-CFRP-th2 به میزان ۰/۴۲ درصد، افزایش تغییر مکان نهایی آن به میزان ۰/۴ درصد و کاهش شکل‌پذیری اتصال به میزان ۲/۵۶ درصد نسبت به نمونه 4-O-o-CFRP شده است. مشاهده می‌گردد با افزایش ضخامت تسلیحات ماده مرکب، ظرفیت باربری و تغییرمکان نهایی دال به میزان جزئی افزایش یافته است. بنابراین نتیجه می‌شود صفحات CFRP با ضخامت ۱ میلی‌متر جهت انتقال سطح گسیختگی به خارج از ناحیه مسلح شده کافی می‌باشد.

## ۵-۲-۲-۴- بررسی تاثیر عرض صفحات بر ظرفیت اتصال

در این بخش جهت مطالعه تاثیر عرض صفحات پلیمری مسلح به الیاف بر ظرفیت اتصال، نمونه‌ای مشابه با نمونه 4-O-o-CFRP مدل‌سازی شد. لیکن جهت مقاوم‌سازی نمونه، از صفحات CFRP به ابعاد  $1930 \times 200 \times 1$  میلی‌متر که به وجه کششی نمونه چسبانیده شده بودند، استفاده شد. فاصله لبه ستون از صفحات CFRP برابر با ۱۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. نمونه حاصل تحت عنوان b200-4-O-o-CFRP نامگذاری شد. در ادامه نمونه فوق تحت کنترل تغییرمکان مورد تحلیل قرار گرفت. در نمونه مقاوم‌سازی شده 4-O-o-CFRP-b200 نیز، هیچ‌گونه ترک برشی در محدوده مسلح شده با صفحات CFRP مشاهده نشد و سطوح گسیختگی به خارج از ناحیه مسلح شده انتقال یافت. نمودار بار- تغییرمکان حاصل از تحلیل مدل فوق به همراه نمودار بار- تغییرمکان نمونه 4-O-o-CFRP نمایش داده شده است.



شکل (۵-۱۵) نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های Ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-CFRP-b200

مقادیر بار و تغییرمکان نهایی نمونه 4-O-o-CFRP و 4-O-o-CFRP-b200 در جدول زیر آمده است.

جدول (۲۰-۵): مقادیر بار- تغییرمکان ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-CFRP-b200

نمونه	مقادیر نهایی	
	$P_u$ (KN)	$\Delta_u$ (mm)
ctrl	۵۰۰/۳۱	۱۴/۳۷
4-O-o-CFRP	۵۸۷/۵۹	۱۰/۱۲۰
4-O-o-CFRP-b200	۵۹۵/۷۸	۱۰/۲۰۰

مقدار شکل‌پذیری نمونه‌های مطالعه شده در این بخش و شکل‌پذیری نمونه ctrl به صورت کمی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۲۱-۵): مقادیر شکل‌پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-CFRP-b200

نمونه	شکل‌پذیری اتصال		
	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_u$ (mm)	$\mu$
ctrl	۶/۱۲۰	۱۴/۳۷	۲/۳۴۰
4-O-o-CFRP	۶/۴۵۰	۱۰/۱۲۰	۱/۵۶۰
4-O-o-CFRP-b200	۶/۴۹۰	۱۰/۲۰۰	۱/۵۷۰

با توجه به نتایج فوق مشاهده می‌شود، افزایش عرض صفحات پلیمری مسلح به الیاف از ۱۰۰ به ۲۰۰ میلی‌متر باعث افزایش ظرفیت باربری نمونه 4-O-o-CFRP-b200 به میزان ۱/۴ درصد، افزایش تغییرمکان نهایی آن به میزان ۰/۸ درصد و افزایش شکل‌پذیری اتصال به میزان ۰/۶۴ درصد نسبت به نمونه 4-O-o-CFRP شده است. افزایش حاصل در ظرفیت باربری و تغییرمکان نهایی به این دلیل است که افزایش عرض تسلیحات ماده مرکب باعث انتقال سطوح مستعد گسیختگی برش پانچ به ناحیه‌ای دورتر از پایه ستون می‌گردد.

## ۵-۲-۲-۵- بررسی تاثیر جنس صفحات بر ظرفیت اتصال

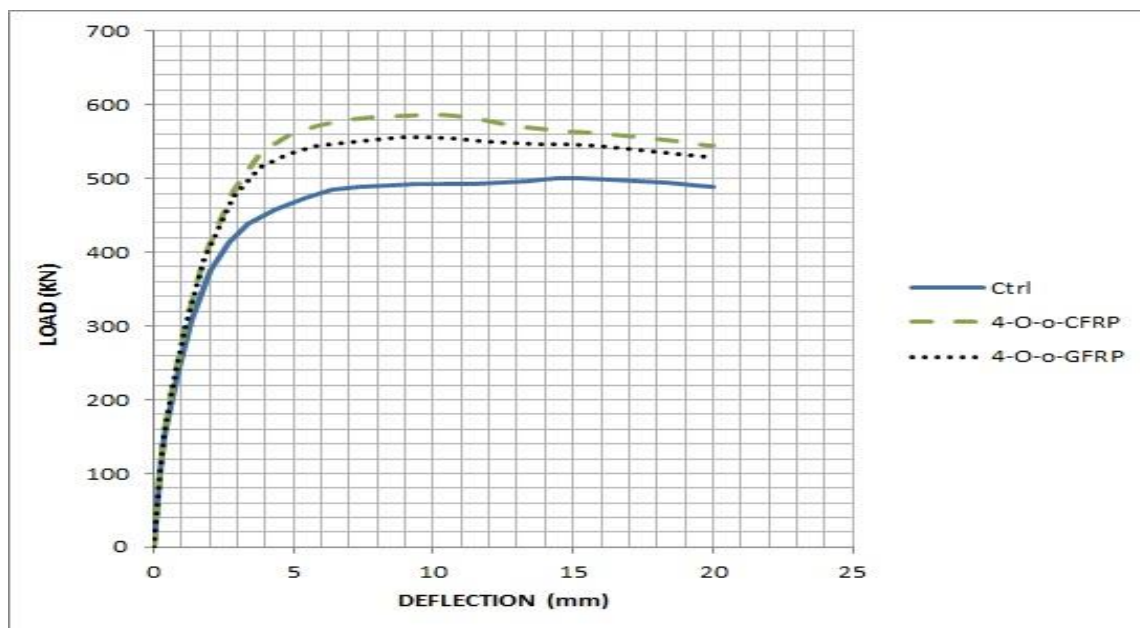
در این بخش تاثیر جنس صفحات پلیمری مسلح به الیاف روی ظرفیت اتصالات دال- ستون مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در این راستا نمونه‌ای مشابه با نمونه 4-O-o-CFRP مدل‌سازی شد، لیکن در مقاوم‌سازی دال به جای صفحات پلیمری کربنی (CFRP) از صفحات پلیمری شیشه‌ای (GFRP) استفاده گردید. نمونه حاصل تحت عنوان 4-O-o-GFRP نامگذاری شد. در ادامه نمونه تحت کنترل تغییرمکان مورد تحلیل قرار گرفت. در نمونه مقاوم‌سازی شده 4-O-o-GFRP نیز، سطح گسیختگی به خارج از ناحیه مسلح شده با صفحات GFRP انتقال یافت.

مشخصات مصالح صفحات GFRP مسلح کننده در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۵-۲۲)، مشخصات مصالح (GFRP)

نوع الیاف	مدول الاستیسیته (Gpa)	نسبت پواسون	مدول برشی (Gpa)	ضخامت لایه (mm)
GFRP	$E_x = 55$	$\nu_{xy} = 0.26$	$G_{xy} = 2.70$	1
	$E_y = 4.1$	$\nu_{yz} = 0.3$	$G_{yz} = 1.55$	
	$E_z = 4.1$	$\nu_{xz} = 0.26$	$G_{xz} = 2.70$	

نمودار بار- تغییرمکان حاصل از تحلیل مدل فوق به همراه نمودار بار- تغییرمکان نمونه 4-O-o-CFRP در شکل زیر نمایش داده شده است.



شکل (۵-۱۶) نمودار بار- تغییرمکان نمونه‌های ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-GFRP



مقادیر بار و تغییر مکان نهایی نمونه 4-O-o-CFRP و 4-O-o-GFRP در جدول زیر آمده است.

جدول (۵-۲۳): مقادیر بار - تغییر مکان ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-GFRP

نمونه	مقادیر نهایی	
	$P_u$ (KN)	$\Delta_u$ (mm)
ctrl	۵۰۰/۳۱	۱۴/۳۷
4-O-o-CFRP	۵۸۷/۵۹	۱۰/۱۲۰
4-O-o-GFRP	۵۵۶/۵۸	۸/۸۲۰

مقدار شکل‌پذیری نمونه‌های مطالعه شده در این بخش و شکل‌پذیری نمونه ctrl به صورت کمی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول (۵-۲۴): مقادیر شکل‌پذیری اتصال نمونه‌های ctrl و 4-O-o-CFRP و 4-O-o-GFRP

نمونه	شکل‌پذیری اتصال		
	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_u$ (mm)	$\mu$
ctrl	۶/۱۲۰	۱۴/۳۷	۲/۳۴۰
4-O-o-CFRP	۶/۴۵۰	۱۰/۱۲۰	۱/۵۶۰
4-O-o-GFRP	۶/۱۸۰	۸/۸۲۰	۱/۴۲۰

با توجه به نتایج فوق مشاهده می‌شود مقاوم‌سازی اتصال دال - ستون با استفاده از صفحات GFRP چسبیده به وجه کششی دال، باعث کاهش ظرفیت باربری نمونه 4-O-o-GFRP به میزان ۵/۲۸ درصد، کاهش تغییر مکان نهایی آن به میزان ۱۲/۸۵ درصد و کاهش شکل‌پذیری اتصال به میزان ۸/۹۷ درصد نسبت به نمونه 4-O-o-CFRP شده است. مورد اخیر دلیل محکمی بر کارایی بیشتر صفحات مسلح پلیمری کربنی نسبت به الیاف شیشه‌ای در مقاوم‌سازی اتصالات دال - ستون می‌باشد و مصالح CFRP را به عنوان یکی از مناسب‌ترین مصالح برای مقاوم‌سازی خمشی مطرح می‌کند.



## فصل ٦: تجزيه و تحليل نتايج

## ۱-۶- مقدمه

پس از مدل‌سازی عددی ۸ نمونه اتصال دال-ستون تقویت شده با صفحات FRP در فصل پنجم، در این فصل به محاسبه ظرفیت باربری و تغییرمکان نهایی این نمونه‌ها پرداخته شده و حالت بهینه قرارگیری صفحات FRP بدست آمده است.

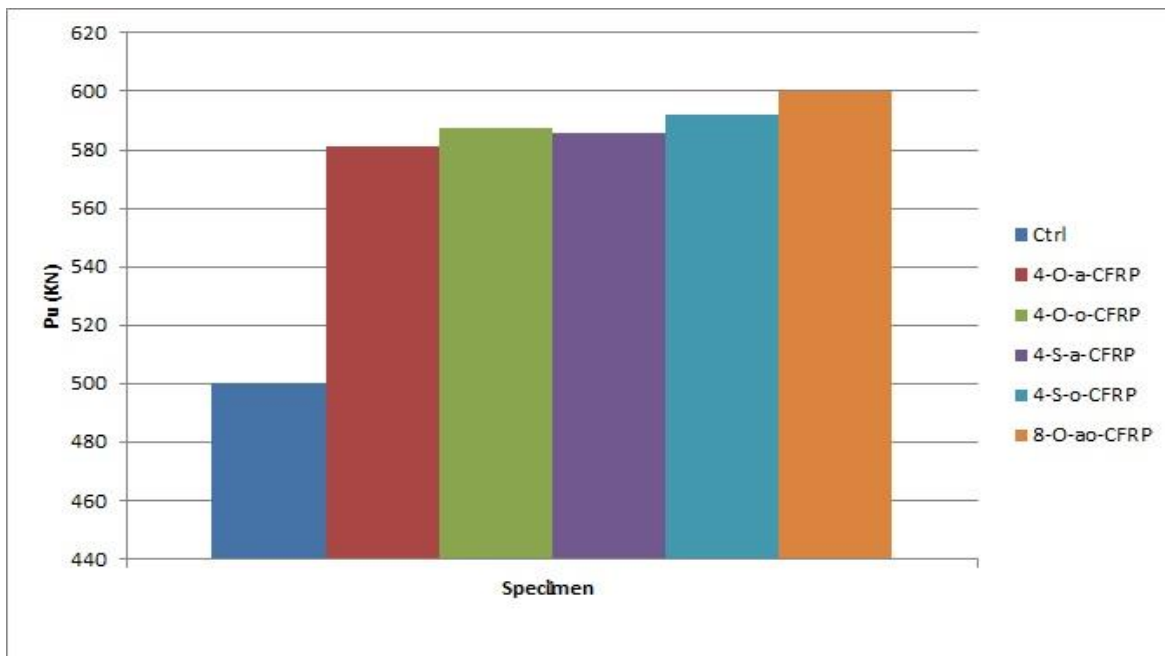
## ۲-۶- ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده

برای مقایسه ظرفیت باربری نمونه‌های اتصال دال-ستون تقویت شده با صفحات FRP در جدول زیر، با استفاده از نمودار بار-تغییرمکان در فصل پنجم، درصد افزایش ظرفیت باربری نمونه‌های تقویت شده نسبت به نمونه کنترلی نشان داده شده است.

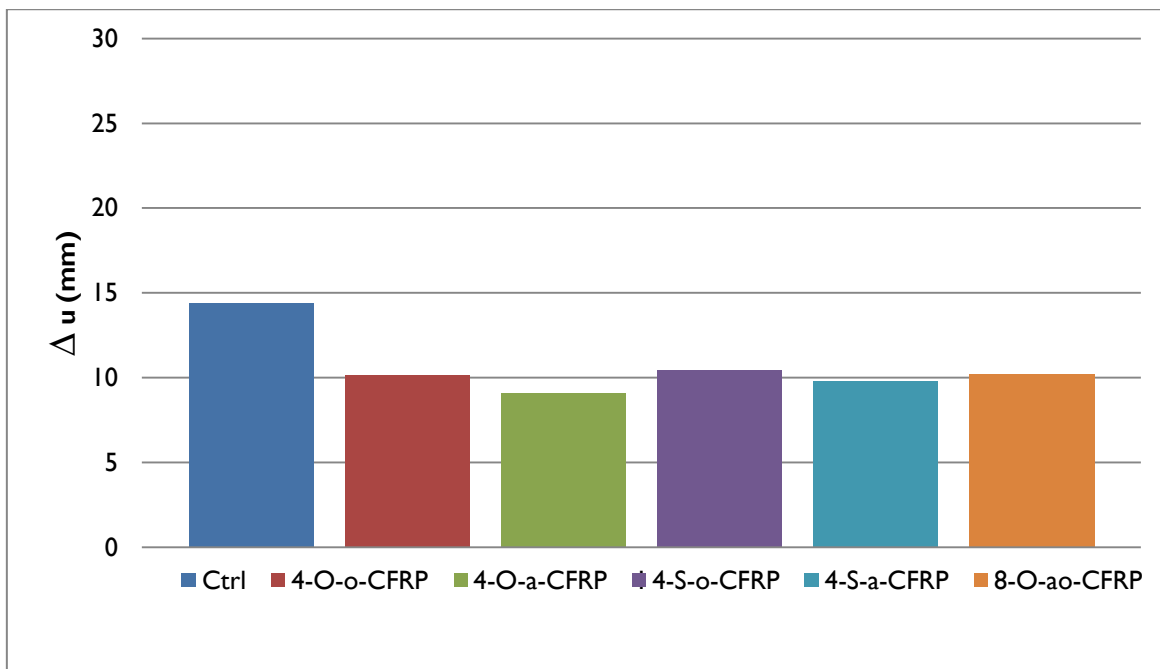
جدول (۱-۶)، مقایسه ظرفیت باربری نمونه‌ها

ردیف	نام نمونه	$\Delta_u$ (mm)	Pu (KN)	درصد افزایش ظرفیت باربری نسبت به ctrl
۱	Ctrl	۱۴/۳۷	۵۰۰/۳۱	-----
۲	4-O-a-CFRP	۹/۱۰۰	۵۸۱/۲۴	۱۶/۱۸
۳	4-O-o-CFRP	۱۰/۱۲۰	۵۸۷/۵۹	۱۷/۴۵
۴	4-S-a-CFRP	۹/۸۲۰	۵۸۵/۵۲	۱۷/۰۳
۵	4-S-o-CFRP	۱۰/۴۲۵	۵۹۱/۷۰۸	۱۸/۲۷
۶	8-O-ao-CFRP	۱۰/۲۳۰	۶۰۰	۱۹/۹۲

نمودارهای ستونی مقادیر بار و تغییرمکان نهایی نمونه‌های مطالعه شده در این بخش، در شکل (۱-۶) و (۲-۶) نمایش داده شده است.



شکل (۱-۶) نمودار ستونی مقادیر بار نهایی نمونه‌ها (KN)



شکل (۲-۶) نمودار ستونی مقادیر تغییرمکان نهایی نمونه‌ها (mm)

### ۳-۶- نتیجه‌گیری

- استفاده از صفحات CFRP به عنوان تقویت خمشی منجر به افزایش ظرفیت برش پانچینگ در دال‌های تخت می‌گردد. براساس نتایج تحلیلی این تحقیق، تحت اثر بارگذاری متقارن ظرفیت باربری نمونه‌های مختلف تقویت شده ۱/۱۶ تا ۱/۱۹ برابر نمونه‌های کنترلی گردید.
- با توجه به تغییرمکان نهایی نمونه‌های تقویت‌شده و کنترلی، مشاهده شد که نمونه کنترلی دارای بالاترین مقدار تغییرمکان در بار نهایی متناظر می‌باشد (این به دلیل مشاهده اثر سخت‌کنندگی CFRP است)، مقدار تغییرمکان در بار نهایی نمونه‌های تقویت شده بین ۶۳ تا ۷۳ درصد مقدار تغییرمکان در بار نهایی نمونه کنترلی بود.
- در میان نمونه‌های مختلف مقاوم‌سازی شده این تحقیق، نمونه‌های 8-O-ao-CFRP و 4-O-a-CFRP به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر ظرفیت باربری نهایی را از خود نشان دادند. افزایش در مقاومت، به مساحت CFRP و پیکربندی صفحات CFRP بستگی دارد.
- برای تعداد نوارهای CFRP مساوی، نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با پیکربندی مورب نسبت به نمونه‌های دارای پیکربندی متعامد، افزایش بیشتری در ظرفیت باربری و تغییرمکان نهایی از خود نشان دادند. بنابراین نتیجه می‌شود اثر نوارهای CFRP هنگامی بهینه خواهد بود که الیاف نوارهای CFRP به صورت مورب نسبت به ستون قرار گرفته باشند.
- با افزایش در تعداد نوارهای FRP و در نتیجه افزایش بعد ناحیه مسلح‌شده برشی، ظرفیت برش پانچ اتصال افزایش یافت، زیرا امکان انتقال ترک‌های برش پانچ و سطوح گسیختگی به ناحیه‌ای دورتر از ناحیه اتصال فراهم می‌شد.

- با افزایش مقاومت فشاری بتن، به دلیل افزایش مقاومت ناحیه بتن فشاری واقع در بالای ترک‌های مورب، شکست برش پانچ به تاخیر می‌افتد. لذا با به تاخیر افتادن شکست برش پانچ، آرماتورها فرصت بیشتری برای رفتار شکل‌پذیر یافته و در نتیجه ظرفیت تغییرمکان و مقدار شکل‌پذیری دال افزایش می‌یابد. افزایش مقاومت فشاری بتن از  $27/5$  به  $30$  مگاپاسکال موجب افزایش ظرفیت باربری و تغییرمکان نهایی اتصال به ترتیب به میزان  $3/55$  و  $9/40$  درصد گردیده است.
- با افزایش مقدار فولاد اتصال، قبل از گسترش تسلیم‌شدگی آرماتورها به نواحی دورتر از مجاورت ستون، گسیختگی برش پانچ در ناحیه بتن فشاری به وقوع می‌پیوندد، لذا تغییرمکان نهایی اتصال را کاهش می‌دهد. با افزایش قطر آرماتورهای کششی از  $19$  به  $22$  میلی‌متر موجب افزایش ظرفیت باربری به میزان  $2/38$  درصد و کاهش تغییرمکان نهایی اتصال به میزان  $9/75$  درصد گردیده است.
- افزایش ضخامت صفحات پلیمری مسلح به الیاف از  $1$  به  $2$  میلی‌متر باعث افزایش ظرفیت باربری نمونه 4-O-o-CFRP-th2 به میزان  $0/42$  درصد، افزایش تغییر مکان نهایی آن به میزان  $0/4$  درصد و کاهش شکل‌پذیری اتصال به میزان  $2/56$  درصد نسبت به نمونه 4-O-o-CFRP شده است. مشاهده می‌گردد با افزایش ضخامت تسلیحات ماده مرکب، ظرفیت باربری و تغییرمکان نهایی دال به میزان جزئی افزایش یافته است. بنابراین نتیجه می‌شود، صفحات CFRP با ضخامت  $1$  میلی‌متر جهت انتقال سطح گسیختگی به خارج از ناحیه مسلح شده کافی می‌باشد.

- افزایش عرض صفحات پلیمری مسلح به الیاف از ۱۰۰ به ۲۰۰ میلی‌متر باعث افزایش ظرفیت باربری نمونه 4-O-o-CFRP-b200 به میزان ۱/۴ درصد، افزایش تغییرمکان نهایی آن به میزان ۰/۸ درصد و افزایش شکل‌پذیری اتصال به میزان ۰/۶۴ درصد نسبت به نمونه 4-O-o-CFRP شده است. افزایش حاصل در ظرفیت باربری و تغییرمکان نهایی به این دلیل است که افزایش عرض تسلیحات ماده مرکب باعث انتقال سطوح مستعد گسیختگی برش پانچ به ناحیه‌ای دورتر از پایه ستون می‌گردد.
- مقاومت‌سازی اتصال دال - ستون با استفاده از صفحات GFRP چسبیده به وجه کششی دال، باعث کاهش ظرفیت باربری نمونه 4-O-o-GFRP به میزان ۵/۲۸ درصد، کاهش تغییرمکان نهایی آن به میزان ۱۲/۸۵ درصد و کاهش شکل‌پذیری اتصال به میزان ۸/۹۷ درصد نسبت به نمونه 4-O-o-CFRP شده است. مشاهده می‌شود صفحات مسلح پلیمری کربنی نسبت به الیاف شیشه‌ای در مقاومت‌سازی اتصالات دال - ستون کارایی بیشتری دارد.
- در هیچ کدام از نمونه‌ها نوارهای FRP از حداکثر ظرفیت خود استفاده نمی‌کنند، این امر به دلیل مقاومت کششی زیاد الیاف می‌باشد.



## ۴-۶- پیشنهادها برای تحقیقات آتی

برای تحقیقات آتی در ادامه روند این پایان‌نامه، پیشنهادهایی به شرح ذیل ارائه می‌شود:

- ۱- بررسی عملکرد نمونه‌های مقاوم‌سازی شده با استفاده از صفحات FRP در برابر بارهای تناوبی و نیز بازبینی کیفیت لرزه‌ای و صرفه اقتصادی روش مقاوم‌سازی مذکور از طریق مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی
- ۲- بررسی تاثیر تعداد لایه‌ها FRP شامل دو لایه یا سه لایه بر روی هم با ترکیبی از جنس صفحات شامل CFRP ، GFRP و AFRP ، بر ظرفیت اتصال.
- ۳- بررسی پیکربندی‌های مختلف قرارگیری خاموت‌های FRP اطراف ستون، جهت ایجاد یک سیستم مقاوم‌سازی بهینه.



## فصل ٧: مراجع

- [1] Rochdi EH, Bigaud D, Ferrier E, Hamelin P. Ultimate behavior of CFRP strengthened RC flat slabs under a centrally applied load. *Composite Structures*, 72 (2006) 69-78.
- [2] Binici B, Bayrak O. Punching shear strengthening of reinforced concrete flat plates using carbon fiber-reinforced polymer sheets. *Journal of Structural Engineering*, ASCE 129:9 (2003) 1173-1182.
- [3] Harajli MH, Soudki KA. Shear strengthening of interior slab-column connections using carbon fiber-reinforced polymer sheets. *Journal of Composites for Construction*, ASCE 7:2 (2003) 145-153.
- [۴] دریایی، امید رضائی فر " تقویت و بهسازی سازه‌های بتنی با مصالح FRP مفاهیم و کاربرد " ویرایش دوم، انتشارات علم و ادب، تهران، ۱۳۹۰.
- [5] Theodorakopoulos DD, Swamy RN. Ultimate punching shear analysis of slab-column connections. *Cement & Concrete Composites* 24 (2002) 509-521.
- [6] Menetrey Ph. Sythesis of punching failure in reinforced concrete. *Cement & Concrete Composites*, 24 (2002) 497-507.
- [7] Goodchild C.H, Moss R. Prefabricated punching shear reinforcement for reinforced concrete flat slabs. *The Concrete Society*, (2001) 1-4.
- [8] Goodchild C.H. Rationalisation of flat slab reinforcement. *BCA* 97:376 (2000) 1-4.
- [9] Pan A.D, Moehle J.P. An experimental study of slab-column connections. *ACI Structural Journal*, 89:6 (1992) 626-638.
- [10] Shaaban A.M, Gesund H. Punching shear Strength of steel fiber Reinforced concrete flat plates. *ACI Structural Journal*, 91:4 (1994) 406-414.
- [11] Erki M.A, Heffernan P.J. Reinforced concrete slabs externally strengthened with fiber reinforced plastics materials. *Proc., 2<sup>nd</sup> Int.Symp. on Non Metallic FRP*

Reinforcement for Concrete Structures, L.Taerwe,ed (1995) 509-516.

- [12] Tan K.H. Punching shear strength of RC slabs bonded with FRP systems. Proc., 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, (1996) 387-394.
- [13] Chen C.C, Li C.Y. Experimental study on the Punching shear behavior of RC slabs. Proc., Int. Workshop on Punching Shear Capacity on RC Slabs, (2000) 415-422.
- [14] El-Salakawy E, Soudki KA, Polak MA. New punching shear behavior of flat slabs strengthened with fiber reinforced polymer laminates. Journal of Composites for Construction, ASCE 8:5 (2004) 384-392.
- [15] Hong-Gun Park, Kyoung-Kyu Choi, Lan Chung. Strain-based strength model for direct punching shear of interior slab-column connections. Engineering Structures 33 (2011) 1062-1073.
- [16] Khaled Soudki, Ahmed K. El-Sayed, Tim Vanzwol. Strengthening of concrete slab-column connections using CFRP strips. Journal of King Saud University – Engineering Sciences (2012) 24, 25-33.
- [17] Sharaf MH, Soudki KA, Van Dusen M. CFRP strengthening for punching shear of interior slab-column connections. Journal of Composites for Construction, ASCE 10:5 (2006) 410-418.
- [18] Hibbitt, Karlsoon, Sorensen Inc, ABAQUS Standard user manual, version 5.6, Pub. HKS Inc, Rhode Island, NewYork, 1997.
- [19] ABAQUS standard users manual, version 6.9-1.
- [20] Ran Li, Young Sang Cho, Sumei Zhang. Punching shear behavior of concrete flat plate slab reinforced with carbon fiber reinforced polymer rods. ScienceDirect, Part B 38 (2007) 712-719.

- [21] Coronado C., Lopez M.M., “Sensitivity Analysis of concrete Beams Strengthened with FRP Laminates”, Cement and Concrete Composites, Elsevier Science Publisher, Vol.28, 102-114, 2006.
- [22] Hillerborg, A., Modeer, M., Petersson, P.E. “Analysis of Crack Formation and Crack Growth in concrete by means of Fracture Mechanics and Finite Elements”.Cement and Concrete Research, Vol. 6 , p. 773-782 , 1976.
- [23] Stein T, Ghali A, Dilger W. Distinction between punching and flexural failure modes of flat plates. ACI Structural Journal, 104:3 (2007) 357-365.
- [24] Hallgren M. Punching shear capacity of reinforced high strength concrete slabs, Bulletin No 23. Department of Structural Engineering, KTH, Stockholm, (1996).
- [25] Smadi M.M, Yasin I.S.B. Behavior of high-strength fibrous concrete slab-column connections under gravity and lateral loads. Constructions and Building Materials, (2008) In Press.
- [26] Ozden S, Ersoy U, Turan O. Punching shear tests of normal and high strength concrete flat plates. Canadian Journal of Civil Engineering, 33:11 (2006) 1389-1400.
- [27] Park H.G, Ahn K.S, Choi K,K, Chung L. Lattice shear reinforcement for slab-column connections. ACI Structural Journal, 104:3 (2007) 294-303.
- [28] Binici B, Bayrak O. Upgrading of slab-column connections using fiber reinforced polymers. Engineering Structures, 27 (2005) 97-107.
- [29] Sissakis K, Sheikh S.A. Strengthening Concrete Slabs for Punching Shear with Carbon Fiber-Reinforced Polymer Laminates. ACI Structural Journal,104:1 (2007) 49-59.
- [30] Michel L, Ferrier E, Bigaud D, Agbossou A. Criteria for punching failure mode in RC slabs reinforced by externally bonded CFRP. Composite Structures,81 (2007) 438-449.

- [31] Robertson LN, Johnson G. Repair of slab-column connections using epoxy and carbon fiber reinforced polymer. *Journal of Composites for Construction*, ASCE8:5 (2004) 376-383.
- [32] Elstner RC, Hognestad E. Shearing strength of reinforced concrete slabs. *ACI Structural Journal*, 53:7 (1956) 29-59.
- [33] EL-Salakawy E, Polak MA, Soudki KA. New shear strengthening technique for concrete slab-column connections. *ACI Structural Journal*, 100:3 (2003) 297-304.
- [34] ACI Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute (2002).
- [35] Hamed Salem, Heba Issa, Hatem Gheith, Ahmed Farahat. Punching shear strength of reinforced concrete flat slabs subjected to fire on their tension sides. *Housing and Building National Research Center* (2012) 1-8.
- [۳۶] کریملو، سهرابی، اژدری مقدم. بررسی رفتار دال‌های بتنی تقویت شده با الیاف FRP تحت بارهای غیرعادی. اولین کنفرانس پدافند غیرعامل و سازه‌های مقاوم، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، اسفند ۱۳۸۹.
- [۳۷] راهنمای طراحی و ضوابط اجرائی بهسازی ساختمان‌های بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP، نشریه شماره ۳۴۵ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور، ۱۳۸۵.
- [۳۸] شهبازی، یکرنگ‌نیا "راهنمای کاربردی Abaqus به همراه مسائل مهندسی عمران سازه و ژئوتکنیک" ویرایش اول، انتشارات علم عمران، تهران، ۱۳۹۲.
- [۳۹] طاحونی ش. طراحی ساختمان‌های بتن مسلح. انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۲.

## **Abstract:**

Flat slab systems are one of the most vulnerable structural systems that are susceptible to damage and collapse unless they are designed and detailed properly. The greatest disadvantage of those systems is the risk of brittle punching failure at the slab-column connection due to transfer of shear and unbalanced moment. The sudden and brittle nature of this phenomenon resulted in the progressive collapse of a number of buildings. Therefore there is a need to establish an effective, reliable and economical strengthening/upgrade method for them. Nowadays making use of FRP in strengthening is increasing because of their unique properties. In strengthening of slabs, FRP is using more often for flexural upgrade. But, use of FRP in the field of shear strengthening of slabs was paid attention fewer and was limited to few researches. This thesis will introduce shear upgrading schemes for slab-column connections using fiber reinforced polymers with ABAQUS finite element software. First to assurance from correctness of the numerical solution results, an experimental specimen was modeled in ABAQUS and the created analytical model was calibrated by experimental results. This examples in ABAQUS software a like quarter and dimensional (3D) was be modeling. After that you sure from accuracy modeling flow, the different states of setting FRP pages was be modeling and optimum state of that was got at the end of parametric ovservation on the example was get up, among ordinate, diameter, brand FRP pages was studied.

**Keywords:** R.C. flat slab, Punching shear, Strengthening, Finite element, FRP