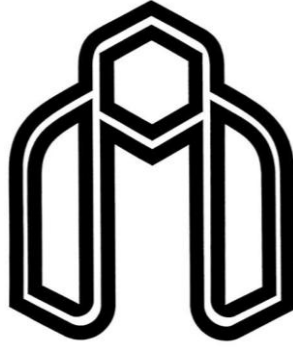


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

گروه عمران - سازه

پایان نامه کارشناسی ارشد

**بررسی رفتار میان قاب‌های مقاوم شده با  
پلیمرهای مسلح به الیاف (FRP)**

محقق:

حسین محمدی راد

استاد راهنما:

دکتر فرشید جندقی علایی

استاد مشاور:

دکتر وحیدرضا کلات جاری

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تابستان ۱۳۹۰



## دانشگاه صنعتی شاهرود دانشکده : عمران و معماری

گروه : عمران

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حسین محمدی راد

تحت عنوان: بررسی رفتار میان قابهای مقاوم شده با کامپوزیت‌های مسلح شده با الیاف FRP

در تاریخ ۱۳۹۰/۴/۲۱ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور:	امضاء	اساتید راهنما:
	نام و نام خانوادگی : دکتر وحیدرضا کلات جاری		نام و نام خانوادگی : دکتر فرشید علایی
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور:
	نام و نام خانوادگی : مهندس سید علی حسینی		نام و نام خانوادگی : دکتر احمد احمدی
			نام و نام خانوادگی : دکتر علی کیهانی

## سر آغاز

به نام خدای که نام او راحت روح است و پیغام او مفتاح فتوح  
است و سلام او وقت صباح مؤمنان را صبح است و ذکر او مرهم دل  
مجروح است و مهر او بلانشینان را کشتی نوح است.

ای کریمی که بخشنده عطایی و ای حکیمی که پوشنده خطایی و  
ای صمدی که از ادراک خلق جدایی و ای احدی که در ذات و صفات،  
بی‌همتایی و ای خالق که راهنمایی و ای قادری که خدایی را سزایی،  
جان ما را صفای خود ده و دل ما را هوای خود ده و چشم ما را  
ضیای خود ده و ما را آن ده که آن به و مگذار ما را به که و مه.

الهی، عذر ما را بپذیر؛ بر عیب‌های ما مگیر. الهی در دل‌های ما جز  
تخم محبت خود مکار و بر تن و جان‌های ما جز الطاف و مرحمت خود  
منگار و بر کشته‌های ما جز باران رحمت خود مبار.

(یکی از مناجات‌های خواجه عبدالله انصاری)

## تقدیم به:

پدر و مادر عزیزتر از جانم

آنانی که با راهنمایی‌ها و زحمات بی‌دریغشان

مسیر پیشرفت و خوشبختی را آشکار ساخته،

دعای خالصانه‌شان بدرقه راه

و وجودشان دلگرمی وجودم است.

# قدردانی

حال که به لطف و رحمت لایتناهی حضرت حق، مراحل این پایان نامه رو به اتمام نهاده، بر خود لازم دانسته تا از همه دوستانی که در پیشبرد اهداف این پایان نامه اینجانب را مساعدت و یاری نموده‌اند، سپاس و قدردانی به عمل آورم.

ابتدا بر خود لازم می‌دانم تا از زحمات و پشتیبانی بی‌دریغ و بی‌شائبه استاد محترم، جناب آقای دکتر فرشید علائی که راهنمایی این تحقیق را بر عهده داشته و از هرگونه راهنمایی و مساعدت مضایقه نکردند، تشکر و قدردانی ویژه‌ای داشته باشم. بی‌شک بدون حمایت و پشتیبانی ایشان انجام این تحقیق مقدور نمی‌بود.

هم‌چنین از جناب آقای دکتر وحیدرضا کلات جاری که به عنوان استاد مشاور، نقشی ارزنده و مکمل در انجام این پایان نامه داشتند سپاس‌گزاری کرده و موفقیت ایشان در مراحل زندگی را از خداوند متعال مسألت دارم.

از جناب آقای دکتر احمد احمدی ریاست محترم دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود به جهت مساعدت‌هایشان در طی دوره کارشناسی ارشد قدردانی می‌نمایم.

در انتها سپاس‌گزار کلیه دوستان و عزیزانی هستم که در مراحل مختلف تحصیلی مرا یاری نمودند؛ هرچند مجال برای بیان نام تک‌تک این دوستان نیست، لیکن همیشه خود را مرهون لطف و مهربانی آن‌ها دانسته و امید دارم به لطف الهی روزی توان جبران محبت‌هایشان را داشته باشم.

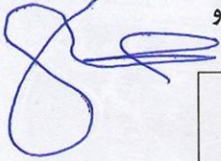
## تعهد نامه

اینجانب حسین محمدی راد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته عمران - سازه دانشکده عمران و معماری دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی رفتار میان قابهای مقاوم شده با کامپوزیت‌های مسلح شده با الیاف FRP تحت راهنمایی دکتر فرشید علایی 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 هیچ جا 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 پایان نامه / رساله تاثیر گذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه / رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه / رساله ، در مواردی که از موجود زنده (با 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: ۲۳، ۴، ۱۳۹۰

امضای دانشجو



### مالکیت نتایج و حق و نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب، برنامه های رایانه ای، 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 پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

\*متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیرشده پایان نامه / رساله وجود داشته باشد.

## چکیده

میان‌قاب‌های آجری یکی از انواع متداول میان‌قاب است که طبق روش‌های طراحی معمول از اثرات آن‌ها در رفتار سازه‌ای ساختمان‌ها صرف‌نظر شده و فقط به عنوان یک عضو غیر سازه‌ای، بار ثقلی آن در بارگذاری منظور می‌شود. در حالی که تحقیقات حاکی از این است که وجود میان‌قاب آجری تاثیر بسزایی در رفتار لرزه‌ای سازه دارد.

سازه‌های زیادی که با سیستم سازه‌ای قاب خمشی بتنی و وجود میان‌قاب ساخته شده‌اند و بدلائل مختلف از قبیل تغییر آئین‌نامه‌ها و ضعف اجراء نیاز به مقاوم‌سازی دارند محققین را به بررسی دقیق‌تر نقش میان‌قاب‌ها در رفتار سازه ترغیب کرده است. در گذشته تحقیقات بسیاری بر روی تقویت میان‌قاب‌ها در برابر نیروهای وارده انجام شده است. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که می‌توان از قابلیت‌های میان‌قاب برای مقاوم‌سازی کل سیستم استفاده کرد.

امروزه استفاده از پلیمرهای مسلح‌شده با الیاف (FRP)، یکی از پرکاربردترین روش‌های مقاوم‌سازی اعضای بتن مسلح می‌باشد. استفاده از این پلیمرها برای تقویت اعضای آجری چند سالیست که مورد توجه بوده است. با استفاده از تقویت میان‌قاب می‌توان خواص آن را از جمله خردشدگی و عدم رفتار انعطاف‌پذیر را بهبود بخشید و از این طریق می‌توان از آن برای تقویت کل سازه استفاده نمود.

اهتمام اصلی در این پایان‌نامه، مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن، دیوار آجری و رفتار خطی FRP



با استفاده از نرم‌افزار ANSYS می‌باشد. به منظور مدل‌سازی رفتار غیرخطی بتن، از معیار تسلیم ویلیام-وارنک استفاده شده است. پس از آن یک قاب یک طبقه یک دهانه در حالات ۱- بدون میان-قاب، ۲- با میان‌قاب آجری و ۳- با میان‌قاب آجری تقویت شده با صفحات FRP مدل‌سازی شده، صحت مدل‌های ارائه شده بر مبنای نتایج حاصل از آزمایشات انجام شده توسط سایر محققین مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بعد از اعتبارسنجی، به آزمایش و بررسی میزان بهبود رفتار سازه در اثر تقویت با شکل‌ها و ضخامت‌های مختلف لایه‌های FRP می‌پردازیم.

واژگان کلیدی: اجزاء محدود، میان‌قاب، کامپوزیت FRP، مقاوم‌سازی، قاب بتنی

## فهرست مطالب

فصل اول : پیشگفتار .....	۱
۱-۱ - پیشگفتار .....	۲
فصل دوم : آشنایی با مواد پلیمری مسلح به الیاف .....	۳
۱-۲ - مقدمه .....	۴
۲-۲ - کاربرد و شرایط استفاده .....	۵
۳-۲ - مواد تشکیل دهنده FRP .....	۵
۱-۳-۲ - رزینها .....	۶
۲-۳-۲ - الیاف .....	۶
۴-۲ - خصوصیات فیزیکی .....	۸
۱-۴-۲ - چگالی .....	۸
۲-۴-۲ - اثرات دمای بالا .....	۸
۵-۲ - خصوصیات مکانیکی .....	۹
۱-۵-۲ - رفتار کششی .....	۹
۲-۵-۲ - رفتار فشاری .....	۹
۶-۲ - انتخاب نوع سیستم FRP .....	۹
۱-۶-۲ - ملاحظات محیطی .....	۹
۲-۶-۲ - ملاحظات بارگذاری .....	۱۰
فصل سوم : کاربرد FRP در عمران .....	۱۲
۱-۳ - مقدمه .....	۱۳

- ۳-۲- تقویت سازه‌های موجود ..... ۱۳
- ۳-۲-۱- تقویت دیوارها و دال‌ها ..... ۱۳
- ۳-۲-۲- بهبود لرزه‌ای ستون‌ها ..... ۱۶
- ۳-۲-۳- تقویت تیرها و محل‌های اتصال ..... ۱۷

### فصل چهارم: پیشینه بررسی رفتار میان‌قاب‌های مقاوم شده با پلیمرهای مسلح شده

#### با الیاف (FRP) ..... ۱۸

- ۴-۱- مقدمه ..... ۱۹
- ۴-۲- تقویت میان‌قاب‌ها برای نیروهای خارج صفحه ..... ۲۱
- ۴-۳- تقویت میان‌قاب‌ها برای برش ..... ۲۴
- ۴-۴- تقویت میان‌قاب‌ها برای تحمل قسمتی از نیروهای جانبی وارد به ساختمان ..... ۲۶
- ۴-۴-۱- روش‌های تحلیل میان‌قاب‌های تقویت شده ..... ۲۷

### فصل پنجم: نحوه مدل‌سازی اعضای بتن‌آرمه، میان‌قاب آجری و FRP در نرم‌افزار

#### ANSYS ..... ۴۸

- ۵-۱- مقدمه ..... ۴۹
- ۵-۲- مروری بر مفهوم تحلیل غیرخطی ..... ۵۰
- ۵-۳- جایگاه و اهمیت کالیبراسیون نمونه‌ها ..... ۵۲
- ۵-۴- نکات قابل توجه در مدل‌سازی اجزای محدود یک عضو بتن‌آرمه ..... ۵۳
- ۵-۵- معرفی گزینه‌های المان‌ها، مدل‌های رفتاری و ثابت‌های حقیقی ..... ۵۳
- ۵-۶- مدل‌سازی بتن در نرم‌افزار ANSYS ..... ۵۴
- ۵-۶-۱- المان SOLID۶۵ ..... ۵۴
- ۵-۶-۲- مصالح (مدل رفتاری) مورد استفاده در شبیه‌سازی بتن ..... ۵۶

۶۱	۷-۵- مدل سازی آرماتورهای طولی و عرضی در نرم افزار ANSYS .....
۶۱	۱-۷-۵- قابلیت مدل سازی آرماتور در المان SOLID۶۵ .....
۶۲	۲-۷-۵- المان LINK۸ .....
۶۴	۳-۷-۵- مصالح (مدل رفتاری) مورد استفاده در شبیه سازی فولاد آرماتورها .....
۶۵	۸-۵- مدل سازی صفحات بارگذاری و تکیه گاهها در نرم افزار ANSYS .....
۶۵	۱-۸-۵- المان SOLID۴۵ .....
۶۵	۲-۸-۵- مدل های رفتاری در شبیه سازی صفحات بارگذاری و تکیه گاهها .....
۶۶	۹-۵- نحوه مدل سازی یک عضو بتن آرمه در ANSYS .....
<b>فصل ششم: بررسی صحت مدل سازی قاب، میان قاب آجری و FRP در نرم افزار</b>	
۷۰	<b>ANSYS</b> .....
۷۱	۱-۶- کالیبراسیون یک قاب بتن مسلح .....
۷۱	۱-۱-۶- ابعاد و مشخصات قاب بتن مسلح .....
۷۲	۲-۱-۶- مشخصات مصالح .....
۷۳	۳-۱-۶- داده های ورودی اجزای محدود .....
۷۸	۴-۱-۶- شبکه بندی مدل .....
۸۰	۵-۱-۶- بارگذاری و شرایط تکیه گاهی .....
۸۰	۶-۱-۶- روش تحلیل .....
۸۳	۷-۱-۶- نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی .....
۸۴	۲-۶- کالیبراسیون یک قاب بتن مسلح با میان قاب آجری .....
۸۵	۱-۲-۶- داده های ورودی اجزای محدود .....

۸۵	۶-۲-۲-المان و مدل رفتاری، برای مدل‌سازی دیوار آجری
۸۵	۶-۲-۳-نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی
۸۸	۶-۳-کالیبراسیون یک قاب بتن مسلح با میان‌قاب آجری تقویت شده با FRP
۸۹	۶-۳-۱-داده‌های ورودی اجزای محدود
۹۰	۶-۳-۲-المان و مدل رفتاری، برای مدل‌سازی FRP
۹۰	۶-۳-۳-نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود و مقایسه آنها با نتایج آزمایشگاهی
۹۱	۹۳ فصل هفتم: الگوهای مختلف تقویت دیوار میان‌قاب با FRP
۹۴	۷-۱-مقدمه
۹۴	۷-۲-نمونه‌های مورد آزمایش
۹۵	۷-۲-۱-نمونه‌های X
۹۵	۷-۲-۲-نمونه‌های S
۹۶	۷-۲-۳-نمونه‌های K
۹۷	۷-۲-۴-مشخصات مصالح
۹۹	۷-۳-نحوه اعمال بار
۱۰۰	۷-۴-نتایج آزمایش
۱۰۴	۷-۵-مقایسه نتایج
۱۰۴	۷-۵-۱-جذب انرژی
۱۰۵	۷-۵-۲-سختی
۱۰۵	۷-۵-۳-مقاومت

فصل هشتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ..... ۱۰۷

۱-۸ - نتیجه‌گیری ..... ۱۰۸

۲-۸ - پیشنهادات ..... ۱۱۰

مراجع ..... ۱۱۱

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۲-۱- اجزای تشکیل دهنده FRP [۱] ..... ۵
- شکل ۱-۳-۱- نحوه انجام آزمایش [۲] ..... ۱۴
- شکل ۲-۳-۲- نحوه آزمایش و نتایج [۲] ..... ۱۵
- شکل ۳-۳-۳- جزئیات نمونه آزمایش و نمودار نتایج آزمایش [۲] ..... ۱۶
- شکل ۱-۴-۱- مشخصات ساختمان مورد آزمایش [۳] ..... ۲۰
- شکل ۲-۴-۲- سازه طراحی شده برای توزیع مناسب نیروی زلزله بین طبقات [۳] ..... ۲۰
- شکل ۳-۴-۳- تعمیر ستون‌ها و اجرای میلگرد FRP به روش NSM بر روی دیوارها [۳] ..... ۲۱
- شکل ۴-۴-۴- نمونه‌های آزمایش و نمودار نتایج آزمایش [۴] ..... ۲۲
- شکل ۵-۴-۵- نمونه‌های آزمایش، مود شکست و نمودار نتایج آزمایش [۴] ..... ۲۳
- شکل ۶-۴-۶- نحوه تقویت نمونه‌ها [۵] ..... ۲۳
- شکل ۷-۴-۷- نحوه شکست نمونه‌ها [۶] ..... ۲۵
- شکل ۸-۴-۸- نحوه شکست نمونه‌ها [۶] ..... ۲۶
- شکل ۹-۴-۹- نحوه شکست نمونه‌ها و نتایج [۶] ..... ۲۶
- شکل ۱۰-۴-۱۰- نحوه تقویت و مدل سازه‌ای معادل [۷] ..... ۲۷
- شکل ۱۱-۴-۱۱- نمودار تنش-کرنش FRP و مصالح میان‌قاب [۷] ..... ۲۸
- شکل ۱۲-۴-۱۲- نمودارهای خروجی آزمایش [۷] ..... ۲۹
- شکل ۱۳-۴-۱۳- نحوه تقویت نمونه‌ها و مهار و نمودار نتایج خروجی [۸] ..... ۳۰
- شکل ۱۴-۴-۱۴- مشخصات نمونه‌ها [۹] ..... ۳۱
- شکل ۱۵-۴-۱۵- نحوه تقویت نمونه‌ها [۹] ..... ۳۲
- شکل ۱۶-۴-۱۶- نحوه آماده‌سازی FRP و تقویت [۹] ..... ۳۲

- شکل ۴-۱۷- سیستم آزمایش [۹] ..... ۳۳
- شکل ۴-۱۸- مشخصات نمونه‌ها [۱۰] ..... ۳۴
- شکل ۴-۱۹- نحوه تقویت نمونه‌ها [۱۰] ..... ۳۴
- شکل ۴-۲۰- مشخصات دستگاه اعمال آزمایش [۱۰] ..... ۳۵
- شکل ۴-۲۱- مکانیزم‌های خرابی [۱۰] ..... ۳۵
- شکل ۴-۲۲- نحوه آزمایش [۱۱] ..... ۳۶
- شکل ۴-۲۳- مشخصات نمونه‌ها و نحوه تقویت آن‌ها [۱۱] ..... ۳۷
- شکل ۴-۲۴- نحوه تقویت نمونه‌ها [۱۱] ..... ۳۸
- شکل ۴-۲۵- نمودار نتایج و تصویر شکست یکی از نمونه‌ها [۱۱] ..... ۳۸
- شکل ۴-۲۶- مشخصات نمونه‌ها و شکل تقویت [۱۲] ..... ۳۹
- شکل ۴-۲۷- نمودار نتایج و محل ترک‌ها [۱۲] ..... ۴۰
- شکل ۴-۲۸- نمونه‌ها پس از انجام آزمایش [۱۲] ..... ۴۱
- شکل ۴-۲۹- مشخصات نمونه‌ها و نحوه میلگرد گذاری [۱۳] ..... ۴۲
- شکل ۴-۳۰- انکرهای فیتیله‌ای [۱۳] ..... ۴۳
- شکل ۴-۳۱- چیدمان آزمایش [۱۳] ..... ۴۵
- شکل ۴-۳۲- منحنی نتایج [۱۳] ..... ۴۵
- شکل ۵-۱- مفهوم گام بارگذاری و زیرگام در تحلیل غیرخطی ..... ۵۱
- شکل ۵-۲- المان SOLID۶۵ به همراه دستگاه مختصات محلی [۱۷] ..... ۵۵
- شکل ۵-۳- سطح سه بعدی شکست بتن در فضای تنش‌های اصلی بر اساس معیار شکست ویلیام-وارنک [۱۶] ..... ۶۰
- شکل ۵-۴- مدل در نظر گرفته شده برای بتن تحت تنش کششی و پس از ترک‌خوردگی [۱۶] .... ۶۰
- شکل ۵-۵- جهت‌های المان پخش‌شده (Smeared)، با دستگاه مختصات SOLID۶۵ [۱۷] ..... ۶۲



- شکل ۵-۶- LINK۸ به همراه دستگاه مختصات محلی [۱۷] ..... ۶۳
- شکل ۵-۷- المان SOLID۴۵ به همراه دستگاه مختصات محلی [۱۷] ..... ۶۵
- شکل ۵-۸- مراحل اعمال گام‌های بارگذاری ..... ۶۹
- شکل ۶-۱- جزئیات ابعاد و آرماتورهای قاب بتنی ..... ۷۱
- شکل ۶-۲- مدل شبکه‌بندی شده قاب بتن مسلح ..... ۷۳
- شکل ۶-۳- منحنی تنش-کرنش تک‌محوری فشاری بتن [۱۶] ..... ۷۴
- شکل ۶-۴- منحنی تنش-کرنش بتن ..... ۷۵
- شکل ۶-۵- صفحه بارگذاری ..... ۷۸
- شکل ۶-۶- تأثیر تعداد المان‌ها در دقت نتایج حاصل از اجزای محدود ..... ۷۹
- شکل ۶-۷- شبکه‌بندی آرماتورهای طولی و عرضی قاب بتنی ..... ۷۹
- شکل ۶-۸- شرایط تکیه‌گاهی و اعمال بار قاب بتنی ..... ۸۰
- شکل ۶-۹- روش تکرار نیوتن-رافسون [۱۶] ..... ۸۱
- شکل ۶-۱۰- رفتار همگرایی طول کمان [۲۲] ..... ۸۲
- شکل ۶-۱۱- نمودارهای هیستریزیس آزمایشگاهی و اجزای محدود قاب بتنی ..... ۸۳
- شکل ۶-۱۲- تغییرشکل قاب بتن مسلح ..... ۸۴
- شکل ۶-۱۳- مدل میکرو (Micro Modeling) ..... ۸۵
- شکل ۶-۱۴- مدل ماکرو (Macro Modeling) ..... ۸۶
- شکل ۶-۱۵- شبکه‌بندی میان‌قاب آجری و قاب بتنی پیرامونی ..... ۸۶
- شکل ۶-۱۶- نمودارهای هیستریزیس آزمایشگاهی و اجزای محدود قاب بتنی با میان‌قاب ..... ۸۸
- شکل ۶-۱۷- تغییرشکل قاب همراه با میان‌قاب آجری ..... ۸۹
- شکل ۶-۱۸- المان SHELL۴۱ به همراه دستگاه مختصات محلی [۱۷] ..... ۹۰
- شکل ۶-۱۹- شبکه‌بندی میان‌قاب آجری و قاب بتنی پیرامونی و تقویت FRP ..... ۹۱

- شکل ۶-۲۰- نمودارهای هیستریزیس آزمایشگاهی و اجزای محدود قاب بتنی با میان قاب آجری تقویت شده با لایه‌های FRP ..... ۹۲
- شکل ۷-۱- نمای کلی نمونه‌های X ..... ۹۵
- شکل ۷-۲- نمای کلی نمونه‌های S ..... ۹۶
- شکل ۷-۳- نمای کلی نمونه‌های K ..... ۹۷
- شکل ۷-۴- تغییر مکان‌های اعمال شده به نمونه‌ها ..... ۹۹
- شکل ۷-۵- نمودار هیستریزیس نمونه‌های X-۱ و X-۲ ..... ۱۰۰
- شکل ۷-۶- نمودار هیستریزیس نمونه‌های X-۳ و X-۴ ..... ۱۰۱
- شکل ۷-۷- نمودار هیستریزیس نمونه‌های X-۵ ..... ۱۰۱
- شکل ۷-۸- نمودار هیستریزیس نمونه‌های S-۱ و S-۲ ..... ۱۰۲
- شکل ۷-۹- نمودار هیستریزیس نمونه‌های S-۳ و S-۴ ..... ۱۰۲
- شکل ۷-۱۰- نمودار هیستریزیس نمونه‌های S-۵ ..... ۱۰۲
- شکل ۷-۱۱- نمودار هیستریزیس نمونه‌های K-۱ و K-۲ ..... ۱۰۳
- شکل ۷-۱۲- نمودار هیستریزیس نمونه‌های K-۳ و K-۴ ..... ۱۰۳
- شکل ۷-۱۳- نمودار هیستریزیس نمونه‌های K-۵ ..... ۱۰۴
- شکل ۷-۱۴- مقایسه پوش منحنی هیستریزیس سه نمونه X-۳، S-۳ و K-۳ ..... ۱۰۵
- شکل ۷-۱۵- روند افزایش مقاومت نمونه‌ها در اثر افزایش ضخامت ..... ۱۰۶

## فهرست جداول

- جدول ۴-۱- مشخصات نمونه‌های آزمایش [۴] ..... ۲۲
- جدول ۴-۲- مشخصات نمونه‌های آزمایش [۵] ..... ۲۴
- جدول ۴-۳- مشخصات نمونه‌های آزمایش [۶] ..... ۲۵
- جدول ۴-۴- مشخصات مواد نمونه‌ها [۷] ..... ۲۸
- جدول ۴-۵- مشخصات نمونه‌ها [۹] ..... ۳۱
- جدول ۴-۶- مشخصات نمونه‌ها [۱۰] ..... ۳۳
- جدول ۴-۷- مشخصات نمونه‌ها [۱۱] ..... ۳۶
- جدول ۴-۸- مشخصات نمونه‌ها [۱۱] ..... ۳۷
- جدول ۴-۹- مقاومت نهائی نمونه‌ها [۱۲] ..... ۴۰
- جدول ۶-۱- مقادیر ورودی نمودار تنش-کرنش بتن به نرم‌افزار ..... ۷۵
- جدول ۶-۲- مشخصات ورودی بتن در نرم‌افزار برای مدل‌سازی قاب بتنی ..... ۷۶
- جدول ۶-۳- مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آرماتورهای طولی و عرضی قاب بتنی ..... ۷۷
- جدول ۶-۴- تنش تسلیم و مدول مماسی آرماتورهای طولی و عرضی قاب بتنی ..... ۷۷
- جدول ۶-۵- مدول الاستیسیته و ضریب پواسون صفحات بارگذاری قاب بتنی ..... ۷۸
- جدول ۶-۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود، برای قاب بتنی ..... ۸۴
- جدول ۶-۷- مشخصات ورودی در نرم‌افزار برای مدل‌سازی میان‌قاب ..... ۸۷
- جدول ۶-۸- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود، برای قاب بتنی ..... ۸۸
- جدول ۶-۹- مشخصات مکانیکی FRP، مورد استفاده در تقویت میان‌قاب بر حسب گیگاپاسکال ... ۹۱
- جدول ۶-۱۰- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود، برای قاب بتنی ..... ۹۲
- جدول ۷-۱- مشخصات ورودی بتن در نرم‌افزار برای مدل‌سازی قاب بتنی ..... ۹۷

- جدول ۷-۲- مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آرماتورهای طولی و عرضی قاب بتنی ..... ۹۷
- جدول ۷-۳- تنش تسلیم و مدول مماسی آرماتورهای طولی و عرضی قاب بتنی ..... ۹۷
- جدول ۷-۴- مشخصات نمونه‌ها ..... ۹۸
- جدول ۷-۵- مدول الاستیسیته و ضریب پواسون صفحات بارگذاری صلب قاب بتنی ..... ۹۸
- جدول ۷-۶- مشخصات ورودی در نرم‌افزار برای مدل‌سازی میان‌قاب ..... ۹۹
- جدول ۷-۷- مشخصات مکانیکی FRP، مورد استفاده در تقویت میان‌قاب بر حسب گیگاپاسکال .... ۹۹
- جدول ۷-۸- میزان جذب انرژی مدل‌های مختلف ..... ۱۰۴

# فصل اول

## پیشگفتار

## ۱-۱- پیشگفتار:

امروزه صنعت ساختمان پیشرفت‌های زیادی در زمینه مقاوم‌سازی در برابر زلزله داشته است و طراحی سازه‌ها بر اساس آئین‌نامه‌های جدید اطمینان خاطر بیشتری را در مواجهه با پدیده زلزله موجب می‌شود. با این وجود سازه‌های بسیاری وجود دارند که به سبب استفاده از آئین‌نامه‌های قدیمی یا اشتباه در محاسبات و فرضیات اولیه و یا عدم استفاده از آئین‌نامه به دلیل قدیمی بودن سازه، احتیاج به مقاوم‌سازی دارند. از این رو مهندسان همیشه علاوه بر طراحی و ساخت ساختمان‌های جدید، توجه بسیاری به امر مقاوم‌سازی و تعمیر سازه‌های آسیب دیده و ابداع روش‌های آسان‌تر و موثرتر برای مقاوم‌سازی سازه‌ها دارند.

میان‌قاب‌ها به عنوان یکی از متداول‌ترین اعضای که باید مورد مقاوم‌سازی و بهسازی قرار گیرند همیشه مورد توجه محققان بوده است. از این رو تحقیقات و آزمایش‌های بسیاری در زمینه مقاوم‌سازی میان‌قاب‌ها انجام شده است.

در تقویت میان‌قاب‌ها از روش‌های بسیاری استفاده می‌شود. یکی از این روش‌ها تقویت آنها به وسیله میلگردهای فولادی است که با اعمال اتصال‌های مناسب روش ساده و مؤثری به شمار می‌رود. روش دیگر، استفاده از <sup>۱</sup>ECC می‌باشد که به دلیل همگن بودن نسبی این مصالح و خاصیت سخت‌شدگی کرنشی آن نتایج خوبی را در پی دارد. روش سوم که موضوع بحث حاضر است روش تقویت میان‌قاب‌ها به وسیله صفحات یا لایه‌های FRP است که در فصل‌های بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تقویت میان‌قاب‌ها عموماً از سه جنبه بررسی می‌شود. (۱) تقویت میان‌قاب‌ها در برابر نیروهای هم‌صفحه (برشی). (۲) تقویت میان‌قاب‌ها در برابر نیروهای عمود بر صفحه. (۳) تقویت میان‌قاب‌ها به منظور مقاومت در برابر نیروهای هم‌صفحه و همچنین تحمل قسمتی از بارهای جانبی سازه.

---

<sup>۱</sup> Engineered Cementitious Composite

## فصل دوم

# آشنایی با مواد پلیمری

## مسلح به الیاف

## ۲-۱- مقدمه:

استفاده از مواد مرکب ساخته شده از الیاف در محیط پلیمری به عنوان پلیمرهای مسلح شده با الیاف یا FRP در بهسازی و مرمت سازه‌ها طی ۵۰ سال اخیر از رشد قابل توجهی برخوردار بوده است، که دلیل عمده آن نیاز به افزایش عمر بهره‌برداری و ارتقای اساسی زیرساخت‌ها در تمامی نقاط دنیا می‌باشد.

استفاده کاربردی از مواد FRP به سال‌های جنگ جهانی دوم برمی‌گردد. در آن زمان از FRP به عنوان یک ماده پلیمری در ساخت سازه‌های نظامی استفاده می‌شد. پس از جنگ جهانی ابتدا FRP به صورت یک جسم شیشه‌ای جامد برای ساخت چوب ماهی‌گیری و گلف، پایه پرچم و چوب اسکی و ... مورد استفاده قرار می‌گرفت. به تدریج به دلیل مقاومت کششی و فشاری بالا و همچنین قابلیت نارسایی الکتریکی در ساخت تجهیزات الکتریکی به کار رفت. سهولت در تولید و امکان دستیابی به شکل‌های پیچیده این ترکیبات نسبتاً گران موجب شد که به سرعت جای خود را در میان طراحان باز کند. در سال ۱۹۶۵ تکنولوژی FRP با تولید رزین‌های مخصوص گسترش یافت. پس از آن در اروپا از سیستم‌های FRP به عنوان جایگزینی برای ورق‌های فولادی متصل‌شده به نواحی کششی قطعات بتنی جهت افزایش مقاومت خمشی استفاده شد. تحقیقات در این زمینه تقریباً از سال‌های ۱۹۳۰ به بعد در آمریکا آغاز شده بود. ولی بررسی جدی این مسأله به اواسط سال‌های ۱۹۸۰ برمی‌گردد. در این سال‌ها کشورهای نظیر آلمان و ژاپن تحقیقات آزمایشگاهی زیادی در این زمینه انجام دادند. در ژاپن برای اولین بار از FRP برای تقویت ستون‌های بتنی استفاده شد. پس از وقوع زلزله HyogokenNanbu در سال ۱۹۹۵ استفاده از این مواد به طور قابل ملاحظه‌ای در این کشور افزایش یافت. در سوئیس برای اولین بار FRP در تقویت پل‌های بتنی به کار گرفته شد.



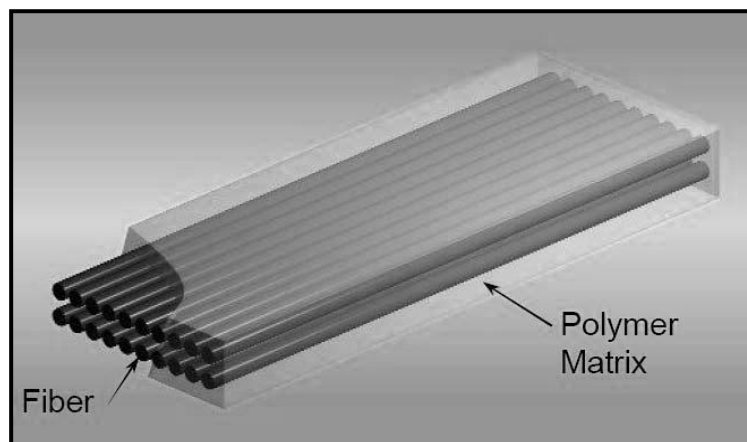
## ۲-۲- کاربرد و شرایط استفاده

سیستم‌های FRP می‌توانند به منظور بازسازی یا حفظ استحکام یک عضو سازه‌ای فرسوده، مرمت یا مقاوم‌سازی عضو سازه‌ای سالم به منظور تحمل بارهای افزایش یافته به سبب تغییر در کاربری سازه و یا جبران خطاهای طراحی و اجرا، به کار روند. این سیستم‌ها با نصب بر روی سطح دال‌ها، تیرها و ستون‌ها در ساختمان‌های مسکونی، تجاری، صنعتی، و تکیه‌گاه‌های ماشین‌آلات تاسیسات سنگین، سازه‌های آبی از قبیل، کانال‌ها، پل‌ها، مخازن و منابع آب و مایعات، سیلوها و برج‌های خنک‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرند.

برای استفاده از سیستم FRP در پروژه‌های خاص، لازم است وضعیت موجود سازه از قبیل ظرفیت باربری، شناسایی نقایص و عوامل آن و شرایط سطوح بتن ارزیابی شود. ارزیابی کمی می‌تواند شامل بازرسی دقیق میدانی و اخذ اطلاعات لازم، مروری بر مدارک طراحی موجود سازه اجرا شده و تحلیل سازه باشد.

## ۲-۳- مواد تشکیل دهنده FRP

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



شکل ۲-۱- اجزای تشکیل دهنده FRP [۱]

## ۲-۳-۱- رزین‌ها

طیف گسترده‌ای از رزین‌های پلیمری شامل اندودها، خمیرها، پرکننده‌ها، بتونه‌ها و چسب‌ها در سیستم‌های FRP استفاده می‌شوند. از جمله متداول‌ترین رزین‌ها می‌توان به اپوکسی‌ها، وینیل‌استرها و پلی‌استرها اشاره کرد که در گستره وسیعی از شرایط محیطی به کار می‌روند. از مهم‌ترین خواص این رزین‌ها می‌توان به مقاومت بالا، قابلیت چسبندگی عالی به بسیاری از مواد همچون فلزات، بتن، چوب، شیشه، سرامیک، مقاومت شیمیایی بالا به ویژه در محیط‌های قلیایی و ... اشاره نمود.

نقش اصلی رزین‌ها در مواد کامپوزیت را می‌توان به صورت زیر برشمرد:

- انتقال برش از فیبر تقویتی به ماده مجاور
- محافظت از فیبر در برابر شرایط محیطی
- جلوگیری از خسارت‌های مکانیکی وارد به سیستم FRP
- کنترل کمانش موضعی فیبر تحت فشار

## ۲-۳-۲- الیاف

الیاف اصلی‌ترین عنصر در سیستم FRP است که سختی و مقاومت این سیستم را تشکیل داده و بالاترین کسر حجمی را در ساختار آن در بر می‌گیرد.

عملکرد الیاف تقویتی بستگی به جهت قرارگیری الیاف، طول، شکل، جنس و ترکیب آن با رزین پلیمری دارد. بنابراین انتخاب صحیح هر یک از این مشخصه‌ها تأثیر بسزایی در خصوصیات مختلف آن نظیر جرم مخصوص، استحکام کششی، مدول کششی، استحکام فشاری، مکانیزم شکست، قیمت و دیگر خواص آن خواهد داشت.

عمده‌ترین الیاف مصرفی در ساختار سیستم FRP، شیشه، کربن و آرمید می‌باشد که در ادامه

هر یک به اختصار تشریح می‌شوند.

## ۲-۳-۱- الیاف شیشه

این الیاف بالاترین حجم مصرف را دارند. و عمومی‌ترین نوع الیاف مصرفی در ساختار مواد مرکب می‌باشند. قیمت نسبتاً پایین، استحکام کششی بالا، مقاومت شیمیایی بالا و خواص عایق (حرارتی - الکتریکی) از جمله مزایای این الیاف می‌باشد. همچنین وجود خواصی مانند شکنندگی، مقاومت خستگی نسبتاً پایین، مدول نسبتاً پایین در مقایسه با دیگر الیاف و حساسیت به سایش موجب محدودیت در استفاده از آنها می‌شود. انواع اشکال موجود الیاف شیشه عبارتند از: الیاف به صورت نخ (yarn)، رشته‌ای (roving)، پارچه‌ای در انواع بافت‌ها (ساده، زاویه‌دار، چند لایه زاویه‌ای در وزن‌های مختلف)، سوزنی و نمدی (با الیاف به طول ۲۵ cm و الیاف بلند پیوسته)، نواری و به صورت سه بعدی (ترکیبی از سوزنی، پارچه زاویه‌دار و رشته‌ای).

## ۲-۳-۲- الیاف آرامید

این الیاف در دهه ۷۰ میلادی وارد بازار شدند و دارای ترکیبات عالی آروماتیک از کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن (پلی آمید آروماتیک) می‌باشند. همچنین از طریق ریسندگی محلول پلی‌آمید با زنجیره بلند تهیه می‌شوند. از مزایای این الیاف می‌توان به جرم مخصوص پایین، مدول کششی بالا، استحکام کششی بالا، مقاومت بالا در برابر ضربه اشاره نمود. از طرفی وجود خواصی همچون مقاومت فشاری پایین، مشکلات برشکاری و حساسیت به نور ماوراء بنفش و نورخورشید (کاهش قابل ملاحظه‌ای در استحکام کششی و رنگ‌پریدگی) باعث محدودیت استفاده از این الیاف می‌شود.

انواع الیاف آرامید عبارتند از: ۱- الیاف بلند، ۲- الیاف کوتاه

الیاف بلند به صورت‌های مختلف از قبیل نخ، رشته‌ای، پارچه‌ای در انواع بافت و وزن و به صورت ترکیبی با الیاف کربن و شیشه (که در این حالت می‌توان محدودیت‌های موجود در هر یک را تا حدی با الیاف دیگر پوشش داد) یافت می‌شود. الیاف کوتاه در اندازه‌های ۱ mm تا ۲۵ mm جهت

ترکیبات قالب‌گیری استفاده می‌شوند.

## ۲-۳-۳- الیاف کربن

الیاف کربن شامل آلیاژی از کربن آمرف و کربن گرافیتی می‌باشند. اتم‌های کربن در صفحات موازی از شش ضلعی منظم تشکیل شده‌اند که این صفحات توسط نیروهای واندروالس به یکدیگر نگاه داشته شده و در هر صفحه بین اتم‌های کربن پیوندهای بسیار قوی کووالانسی وجود دارد. مزایای این الیاف عبارتند از: استحکام کششی بالا، مدول کششی بالا، وزن مخصوص پایین، ضریب انبساط حرارتی پایین و استحکام خستگی بالا، از طرفی پایین بودن مقاومت در برابر ضربه (شکنندگی)، بالا بودن هدایت الکتریکی، کرنش پایین در زمان شکست و قیمت بسیار بالا، جزء محدودیت‌های آنها می‌باشد. از قابلیت‌های ویژه الیاف کربن باقی‌ماندن خواص در محدوده دمایی ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد (در محیط خلاء و غیر اکسیدی) است، البته این خصوصیات برای استفاده در مواد مرکب با بستر پلیمری چندان مفید نیست ولی کاربردهای ویژه‌ای از جمله در نیروگاه‌های هسته‌ای و کوره‌های سنتزکننده دارد. انواع الیاف بلند به صورت‌های مختلف از قبیل نخ، رشته‌ای، پارچه‌ای ساده بافت و غیره در انواع وزن‌ها، نمدی و نواری وجود دارند. از طرفی الیاف کوتاه در اندازه ۱ mm الی ۲۵ mm جهت ترکیبات قالب‌گیری در پلاستیک‌ها و در اندازه ۵ mm موجود می‌باشند.

## ۲-۴- خصوصیات فیزیکی

### ۲-۴-۱- چگالی

چگالی مصالح FRP در محدوده ۱۲۰۰ تا ۲۱۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است که ۴ تا ۶ بار کمتر از چگالی فولاد می‌باشد. این کاهش چگالی می‌تواند منجر به کاهش هزینه حمل‌ونقل، سهولت در جابجایی مصالح و همچنین کاهش بار مرده سازه تقویت‌شده گردد.

### ۲-۴-۲- اثرات دمای بالا

در دمای بیشتر از  $T_g$  (دمای حداکثری که FRP با حداکثر کارایی عمل می‌کند) مدول الاستیسیته پلیمر با توجه به تغییرات ساختار مولکولی آن کاهش می‌یابد. دمای  $T_g$  بستگی به نوع رزین دارد ولی معمولاً در محدوده ۶۰ تا ۸۲ درجه سانتیگراد می‌باشد. در یک کامپوزیت FRP، الیاف که خصوصیات حرارتی بهتری نسبت به رزین دارند، می‌توانند مقداری از بار را در جهت طولی تا دمای نهایی تحمل خود انتقال دهند. این دما برای الیاف شیشه، آرامید و کربن به ترتیب ۱۷۵، ۱۰۰۰ و ۲۷۵ درجه سانتیگراد می‌باشد.

## ۲-۵- خصویات مکانیکی

### ۲-۵-۱- رفتار کششی

در بارگذاری کشش مستقیم، مصالح FRP قبل از گسیختگی هیچ‌گونه رفتار خمیری ندارند. رفتار کششی مصالح FRP با یک نوع الیاف، توسط یک رابطه تنش- کرنش خطی الاستیک تا هنگام شکست که به طور ناگهانی اتفاق می‌افتد، مشخص می‌شود. مقاومت کششی و سختی مصالح FRP به عوامل متعددی بستگی دارد. از آنجا که در مصالح FRP الیاف نقش اصلی در باربری را دارند، نوع الیاف، جهت قرارگیری و همچنین مقدار آنها مهم‌ترین نقش را در خواص کششی مصالح FRP ایفاء می‌کنند.

### ۲-۵-۲- رفتار فشاری

سیستم‌های تقویت FRP که به صورت پوشش بیرونی عمل می‌کنند، نباید به عنوان تقویت‌کننده فشاری مورد استفاده قرار گیرند. مقاومت فشاری سیستم FRP با الیاف شیشه، کربن و آرامید به ترتیب حدود ۵۵، ۷۸ و ۲۰ درصد مقاومت کششی آنها می‌باشد.

## ۲-۶- انتخاب نوع سیستم FRP

### ۲-۶-۱- ملاحظات محیطی

شرایط محیطی به طور ویژه‌ای بر رزین‌ها و الیاف در انواع سیستم FRP تاثیر می‌گذارد. مشخصات مکانیکی (برای مثال، مقاومت کششی، کرنش و مدول الاستیسیته) بعضی از سیستم‌های FRP به واسطه قرارگرفتن در معرض عوامل محیطی، مانند محیط قلیایی، آب نمک، مواد شیمیایی، اشعه فرابنفش، درجه حرارت‌های بالا، رطوبت بالا و دوره‌های یخ زدن و آب شدن کاهش می‌یابد. بعضی از ملاحظات محیطی مهم که وابسته به طبیعت سیستم‌ها هستند در زیر ذکر شده‌اند.

**محیط قلیایی یا اسیدی:** عملکرد سیستم FRP در محیط‌های قلیایی و اسیدی در بیشتر اوقات بستگی به رزین و الیاف تقویت کننده دارد. الیاف کربن خشک و غیر اشباع یا بدون محافظ، در برابر عوامل محیطی اسیدی و قلیایی مقاوم هستند. در حالی که الیاف شیشه در بیشتر اوقات نسبت به این عوامل حساس بوده و از نظر خواص کاهش پیدا می‌کنند. با این وجود یک رزین مناسب می‌تواند از تاثیر این عوامل روی الیاف، محافظت نماید.

**انبساط حرارتی:** سیستم‌های FRP ممکن است خصوصیات انبساط حرارتی متفاوتی نسبت به بتن داشته باشند. ضمن آنکه، خصوصیات انبساط حرارتی الیاف و پلیمر تشکیل دهنده سیستم FRP می‌توانند تغییر کنند. الیاف شیشه، ضریب انبساط حرارتی مشابه با بتن دارد. محاسبه تغییرات کرنش ناشی از حرارت، پیچیده بوده و به متغیرهایی مانند راستای الیاف، درصد حجمی الیاف (نسبت حجم الیاف به حجم کل) و ضخامت لایه‌های چسب وابسته می‌باشد.

**رسانایی الکتریکی:** الیاف شیشه و الیاف آرامید در عایق‌بندی الکتریکی مؤثر می‌باشند ولی الیاف کربن رسانا هستند. به همین دلیل برای جلوگیری از خوردگی الکتروشیمیایی فولاد، مصالح FRP با پایه کربن نباید با فولاد تماس مستقیم داشته باشند.

## ۲-۶-۲- ملاحظات بارگذاری

شرایط بارگذاری در سیستم‌های FRP با الیاف مختلف تاثیر می‌گذارد. لازم است سیستم FRP بر پایه دانش مربوط به رفتار سیستم تحت شرایط مورد نظر انتخاب شود. بعضی از ملاحظات بارگذاری‌های مهم که مربوط به رفتار سیستم است، به شرح زیر می‌باشند:

تحمل ضربه: سیستم‌های با الیاف شیشه و آرامید تحمل بهتری در ضربه نسبت به سیستم‌های با الیاف کربن از خود نشان می‌دهند.

گسیختگی ناشی از خزش و خستگی: سیستم‌های با الیاف کربن مقاومت زیادی در برابر گسیختگی خزشی تحت بارهای مداوم و پیوسته و همچنین گسیختگی ناشی از خستگی تحت بارهای نوسانی از خود نشان می‌دهند. سیستم‌ها با الیاف شیشه نسبت به هر دو شرایط بارگذاری، حساس‌تر می‌باشند [۱].

## فصل سوم

### کاربردهای FRP در عمران



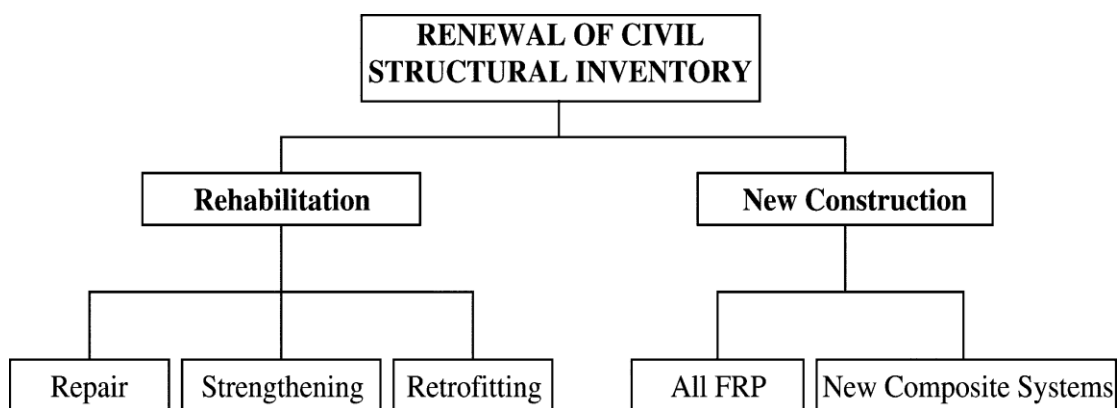
### ۳-۱- مقدمه:

کاربرد مواد مرکب پیشرفته در مهندسی عمران روز به روز افزایش پیدا می‌کند به ویژه به خاطر دلایل اقتصادی. مزایای کلیدی آن‌ها مانند خصوصیات طراحی انعطاف‌پذیر، نسبت مقاومت به وزن بالا و مصونیت در برابر شرایط محیطی مختلف با توجه به هزینه بالای مواد اولیه و تولید مقرون به صرفه نیست. همچنین تجربیات گذشته در جایگزینی یک به یک اجزا در سازه‌ای معمولی با کامپوزیت‌های پیشرفته در سازه‌های عمرانی هم نشان می‌دهد که استفاده از این مواد علاوه بر دلایل اقتصادی از نظر سازه‌ای هم دشوار می‌باشد.

در سال‌های اخیر پیشرفت‌های صورت گرفته این شرایط تغییر داده است. مانند:

(۱) تکنیک‌های جدید ساخت (۲) مصرف زیاد و در نتیجه تولید صنعتی مواد اولیه و قرار گرفتن این مواد در لیست مواد پرکاربرد باعث قیمت تمام‌شده کمتر این مواد شده است. در کنار این به دلیل طراحی و استفاده این مواد در کنار مواد قبلی و به صورت ترکیبی از این دو باعث شده تا صرفه اقتصادی داشته باشد.

در رویکرد جدید مهندسی عمران کاربرد FRP را می‌توان به نمودار زیر تشبیه کرد.



### ۳-۲- تقویت سازه‌های موجود

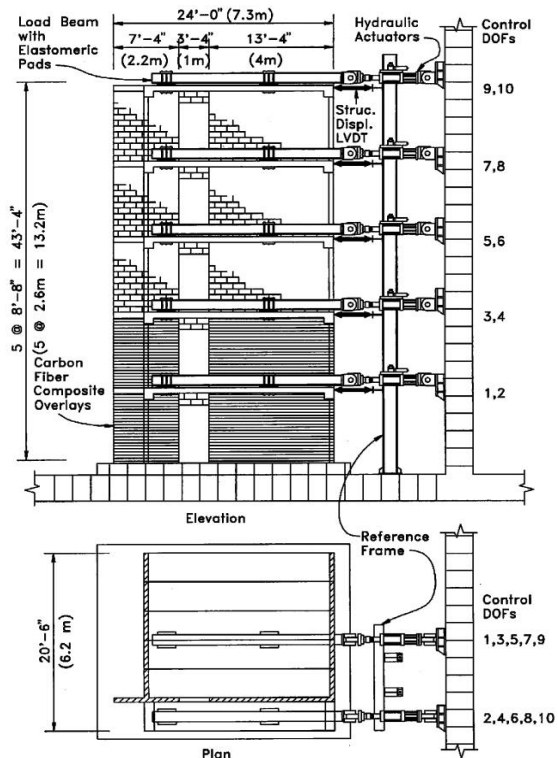
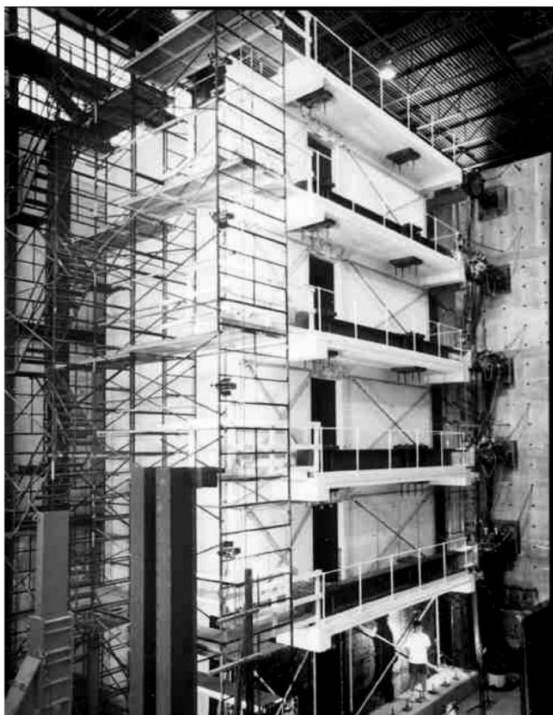
#### ۳-۲-۱- تقویت دیوارها و دال‌ها

### ۳-۲-۱-۱- پوشش دیوارهای سازه‌ای

تقویت دیوارهای سازه‌ای می‌تواند با یک روش اقتصادی و با استفاده از لایه‌ای نازک از FRP انجام شود. امروزه آزمایش‌ها بر روی این موضوعات تمرکز دارند: (۱) کاهش تغییر شکل برشی در دیوارهای سازه‌ای. (۲) بهبود عملکرد انعطاف‌پذیر در رفتار درون صفحه‌ای دیوارهای برشی. (۳) تعمیر دیوارهای آسیب دیده برای افزایش انعطاف‌پذیری درون صفحه‌ای و (۴) بهبود عملکرد خارج از صفحه دیوارهای سازه‌ای غیر مسلح.

### ۳-۲-۱-۱- تقویت برشی

یک لایه بسیار نازک FRP می‌تواند بهبود قابل توجهی ایجاد کند. به خصوص برای پاسخ درون صفحه‌ای دیوار برشی. فیبرهای کربنی در جهت افقی قرار می‌گیرند و اجازه ایجاد ترک‌های برشی ۴۵ درجه را نمی‌دهند و این در حالی است که مانع ایجاد ترک‌های افقی یا خمشی نمی‌شوند [۲].



شکل ۳-۱- نحوه انجام آزمایش [۲]

### ۳-۲-۱-۱-۲- تقویت خمشی

برای تقویت برون صفحه‌های دیوار جنبه‌های کلیدی طراحی عبارتند از: (۱) انتقال نیرو از مصالح اصلی به لایه چسبانیده شده در مناطقی که دارای لنگر خمشی بالا می‌باشد. (۲) جلوگیری از گسیختگی و جداسازی لایه‌های نازک و سخت چسبانیده شده به قسمت فشاری عضو خمشی [۲].

### ۳-۲-۱-۲- تقویت دال‌ها

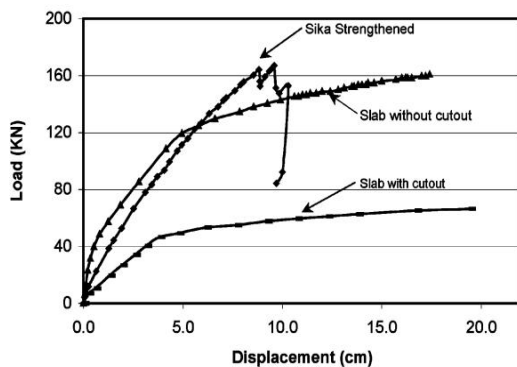
استفاده از CFRP در قالب نواری روش مؤثری برای تقویت خمشی دال‌های بت‌مسلح استاندارد می‌باشد. تأثیر این گونه تقویت به وسیله آزمایش‌های متعددی و اجراهای انجام شده در ساختمان‌های موجود اثبات شده است [۲].



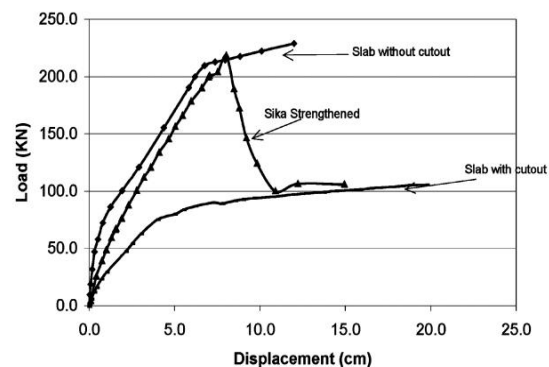
(a) 3-point flexural slab test setup



(b) Onset of strip debonding near cutout



(c) 3-point bending load-displacement response

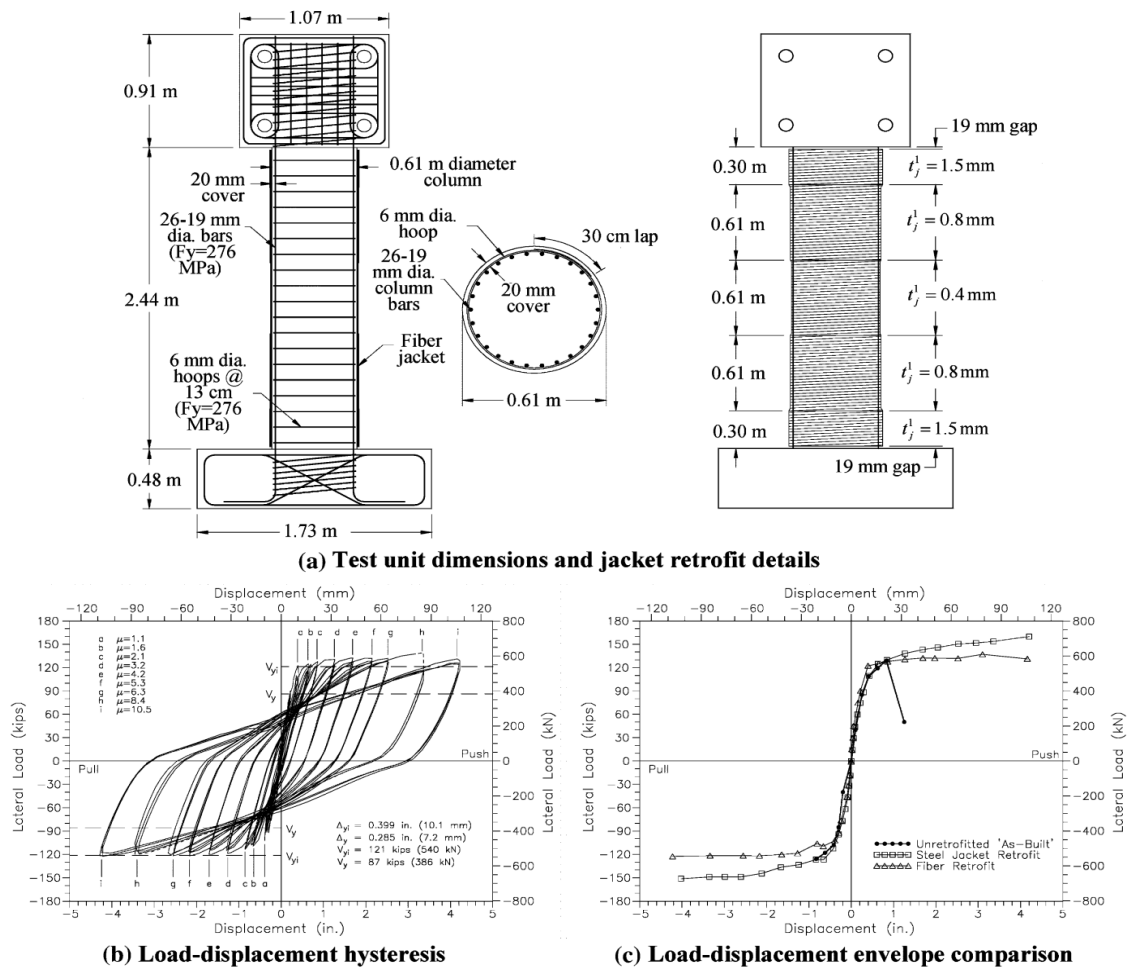


(d) 4-point bending load-displacement response

شکل ۳-۲- نحوه آزمایش و نتایج [۲]

### ۳-۲-۲- بهبود لرزه‌ای ستون‌ها

زلزله‌های اخیر در کالیفرنیا مانند Wittier ۱۹۸۷، Loma Prieta ۱۹۸۹ و Northridge ۱۹۹۴ دوباره آسیب‌پذیری ستون‌های پل‌های موجود را نشان داده است. لایه‌های FRP که به صورت ژاکت به دور ستون‌ها بسته می‌شوند می‌توانند در مقاوم‌سازی ستون‌ها در برابر زلزله بسیار مفید باشند، تا جایی که امروزه یکی از بهترین راه‌های شناخته شده برای تقویت لرزه‌ای ستون‌ها استفاده از ژاکت FRP است. این لایه‌ها به صورت مارپیچ یا به صورت حلقه به دور ستون‌های دایره‌ای یا مستطیلی پیچانده می‌شوند و معمولاً در نقاطی که لنگر خمشی بیشتر است از تعداد لایه‌های بالاتری استفاده می‌شود [۲].



شکل ۳-۳- جزئیات نمونه آزمایش و نمودار نتایج آزمایش [۲]

### ۳-۲-۳- تقویت تیرها و محل‌های اتصال

به طور کلی یکی از پرکاربردترین روش‌های تقویت تیرها استفاده از صفحات FRP می‌باشد که هم برای تقویت برشی و هم برای تقویت خمشی تیرها می‌توان از FRP استفاده نمود.

امروزه از FRP برای تقویت محل‌های اتصال تیر به ستون در سازه‌های بتنی بسیار استفاده می‌شود و تحقیقات بسیاری در این زمینه انجام گرفته است.

یکی دیگر از موارد استفاده FRP در مقاوم‌سازی استفاده از این کامپوزیت در مقاوم‌سازی میان-قابها می‌باشد که روز به روز در حال گسترش است و به همین خاطر در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در این باره انجام گرفته است که در فصل‌های بعد به آن خواهیم پرداخت.

## فصل چهارم

پیشینه بررسی رفتار میان قاب‌های

مقاوم شده با پلیمرهای مسلح شده

با الیاف (FRP)

#### ۴-۱- مقدمه :

میان قاب‌ها عمدتاً به عنوان یکی از اعضای غیر سازه‌ای ساختمان محسوب می‌شدند، اما امروزه بتدریج به یکی از راه‌های تقویت ساختمان در برابر نیروهای جانبی تبدیل شده‌اند.

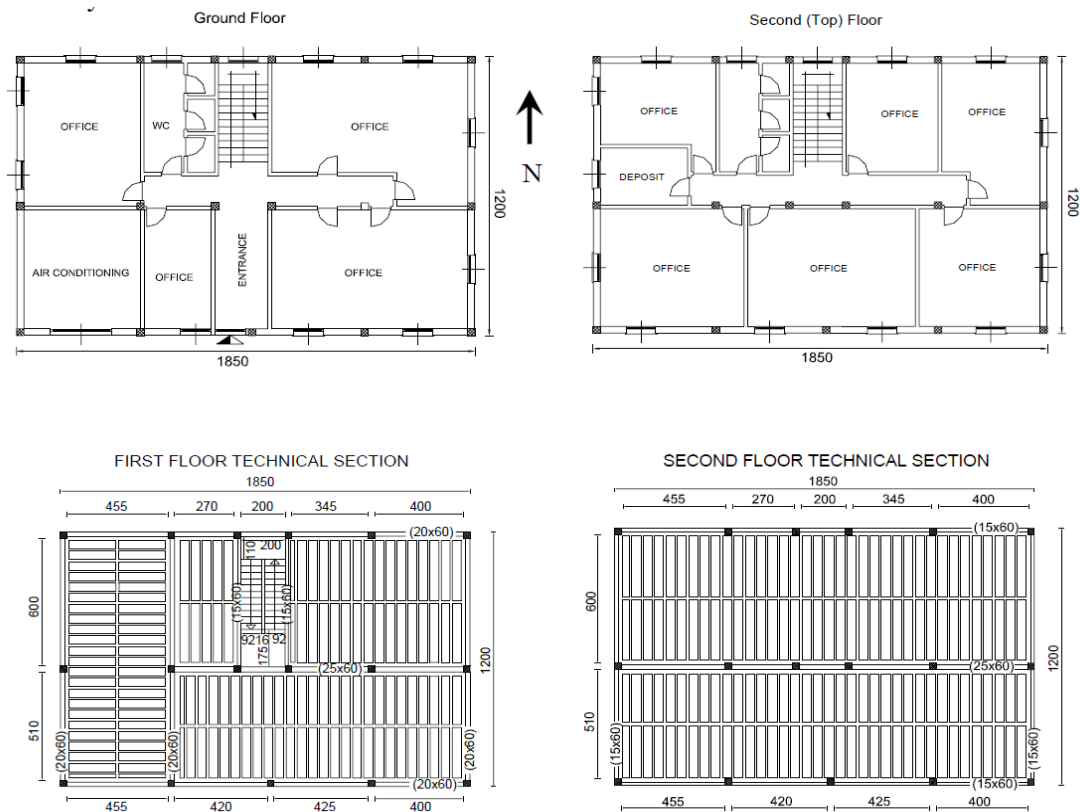
روش‌های بسیاری برای تقویت میان قاب‌ها ابداع و به کار گرفته شده است و آزمایشات زیادی در این زمینه انجام شده است. به طور کلی تقویت میان قاب‌ها به سه دلیل عمده انجام می‌شود. (۱) تقویت میان قاب در برابر نیروهای خارج صفحه‌ای. (۲) تقویت میان قاب در برابر نیروهای برشی درون صفحه‌ای. (۳) تقویت میان قاب برای تبدیل آن به یک عضو سازه‌ای و تحمل قسمتی از نیروهای جانبی همانند دیوار برشی.

یکی از قدیمی‌ترین روش‌های تقویت میان قاب‌ها استفاده از مش آرماتور فولادی است. در این روش مش فولادی بر روی دیوار قرار گرفته و بتن‌ریزی می‌شود. در حال حاضر تحقیقات محدودی بر روی این روش انجام می‌شود و این به این خاطر است که عملکرد فولاد تقریباً شناخته شده است. روش دیگر جهت مقاوم‌سازی دیوار میان قاب استفاده از بتن ECC می‌باشد که به دلیل چسبندگی و پیوستگی بیشتر بین بتن و دیوار مزایایی نسبت به مش آرماتور دارد. روش آخر روش استفاده از کامپوزیت‌های FRP می‌باشد که در سال‌های اخیر روز به روز فراگیرتر شده و در تمام دنیا توجه مهندسين را به خود جلب کرده است. به دلیل مقاومت بالای کامپوزیت‌های FRP امروزه تحقیقات زیادی برای کاربردی شدن این روش انجام می‌گیرد.

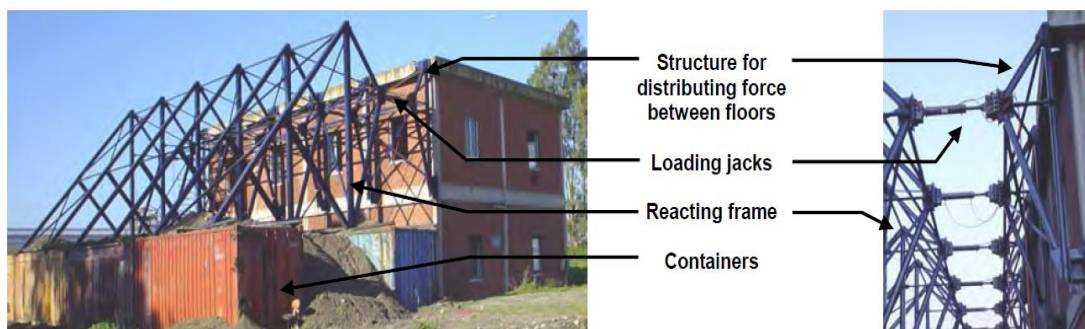
برای انجام تقویت مناسب ابتدا باید رفتار واقعی میان قاب‌ها در برابر بارهای وارده ارزیابی شده و سپس نقاط ضعف آن‌ها مرتفع گردد. از این رو تحقیقات بسیاری در زمینه رفتار واقعی دیوارها در هنگام زلزله انجام گرفته است.

G. Della Corte و همکاران در سال ۲۰۰۸ آزمایشی انجام دادند که در آن برای شناخت بهتر عملکرد میان قاب‌ها یک ساختمان دو طبقه در مقیاس واقعی (شکل ۴-۱) را تحت نیروهای

سیکلی فشار - کشش قرار دادند. آن‌ها در این آزمایش یک ساختمان را مورد تقویت و بازسازی قرار داده و بعد با استفاده از جک‌هایی که متصل به یک سازه خرپای فضایی بود (شکل ۴-۲)، نیروی زلزله را شبیه سازی کرده‌اند [۳].



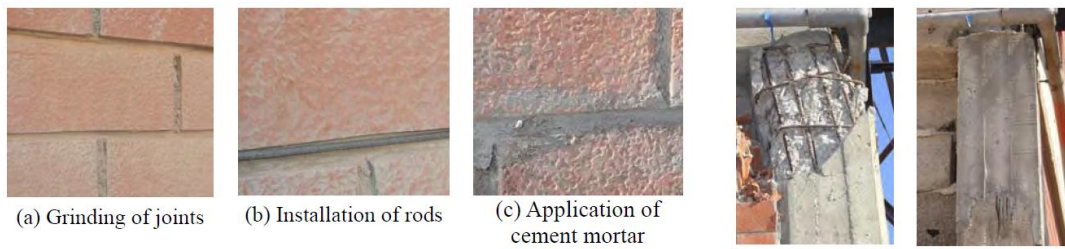
شکل ۴-۱- مشخصات ساختمان مورد آزمایش [۳]



شکل ۴-۲- سازه طراحی شده برای توزیع مناسب نیروی زلزله بین طبقات [۳]

در شکل ۴-۳ نحوه تعمیر و تقویت ستون‌ها و دیوارها نشان داده شده است.





شکل ۳-۴- تعمیر ستون‌ها و اجرای میلگرد FRP به روش NSM بر روی دیوارها [۳]

در این آزمایش به خوبی مشخص شد که استفاده از میلگردهای FRP به صورت NSM موجب بهبود رفتار میان قاب و تبدیل مود تخریب از ترک قطری کششی به ترک برشی لغزشی می‌شود.

#### ۲-۴- تقویت میان قاب‌ها برای نیروهای خارج صفحه

یکی از مشکلات دیوارهای میان قاب آجری غیر مسلح، ضعف این دیوارها در برابر نیروهای خارج صفحه‌ای است که معمولاً در اثر بارهای جانبی زلزله یا باد به این عضو ساختمان وارد می‌شود. یکی از راه‌های تقویت آن‌ها استفاده از لایه‌های FRP در دو طرف دیوار می‌باشد. از جمله مشکلات این سیستم می‌توان به جداسدگی لایه‌های FRP اشاره نمود که باعث تمرکز بسیاری از تحقیقات بر روی این موضوع شده است.

G.Tumialan و همکاران در سال ۲۰۰۰ تحقیقی را در زمینه تقویت میان قاب‌ها در برابر نیروهای خارج صفحه‌ای انجام داده‌اند. آن‌ها با توجه به تجربیات گذشته در زمینه تقویت اعضای بتن مسلح با FRP به فکر تقویت دیوارهای آجری با FRP نمودند. آن‌ها هفت دیوار آزمایشی ساختند که با کامپوزیت‌های CFRP، GFRP، AFRP تقویت شده بودند و دو نمونه هم برای شاهد مورد آزمایش قرار گرفتند. تمامی نمونه‌ها با شکست افقی آجرهای بالاترین ردیف یا پایین‌ترین ردیف و در کنج دیوار شروع به تخریب کردند [۴].

نتایج آزمایش آن‌ها نشان می‌داد که استفاده از کامپوزیت‌های FRP می‌تواند نقش بسزایی در تقویت دیوارها داشته باشد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفته‌اند که بهتر است طرح تقویت دیوارها بعد از

برداشتن پلاستر سیمانی انجام گیرد چون در نمونه‌هایی که دارای پلاستر بودند جداشدگی پلاستر باعث عملکرد ضعیف‌تر FRP ها می‌شد.

مشخصات نمونه‌ها در جدول ۴-۱، و نمونه‌های آزمایش، مود شکست و نمودار نتایج آزمایش در شکل ۴-۴ و ۴-۵ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱- مشخصات نمونه‌های آزمایش [۴]

Specimen	Strengthening System	Reinforcing Scheme	Attached to
Wall 1	Control	-----	Plaster
Wall 2	Control	-----	Masonry
Wall 3	GFRP Sheets	Three strips (width=20-in)	Plaster
Wall 4	GFRP Sheets	Three strips (width=20-in)	Masonry
Wall 5	CFRP Sheets	Three strips (width=20-in)	Plaster
Wall 6	AFRP Sheets	Three strips (width=20-in)	Plaster
Wall 7	Glass Rods	Eight #3 near-surface mounted rods	Plaster



Figure 5: Representative Test Wall

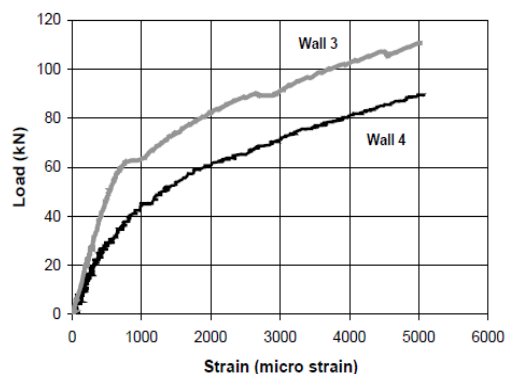
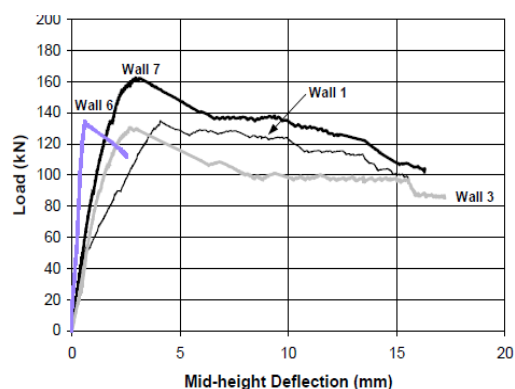
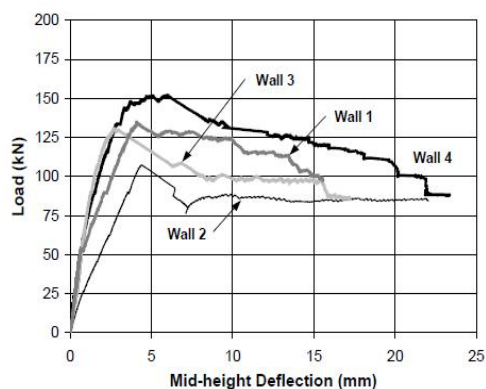


Figure 7: Comparison of Strain for Walls 3 and 4



شکل ۴-۴- نمونه‌های آزمایش و نمودار نتایج آزمایش [۴]

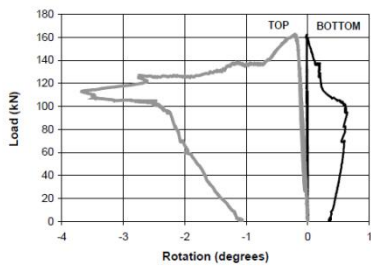


Figure 9: Rotation of Wall 6 during Load Testing



Figure 10: Delamination of Plaster in Wall 6

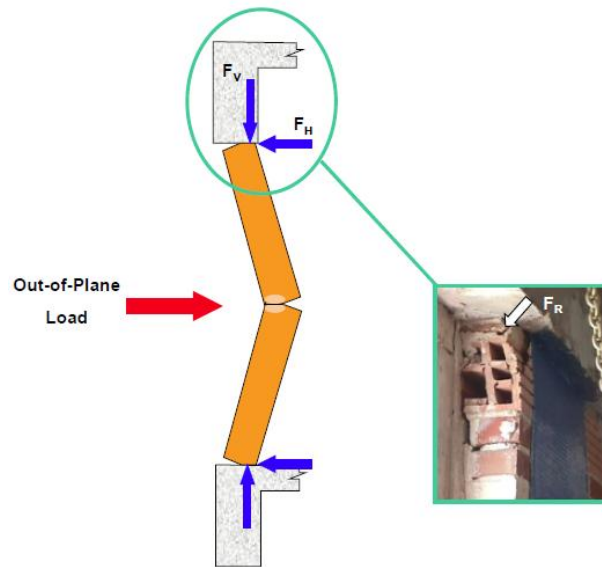


Figure 11: Out-of-Plane Mechanism of Failure

شکل ۴-۵- نمونه‌های آزمایش، مود شکست و نمودار نتایج آزمایش [۴]

Pedro F. Silva و همکاران در سال ۲۰۰۱ به بررسی اثر تقویت میان‌قاب‌ها به وسیله

میلگردها و لایه‌های FRP نموده‌اند (شکل ۴-۶) [۵].

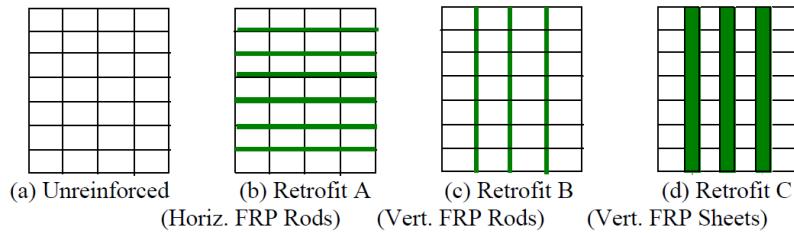


شکل ۴-۶- نحوه تقویت نمونه‌ها [۵]

آن‌ها برای آزمایش تأثیر حالت‌های مختلف چسباندن FRP به دیوارها حدوداً ۶۰ دیوار را

آزمایش کردند که مشخصات آن‌ها را در جدول ۴-۲ می‌توان مشاهده کرد.

جدول ۴-۲- مشخصات نمونه‌های آزمایش [۵]



Threat Level	Walls Tested
Minimum (Q=0.22lbs, R=13'-0"m) (Q=0.1kg, R=4m)	U1, A1, B1, C1
Low (Q=1.10lbs, R=13'-9"") (Q=0.5kg, R=4.2m)	U2, A2, B2, C2
Medium (Q=2.20lbs, R=13'-0"") (Q=1.0kg, R=4m)	U3, A3, B3, C3
High (Q=3.31lbs, R=11'-9"") (Q=1.5kg, R=3.6m)	U4, A4, B4, C4
Special Case (Q=5.51lbs, R=5'-3"") (Q=2.5kg, R=1.6m)	U1, A1, B1, C1

نتایج حاصل از این تحقیقات برای تدوین معیارهای آیین‌نامه‌های آمریکا مورد استفاده قرار

گرفته است [۵].

### ۴-۳- تقویت میان‌قاب‌ها برای برش

یکی از مشکلاتی که در زمان بروز زلزله برای میان‌قاب‌ها ایجاد می‌شود تخریب آن‌ها به دلیل عدم مقاومت کافی در برابر نیروهای برشی وارده می‌باشد. از این رو تحقیقاتی درباره تقویت برشی میان‌قاب‌ها در دنیا صورت می‌گیرد. کامپوزیت‌های FRP با ظرفیت کششی بالا می‌توانند به عنوان راهی خوب برای تقویت این دیوارها انتخاب شوند. از این رو دانستن خصوصیات و چگونگی تأثیر آن‌ها بر ظرفیت برشی میان‌قاب‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

G. Tumialan و همکاران در سال ۲۰۰۱ آزمایشی را برای تقویت میان‌قاب‌ها به وسیله لایه‌ها و

یا میله‌های FRP ترتیب داده‌اند که نمونه‌های آن به قرار زیر است (جدول ۴-۳) [۶].

جدول ۴-۳- مشخصات نمونه‌های آزمایش [۶]

Specimen	Reinforcement	Front Side	Back Side
Wall 1	None	None	None
Wall 2	#2 GFRP Bars	1HJ	None
Wall 3	#2 GFRP Bars	2HJ	2HJ
Wall 4	#2 GFRP Bars	2HJ	None
Wall 5	4-in. GFRP Laminates	4HS	None
Wall 6	#2 GFRP Bars 4-in. GFRP Laminates	HJ/4VS	None

Legend:

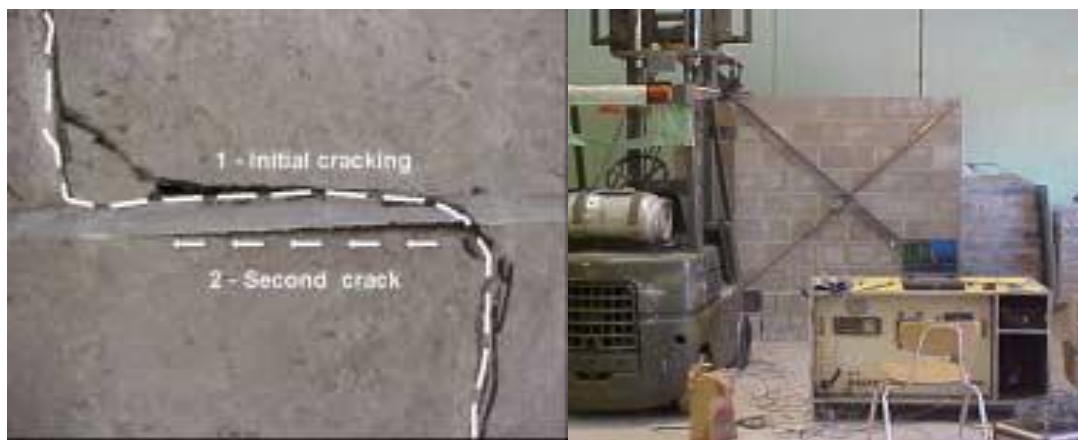
1HJ = every horizontal joint

2HJ = every second horizontal joint

4HS = four horizontal strips @ 16 in. o.c.

4VS = four vertical strips @ 16 in. o.c.

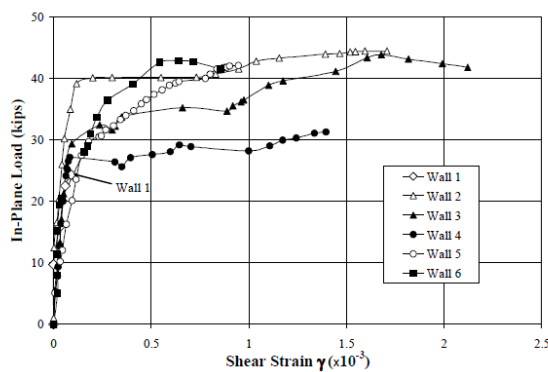
نتایج آزمایش به ترتیب زیر ارائه شد. افزایش قابل ملاحظه از ۳۰ تا ۸۰ درصد در نمونه‌ها و در ظرفیت برشی نشان دهنده تأثیر بالای کامپوزیت‌های FRP می‌باشد. در دیوارهایی که فقط یک سمت آن تقویت شده بود نوع تخریب خارج از صفحه بود و این بر اهمیت تقویت هر دو سمت میان‌قاب‌ها تأکید دارد. در تمامی نمونه‌های تقویت شده با صفحات FRP ترک‌های لغزشی به چشم می‌خورد که خود باعث تخریب دیوار می‌شود. نحوه آزمایش و نتایج آن را در شکل ۴-۷، ۴-۸ و ۴-۹ می‌بینیم [۶].



شکل ۴-۷- نحوه شکست نمونه‌ها [۶]



شکل ۴-۸- نحوه شکست نمونه‌ها [۶]



شکل ۴-۹- نحوه شکست نمونه‌ها و نتایج [۶]

#### ۴-۴- تقویت میان قاب‌ها برای تحمل قسمتی از نیروهای جانبی وارده به ساختمان

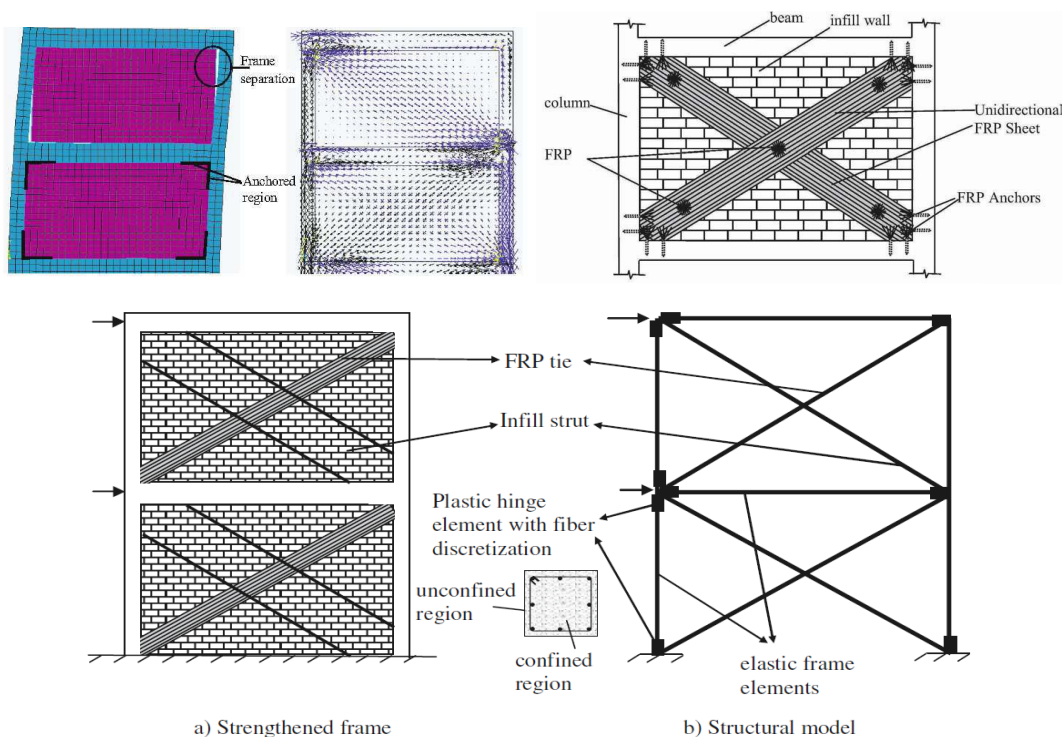
زلزله و باد عوامل اصلی ایجاد نیروهای جانبی در ساختمان هستند و مقاومت در برابر آن‌ها بر عهده کل سیستم سازه‌ای می‌باشد. تا پیش از سال ۲۰۰۰ تقریباً کسی فکر نمی‌کرد که روزی میان-قاب‌ها سهمی در تحمل بارهای جانبی سازه بر عهده بگیرند. اما امروزه به دلیل وجود ساختمان‌های فراوان که طبق آئین‌نامه‌های جدید در مقابل نیروهای جانبی ضعیف بوده و نیاز به مقاوم‌سازی دارند و

نیز ابداع مواد جدید چون FRP که دارای مقاومت بالا در ابعاد کوچک می‌باشند مهندسان را به استفاده سازه‌ای از میان قاب‌ها ترغیب کرده است.

از این رو در سال‌های اخیر آزمایشات بسیاری در سراسر دنیا از جمله در کشور عزیزمان انجام شده است. این آزمایشات هم در قالب آزمایشات عملی و آزمایشگاهی و هم در قالب تحلیل‌های نرم افزاری انجام می‌شود. در این مبحث ما به تعدادی از این تحقیقات و نتایج حاصل از آن‌ها می‌پردازیم.

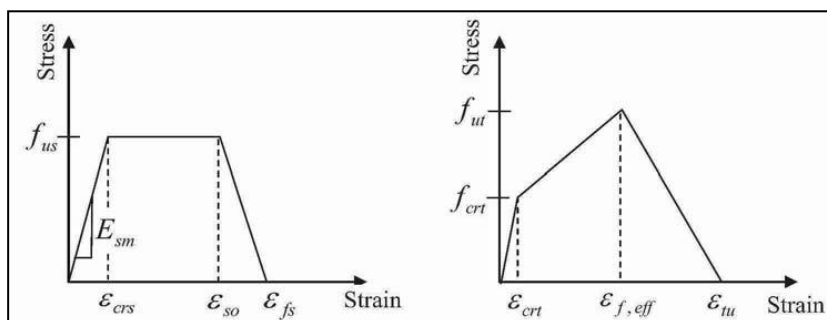
#### ۴-۴-۱- روش‌های تحلیل میان قاب‌های تقویت شده

Baris Binici و همکاران در سال ۲۰۰۶ در کشور ترکیه مدلی را برای تحلیل میان قاب‌های تقویت شده با FRP ابداع کردند که در آن قاب به صورت یک قاب مهاربندی شده با دو عضو قطری که یک عضو به صورت کششی عمل کرده و همان لایه FRP می‌باشد و عضو دیگر که فشاری می‌باشد در حقیقت همان میان قاب آجری است که به صورت فشاری نیرو تحمل می‌کند. مدل منظور شده و نتایج حاصل از تحلیل آن را در شکل ۴-۱۰ می‌بینید [۷].



شکل ۴-۱۰- نحوه تقویت و مدل سازه‌ای معادل [۷]

نمودار تنش-کرنش FRP و مواد میان قاب را در شکل ۴-۱۱ می توان دید.



شکل ۴-۱۱- نمودار تنش-کرنش FRP و مصالح میان قاب [۷]

مشخصات کامل مصالح و قاب‌های تست شده به صورت جدول ۴-۴ است:

جدول ۴-۴- مشخصات مواد نمونه‌ها [۷]

Researcher	Material	Compressive Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (MPa)
Erduran <sup>7</sup>	FRP	-	3450	230000
	Concrete	15	-	18400
	Plaster	4.3	0.4	9800
	Infill	10 (2) <sup>a</sup>	-	7000 (2000)
Erdem <sup>8</sup>	FRP	-	3450	230000
	Concrete	9.5	-	14600
	Plaster	5	0.5	9800
	Infill	11.2 (2)	-	7000 (2000)
Akguzel <sup>9</sup>	FRP	-	3450	230000
	Concrete	15	-	18400
	Plaster	5	0.5	10600
	Infill	11 (2)	-	7000 (2000)

a) Numbers in parenthesis denote values in the weak direction of infill material.

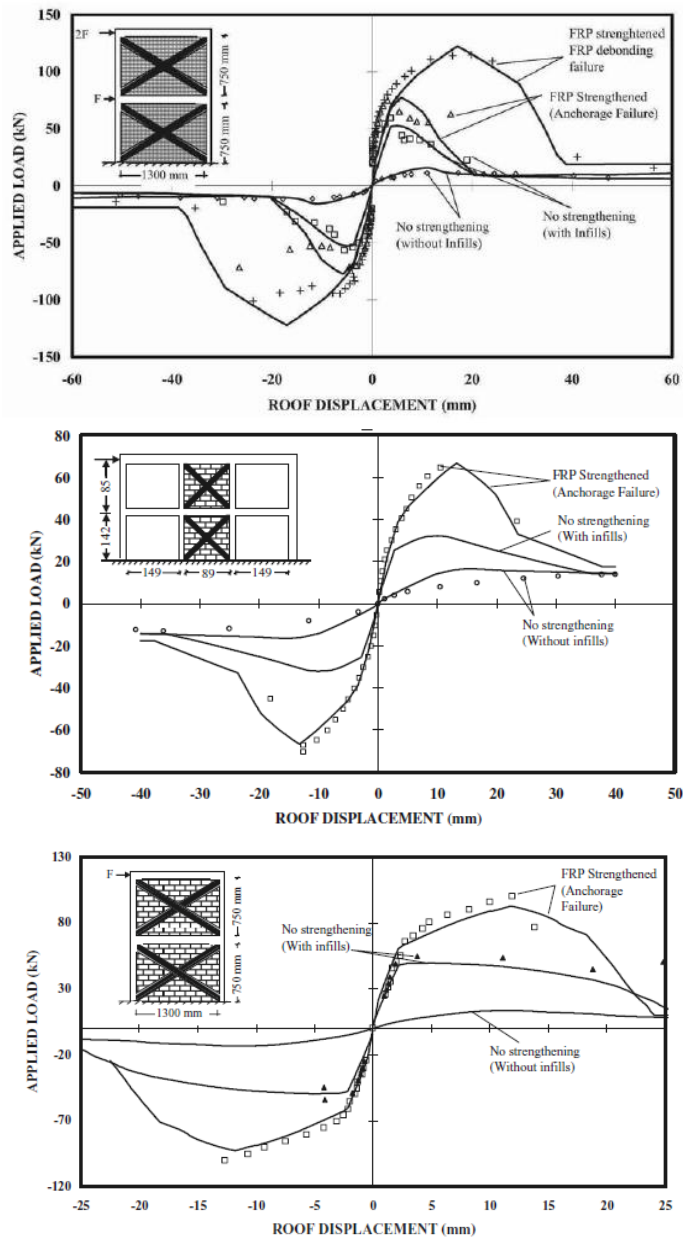
TABLE 2. Member details for analyzed frames

Researcher	Beams				Anchors				
	Dimensions (mm × mm)	$\rho_l^a$ (%)	$s^b$ (mm)	$l_d^c$ (mm)	Dimensions (mm × mm)	$\rho_l$ (%)	$s$ (mm)	$n^d$	$d^e$ (mm)
Erduran <sup>7</sup>	100 × 150	1.3	90	300	150 × 150	0.9	90	3	60
Erdem <sup>8</sup>	110 × 110	1.6	100	320	110 × 150	1.4	100	3	70
Akguzel <sup>9</sup>	100 × 150	1.3	95	160	150 × 150	1.3	130	3 (5) <sup>f</sup>	50 (80)

- a) Longitudinal reinforcement ratio  
 b) Spacing of transverse reinforcement  
 c) Lap splice length in the plastic hinge region  
 d) Number of anchors provided on one face at a corner  
 e) Depth of anchors  
 f) Values for the second specimen failing with FRP debonding



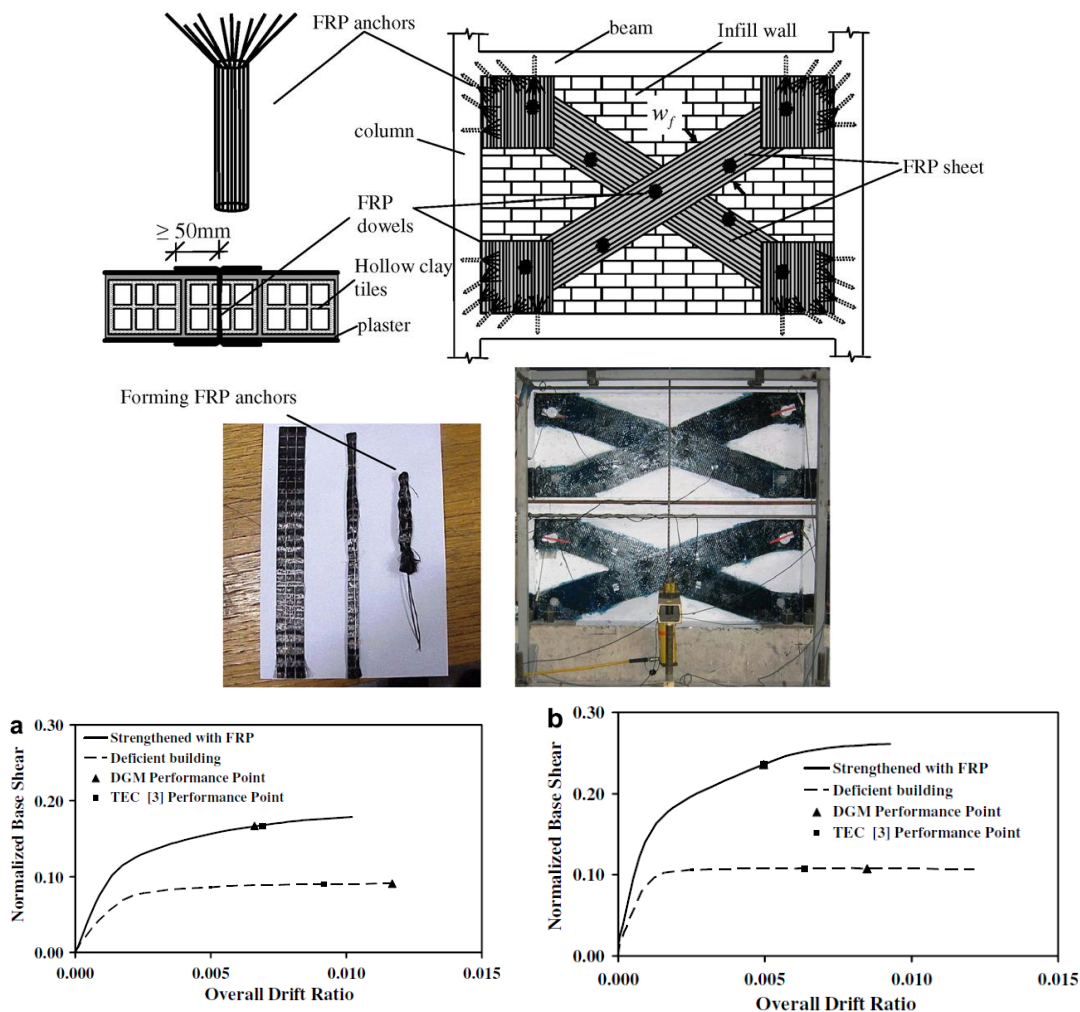
نتایج حاصل از تحلیل به صورت زیر ارائه شده است (شکل ۴-۱۲) [۷].



شکل ۴-۱۲- نمودارهای خروجی آزمایش [۷]

نتایج حاصل از این روش تحلیل با دقت خوبی قابل قبول بوده و به خوبی تأثیر FRP در بالا بردن ظرفیت برشی سازه نشان می دهد. همچنین مطابق معمول نشان می دهد که بحث مهارها و قیدهای انتهایی نوآرهای FRP در مقاومت سازه نقش بسزایی دارد.

Baris Binici و همکاران در سال ۲۰۰۶ در تحقیقی دیگر با استفاده از تحقیق آزمایشگاهی اثر آرایش خاصی از مقاوم‌سازی با FRP و مهار مناسب در تقویت میان‌قاب‌ها را بررسی کرده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که این آرایش قطری FRP و مهارهای نشان داده شده (شکل ۴-۱۳) تأثیر زیادی در کاهش دررفت و عدم جداسدگی FRP دارد [۸].



شکل ۴-۱۳- نحوه تقویت نمونه‌ها و مهار و نمودار نتایج خروجی [۸]

E.Yuksel و همکارانش در سال ۲۰۰۶ در تحقیقی به موضوع بهسازی لرزه‌ای یک قاب بتنی بوسیله FRP پرداخته‌اند. آنها به دلیل خواص فیبرهای کربنی و محدودیت تعداد نمونه‌ها تصمیم گرفتند که فقط از CFRP استفاده کنند. آنها یک سازه دو طبقه که در آن میان‌قاب وجود دارد و

FRP به صورت قطری نصب شده‌اند را آزمایش کردند. در یکی از نمونه‌ها علاوه بر نوار قطری محل اتصال نوارها به اسکلت بتنی نیز به صفحات FRP تقویت شده است [۹].

مشخصات نمونه‌ها در جدول ۴-۵ و شکل ۴-۱۴ قابل مشاهده است :

جدول ۴-۵- مشخصات نمونه‌ها [۹]

Specimen	$f_c$ (MPa)	Bare/Infill walls	Longitudinal Reinforcement	Retrofit
BC-0-1-14	14	Bare	Continuous	No
BL-0-1-8.6	8.6	Bare	Lap spliced	No
IC-0-1-11	11	Plastered Infill Walls	Continuous	No
IL-0-1-17	17	Plastered Infill Walls	Lap spliced	No
IC-C1-1-10	10	Plastered Infill Walls	Continuous	CFRP diagonals
IL-C1-1-8.6	8.6	Plastered Infill Walls	Lap spliced	CFRP diagonals and confinement of lap spliced zones

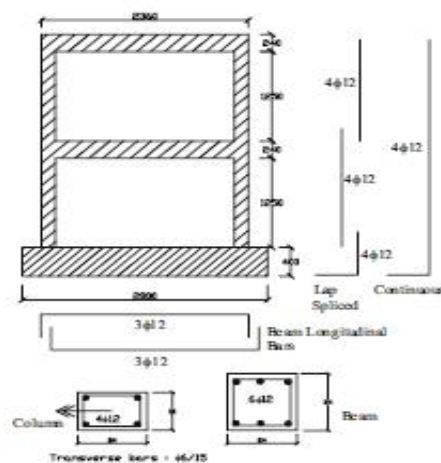
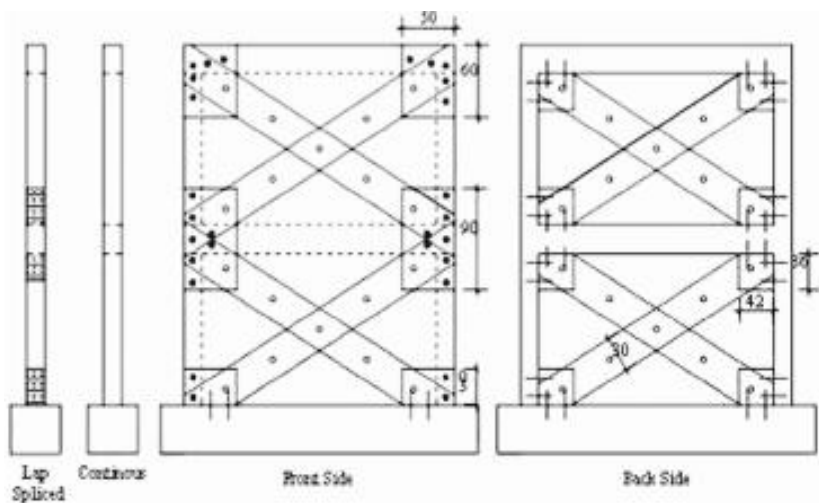


Figure 1. Dimensions and reinforcing details of the specimens (dimensions in mm)

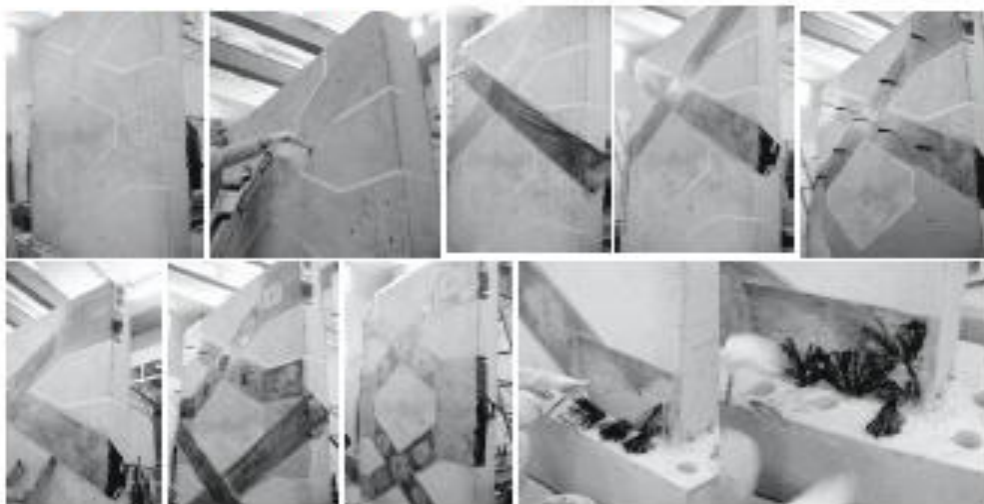


شکل ۴-۱۴- مشخصات نمونه‌ها [۹]

آن‌ها در نمونه آخر با استفاده از مهار فیتیله‌ای لایه‌های دو سمت دیوار را به یکدیگر و همچنین به قاب بتنی متصل کردند (شکل ۴-۱۵ و شکل ۴-۱۶).

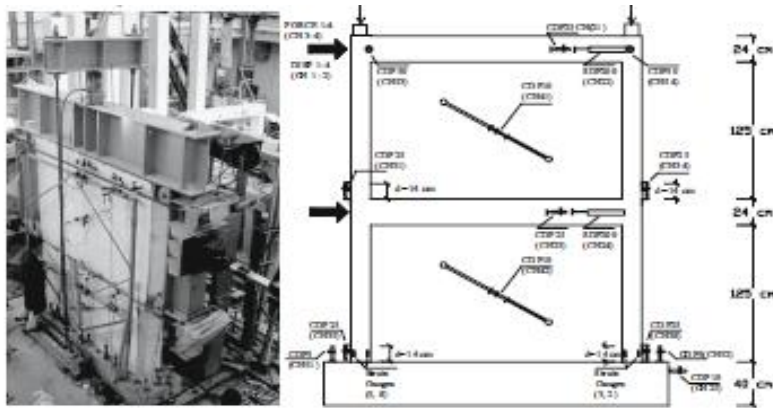


شکل ۴-۱۵- نحوه تقویت نمونه‌ها [۹]



شکل ۴-۱۶- نحوه آماده‌سازی FRP و تقویت [۹]

نحوه تست را می‌توان در شکل ۴-۱۷ دید :



شکل ۴-۱۷- سیستم آزمایش [۹]

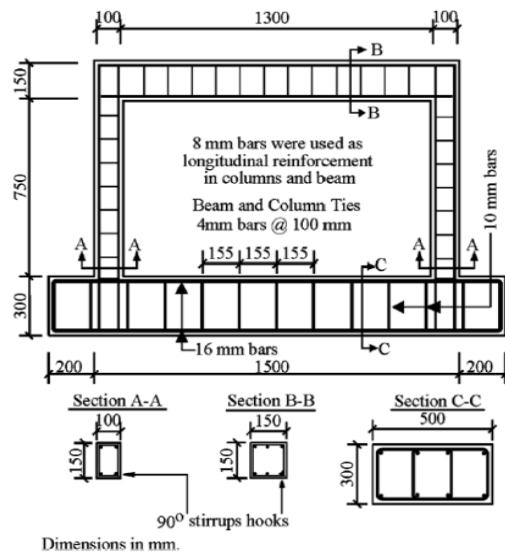
نتایج به دست آمده حاکی از آنست که این شکل از قرارگیری نوارهای تقویتی کمک بسیاری به جذب انرژی در میان قابها می کند. و مهار صفحات FRP کارآیی آن را به ۲ برابر افزایش می دهد. وجود میان قاب سختی قاب را افزایش می دهد و در صورت تقویت جاذب انرژی خوبی در برابر بارهای جانبی می باشد [۹].

Altin و همکاران در سال ۲۰۰۷ در آزمایشی به مقایسه چند نمونه تحت بارگذاری زلزله پرداختند. اختلاف این نمونهها در عرض لایهها و همچنین تقویت یک یا هر دو سمت دیوارها است. مشخصات نمونهها و نحوه تقویت آنها در جدول ۴-۶، شکل ۴-۱۸ و شکل ۴-۱۹ آمده است [۱۰]:

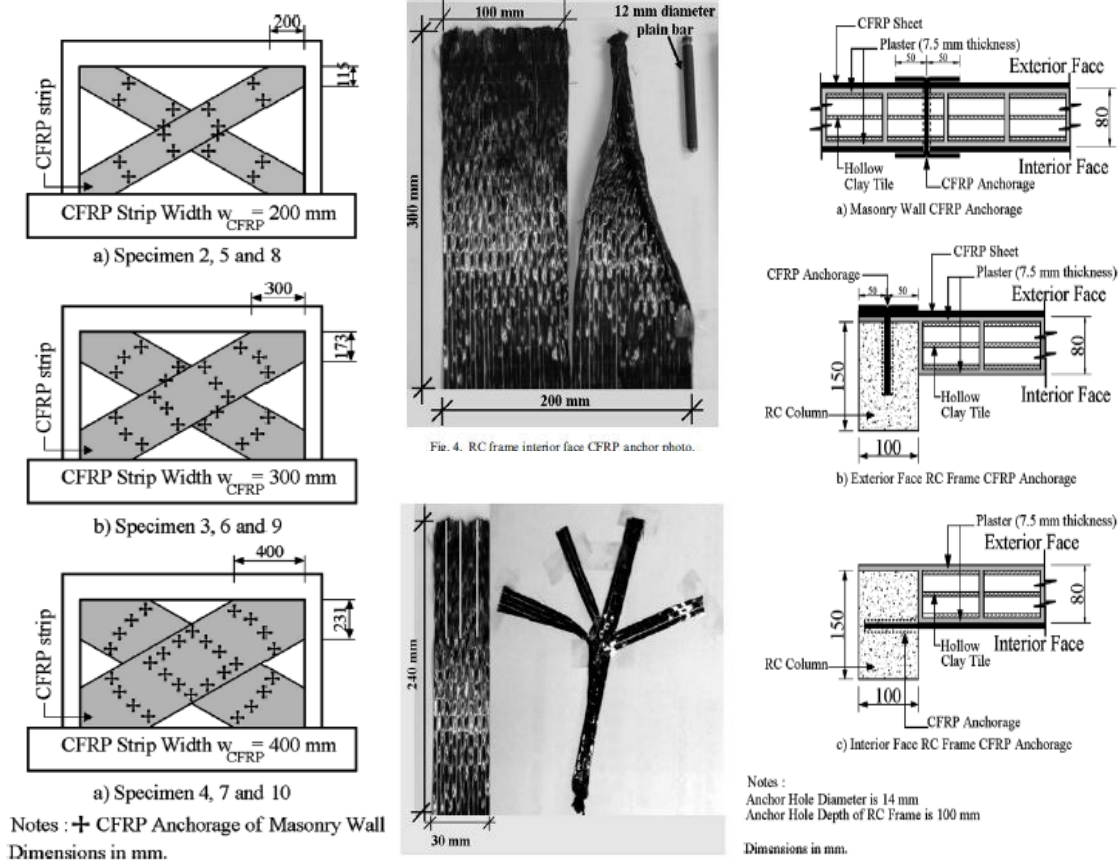
جدول ۴-۶- مشخصات نمونهها [۱۰]

Specimen no.	Frame $f_c$ (MPa)	Mortar plaster $f_c$ (MPa)	CFRP strip	
			Width (mm)	Application
1	17.3	4.0	Reference specimen with masonry wall	
2	18.0	3.8	200 - 13	Both sides of masonry wall
3	16.8	4.2	300 - 20	
4	17.1	3.7	400 - 27	
5	18.2	3.6	200 - 13	Interior side of the masonry wall
6	17.8	4.1	300 - 20	
7	17.7	3.9	400 - 27	
8	17.0	3.8	200 - 13	Exterior side of the masonry wall
9	17.5	3.5	300 - 20	
10	17.6	3.7	400 - 27	

<sup>a</sup> Ratio: (width of CFRP × 100)/diagonal length of masonry infill wall.

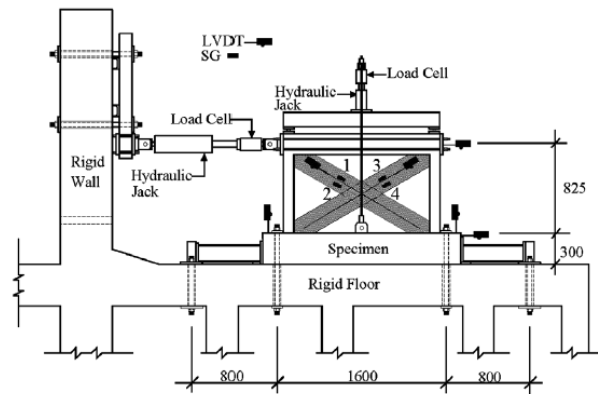


شکل ۴-۱۸- مشخصات نمونه‌ها [۱۰]



شکل ۴-۱۹- نحوه تقویت نمونه‌ها [۱۰]

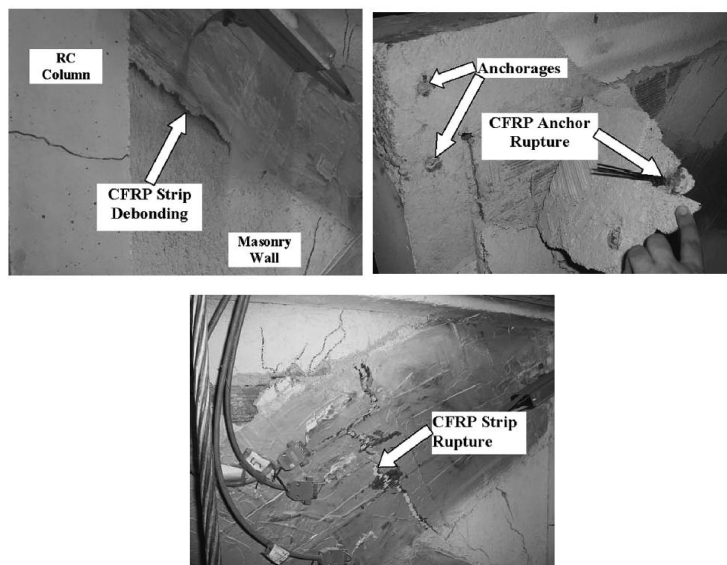
برای اعمال شرایط آزمایش و بارگذاری سیستم زیر ساخته شد (شکل ۴-۲۰):



Notes : Strain Gauges (SG) number are given on the specimen  
Dimensions in mm.

شکل ۴-۲۰- مشخصات دستگاه اعمال آزمایش [۱۰]

برخی از خرابی‌ها را می‌توان در شکل ۴-۲۱ مشاهده کرد:



شکل ۴-۲۱- مکانیزم‌های خرابی [۱۰]

نتیجه‌هایی که از این تحقیقات بدست آمده عبارتند از :

۱- تقویت هر دو سمت دیوار افزایش مقاومتی برابر  $1/6$  برابر دیوار با یک سمت مقاوم شده ایجاد می‌کند.

۲- اگر فقط یک سمت دیوار را تقویت کنیم ، تخریب از حالت درون صفحه‌ای به حالت برون

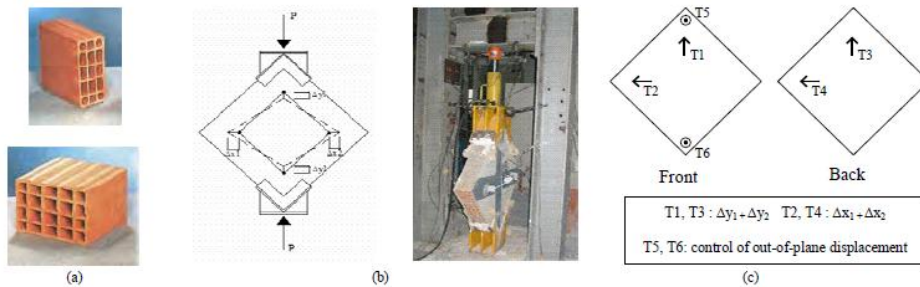
صفحه‌ای تبدیل می‌شود [۱۰].

G.Erol و همکارانش در مقاله‌ای نتایج دو آزمایش را ارائه داده‌اند. آزمایش اول آزمایش کشش

قطریست و آزمایش دوم آزمایش یک قاب بتنی با میان‌قاب است که مورد بهسازی با FRP قرار گرفته‌اند [۱۱].

در آزمایش اول ۳۰ نمونه مورد آزمایش قرار گرفت که مشخصات آن‌ها به صورت زیر است

(شکل ۴-۲۲ و جدول ۴-۷):



شکل ۴-۲۲- نحوه آزمایش [۱۱]

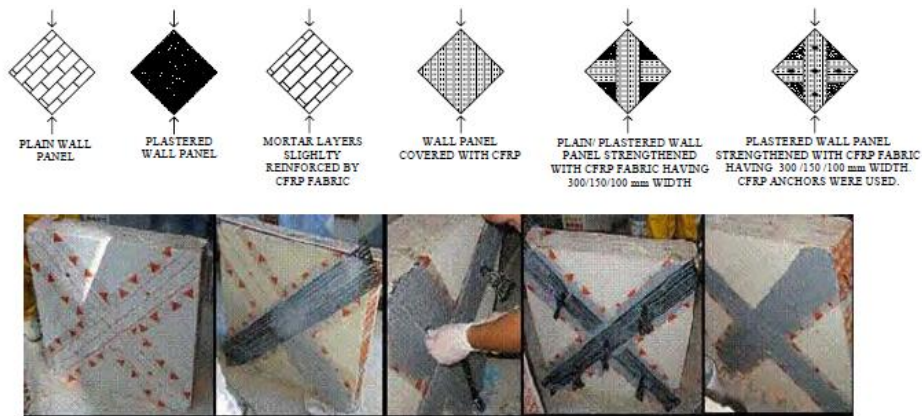
جدول ۴-۷- مشخصات نمونه‌ها [۱۱]

Spec .No	Group	t <sub>d</sub> (mm)	f <sub>m</sub> (MPa)	f <sub>p</sub> (MPa)	Strengthening				P <sub>ult</sub> (kN)	ε (Δ <sub>vert</sub> /l) (%)	G (MPa)	K <sub>int</sub> (P/Δ) (kN/mm)
					CFRP type	CFRP width (mm)	CFRP anchors	Epoxy Type				
S25	1	135	3.93	-	-	-	-	71	0.171	604	203	
S9			4.8	-	-	-	-	68	0.092	-	238	
S16		85	11.5	-	-	-	-	66	0.208	321	131	
S18			6.21	-	-	-	-	77	0.167	417	152	
S11	1	135	5.82	-	No. 1	In mortar layer	-	85	0.116	585	184	
S12			5.82	-	-	-	-	82	0.152	589	193	
S13		85	4.44	-	-	-	-	122	0.140	1019	307	
S14			4.44	-	-	-	-	73	0.135	366	128	
S2	2	135	5.75	8.22	-	-	-	134	0.118	1406	353	
S6			6.55	7.27	-	-	-	224	0.201	1615	509	
S8		85	7.16	8.22	-	-	-	207	0.149	1603	560	
S22			5.18	3.23	-	-	-	190	0.097	-	624	
S15	1	85	11.5	14.59	-	-	-	212	0.218	1385	422	
S17			11.5	14.59	-	-	-	207	0.210	1577	553	
S7	1	135	7.16	-	No. 1	Whole surface	-	221	0.404	1307	425	
S19			9.28	14.59	-	-	-	384	0.187	2429	768	
S1			300	8.56	14.59	-	-	-	281	0.217	3203	676
S5				6.55	6.58	-	-	-	386	0.134	2218	759
S10	2	85	4.8	2.98	No. 2	-	-	199	0.113	-	647	
S21			5.18	3.23	-	yes	-	212	0.144	1448	478	
S28	2	135	3.05	2.98	No. 2	150	-	190	0.113	1559	561	
S24			3.93	3.23	-	yes	-	197	0.172	1259	444	
S27			2.71	2.98	No. 2	100	-	103	0.064	2029	642	
S26			2.71	2.98	-	yes	-	142	0.072	1401	477	
S33	3	135	3.87	2.49	No.3	300	-	257	0.182	1552	522	
S34			3.87	2.49	-	-	-	203	0.117	1756	526	
S29			Epoxy-2	4.6	3.2	No. 2	-	-	193	0.130	1758	663
S30				4.6	3.2	-	-	-	167	0.184	1724	445

P<sub>ult</sub> : Ultimate vertical load; Δ<sub>vert</sub> : Vertical displacement at P<sub>ult</sub>; ε : vertical strain; G : Shear modulus; K<sub>int</sub> : Initial stiffness of P-Δ envelope



از تفاوت‌های اصلی نمونه‌ها می‌توان به وجود یا عدم وجود پلاستر و مهار در یک نمونه و عرض لایه FRP اشاره نمود (شکل ۴-۲۳).



شکل ۴-۲۳- مشخصات نمونه‌ها و نحوه تقویت آن‌ها [۱۱]

نتایج اصلی این تحقیق عبارتند از:

- وجود یا عدم وجود پلاستر تأثیری در مقاومت نمونه ندارد. اما سختی نمونه با پلاستر به میزان قابل توجهی بیشتر از نمونه بدون پلاستر بوده و بار نهایی آن نیز ۲/۵ برابر است.
- نفوذ FRP به داخل ملات تأثیر چندانی در سختی داخلی و بار نهایی نداشته ولی از خرابی در اثر لغزش در راستای ملات جلوگیری می‌کند [۱۱].

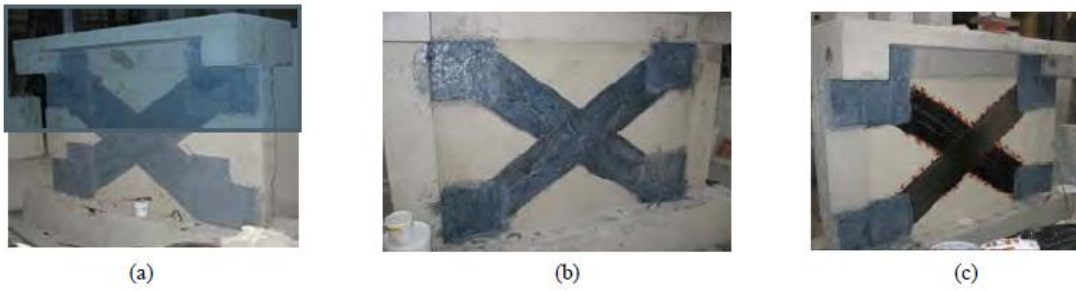
مشخصات آزمایش انجام شده توسط G.Erol و همکارانش مربوط به قاب یک طبقه یک دهانه

به صورت جدول ۴-۸ و شکل ۴-۲۴ و شکل ۴-۲۵ است که تحت بارگذاری دینامیکی قرار گرفته است.

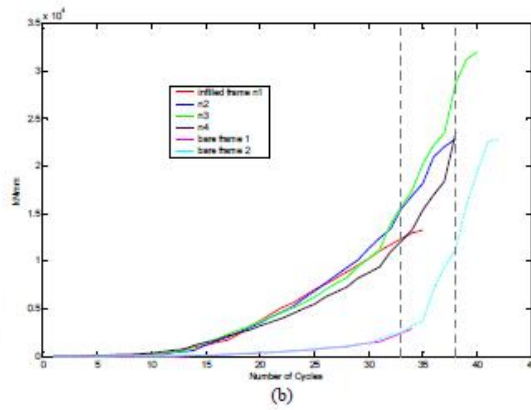
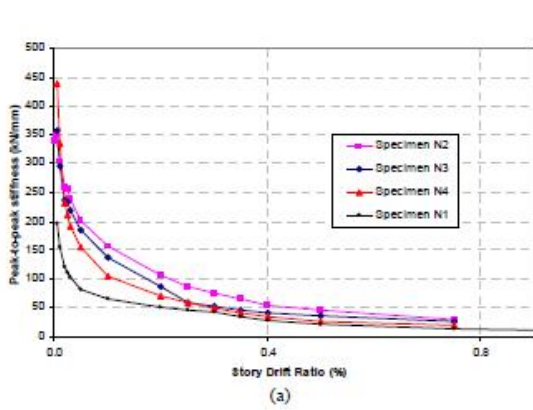
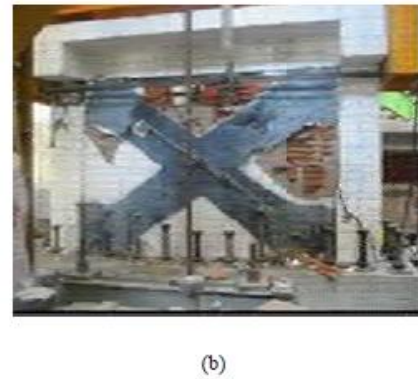
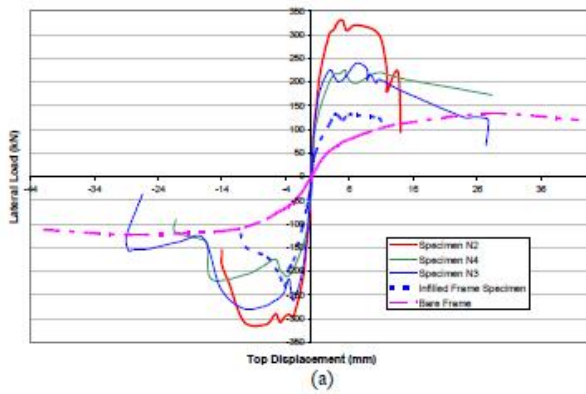
جدول ۴-۸- مشخصات نمونه‌ها [۱۱]

Specimen No.	Specifications	$f_c^a$ (MPa)	$f_m^b$ (MPa)	$f_p^c$ (MPa)	Strengthening		$P_{ult}^+$ (kN)	$P_{ult}^-$ (kN)	$K_{int}^+$ (kN/mm)	$K_{int}^-$ (kN/mm)
					CFRP Type					
					(Dia)	(Frame)				
Bare Frame	Bare RC frame	16	-	-	-	-	133.4	122.6	23.6	22.8
N1	Infilled RC frame	15.8	4.3	3.4	-	-	130.9	233.2	87.4	74.2
N2	CFRP strengthened	10.8	4.1	3.9	No.2	No.1	330.1	311.9	236.4	239.4
N3	CFRP strengthened	12.9	10.1	2.3	No.2	No.2	239.7	278.1	181.5	209.5
N4	CFRP strengthened	16.7	3.4	1.3	No.2	No.2	225.3	217.3	154.3	122.6

<sup>a</sup> $f_c$ : Compressive strength of concrete; <sup>b</sup> $f_m$ : Compressive strength of mortar; <sup>c</sup> $f_p$ : Compressive strength of plaster; Dia: Type of diagonal CFRP; Frame: Type of CFRP used for frame connections;  $P_{ult}^+$ ,  $P_{ult}^-$ : Ultimate lateral loads of specimens at pushing and pulling, respectively;  $K_{int}^+$ ,  $K_{int}^-$ : Initial stiffness of specimens at pushing and pulling, respectively.



شکل ۴-۲۴- نحوه تقویت نمونه‌ها [۱۱]



شکل ۴-۲۵- نمودار نتایج و تصویر شکست یکی از نمونه‌ها [۱۱]

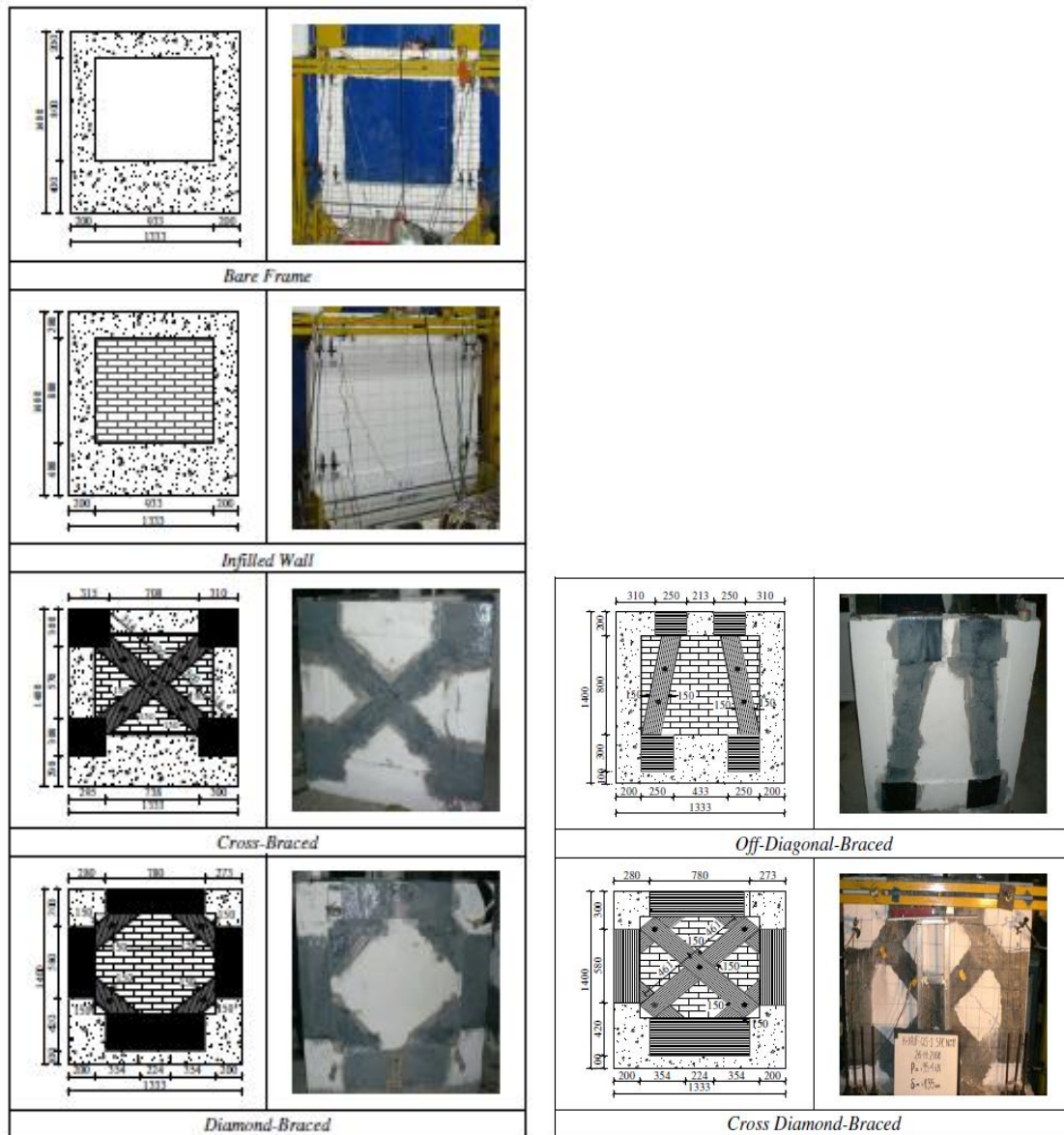
نتایج اصلی حاصل از آزمایش دوم را می‌توان به صورت ذیل بیان نمود: (۱) سختی نمونه اول که میان قاب ندارد خیلی کمتر از قاب‌های ۲ و ۳ و ۴ و ۵ می‌باشد که دارای میان قاب هستند. (۲) جذب انرژی رابطه مستقیم با میزان FRP استفاده شده در نمونه‌ها دارد. ولی نصب FRP تأثیر چندانی در سختی سازه ندارد. (۳) در نمونه‌ای که FRP فقط در انتهای آن‌ها به قاب چسبانده شده‌اند مقاومت

کمتری از خود نشان می‌دهند [۱۱].

E. Yuksel و همکاران در سال ۲۰۰۹ در تحقیقی تأثیر شکل‌های مختلف مقاوم‌سازی با

FRP را بررسی کرده‌اند. در این آزمایش شش نمونه مورد آزمایش قرار گرفت که مشخصات آن‌ها در

شکل ۴-۲۶ نشان داده شده است [۱۲].



شکل ۴-۲۶- مشخصات نمونه‌ها و شکل تقویت [۱۲]

نتایج حاصل در نمودارهای زیر نشان داده شده است (شکل ۴-۲۷) [۱۲].

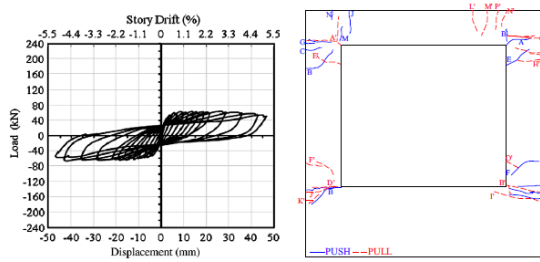


Fig. 9. Base shear vs. story drift relationship and damage pattern for bare frame specimen.

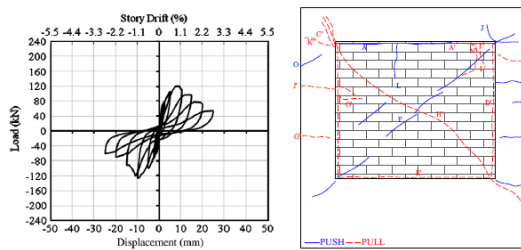


Fig. 10. Base shear vs. story drift relationship and damage pattern for infilled frame specimen.

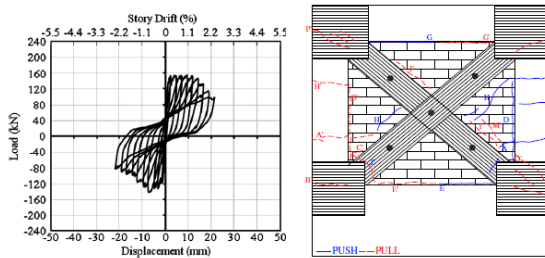


Fig. 11. Base shear vs. story drift relation and damage pattern for cross-braced system.

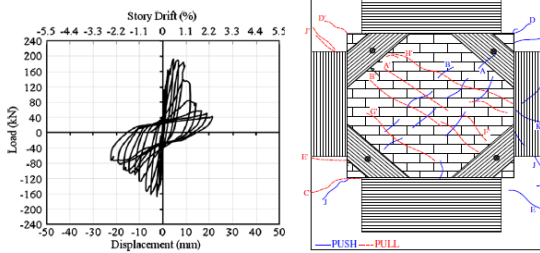


Fig. 12. Base shear vs. story drift relation and damage pattern for diamond-braced system.

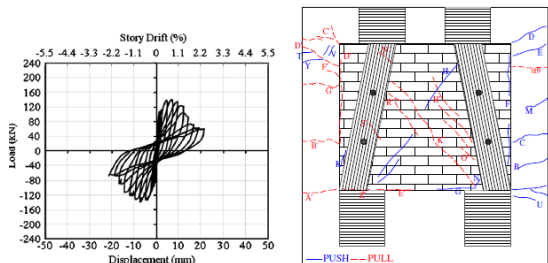


Fig. 13. Base shear vs. story drift relation and damage pattern for off-diagonal-braced system.

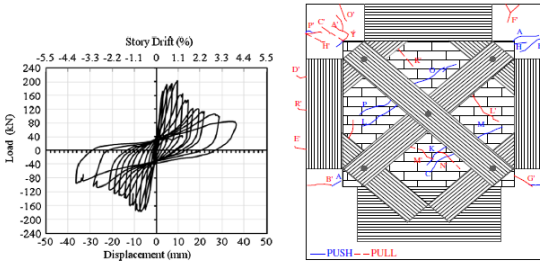


Fig. 14. Base shear vs. story drift relation and damage pattern for cross diamond-braced system.

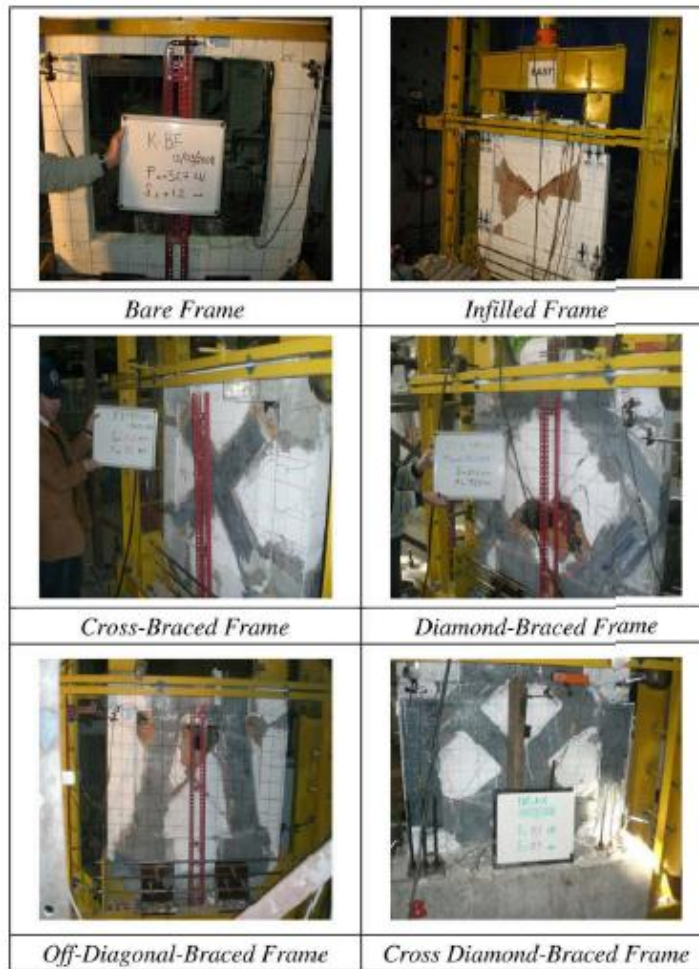
شکل ۴-۲۷- نمودار نتایج و محل ترکها [۱۲]

نتایج به خوبی نشان می دهد که کدامیک از شکل های بالا نتیجه بهتری به دست می دهد. همچنین می توان مقدار مقاومت نهایی آن ها را در زیر بارگذاری فشار و کشش در جدول ۴-۹ مشاهده نمود.

جدول ۴-۹- مقاومت نهایی نمونه ها [۱۲]

Specimen	Push (kN)	Pull (kN)
Bare frame	61.4	-62.2
Infilled frame	119.9	-126.0
Cross-braced frame	153.0	-139.9
Diamond-braced frame	191.8	-166.2
Off-diagonal-braced frame	137.0	-138.0
Cross diamond-braced frame	203.0	172.0

همچنین ذیلا عکس هایی از تخریب نمونه ها را مشاهده می کنید (۴-۲۸) [۱۲]:



شکل ۴-۲۸- نمونه‌ها پس از انجام آزمایش [۱۲]

در این قسمت یکی از آزمایش‌هایی که در کشورمان توسط دکتر ناطقی و مهندس دهقانی در پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله انجام گرفته است را بررسی می‌کنیم [۱۳].

برای انجام آزمایشات از ۴ نمونه قاب بتنی میان‌پر با آجر فشاری و یک دهانه یک طبقه، یکی به عنوان نمونه کنترل و سه نمونه مقاوم شده استفاده شده است. در نمونه مقاوم شده اول پای ستون-ها تا ارتفاع ۴۰ سانتیمتر دور پیچ شده به علاوه در محل اتصال ورق‌های پلیمری کربنی با دو کارکرد مختلف خمشی و برشی استفاده شده است.

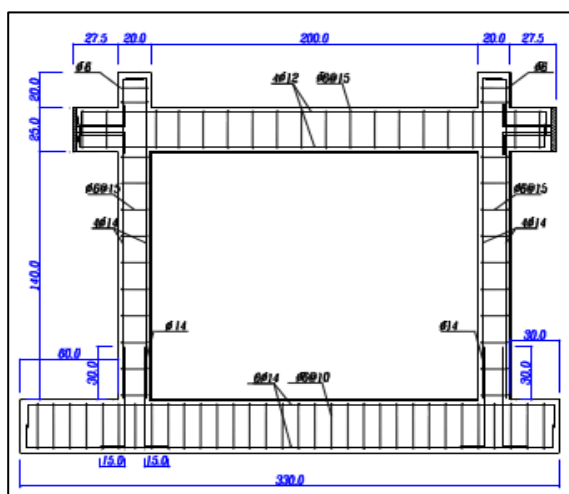
همچنین میان‌قاب آجری در دو طرف خود توسط این ورق‌ها به صورت قطری تقویت شده و با انکرهای فیتیله‌ای به قاب پیرامونی و به دیوار آجری متصل گردیده و با نام نمونه S<sup>۱</sup> مشخص شده

است.

نمونه مقاوم شده دوم یا S<sup>۲</sup> مانند نمونه S<sup>۱</sup> بوده با این تفاوت که تعداد انکرهای فیتیله‌ای آن مطابق با مشاهده نقاط جدایش ورق‌های قطری از دیوار در تست S<sup>۱</sup> افزایش یافته است. نمونه مقاوم شده سوم یا S<sup>۳</sup> شبیه نمونه S<sup>۱</sup> بوده اما علاوه بر پای ستون‌های قاب از مرز اتصال با تیر فوقانی تا ارتفاع ۴۰ سانتیمتر دور پیچ شده و در محل اتصال ورق‌های خمشی و برشی به کار رفته است. در طراحی، ساخت و اجرای قاب بتنی نقص‌های رایج در سازه‌های بتنی موجود مانند مقاومت کم بتن، هم پوشانی نا کافی میلگردهای طولی، استفاده از خم ۹۰ درجه، حذف آرماتور برشی در محل اتصال و کیفیت پایین بتن لحاظ شده است. علت منظور کردن چنین مواردی تاکید بر کارایی روش ارایه شده برای سازه‌های موجود می‌باشد.

میان‌قاب آجری از آجرهای فشاری دستی مطابق با کاربرد معمول آن‌ها در ساختمان‌های بتنی موجود ساخته شده و اتصال آن به قاب پیرامونی، ساده و با قرار دادن ملات بنایی در مرز اتصال انجام گردیده است. ملات بنایی نیز با نسبت‌های رایج شامل ۱ حجم سیمان و ۶ حجم ماسه ساخته شده است.

مشخصات قاب در شکل ۴-۲۹ آمده است :



شکل ۴-۲۹- مشخصات نمونه‌ها و نحوه میلگرد گذاری [۱۳]

نمونه‌ها:

### نمونه کنترل، SC

نمونه کنترل با نام SC شامل قاب و میان قاب آجر فشاری با ضخامت ۱۰ سانتیمتر و جزئیات طراحی و اجرای مشابه با نمونه‌های مقاوم شده به عنوان نمونه شاهد تست شده است. درزهای افقی میان قاب دارای حداکثر ارتفاع ۲ سانتیمتر و درزهای قائم با عرض حداکثر ۱ سانتیمتر ساخته شده و کاملاً با ملات پر گردیده است.

برای بررسی ساده‌تر و کنترل محل تشکیل ترک‌ها یا یک طرف میان قاب با لایه بسیار نازک گچ پوشانده شده و از انجام هرگونه پلاستر سیمانی به منظور جلوگیری از تغییر سختی دیوار خودداری شده است.

### نمونه S۱

نمونه S۱ دارای قاب بتنی و میان قاب بنایی شبیه نمونه SC بوده و تقویت آن شامل استفاده از ورق‌های CFRP با کارکرد خمشی و برشی در محل اتصال ستون به تیر فونداسیون، دور پیچ دو لایه پایه ستون تا ارتفاع ۴۰ سانتیمتر و تزریق چسب به سوراخ و قرار دادن فیتیله‌ها در آن، بخشی از ورق به طول ۱۰ سانتی متر از هر سمت میان قاب بیرون قرار گرفته که پس از تفکیک بخش‌های برش داده شده بر روی ورق قطری متصل شده‌اند.



شکل ۴-۳۰- انکرهای فیتیله‌ای [۱۳]

## نمونه S<sup>۲</sup>

مشخصات بتن ، شیوه میلگرد گذاری و کیفیت بتن نمونه S<sup>۲</sup> مانند سایر نمونه‌ها و تقویت آن با ورق CFRP نیز مشابه نمونه S<sup>۱</sup> می‌باشد. اما تعداد انکرها بر روی میان‌قاب افزایش یافته است. علت این افزایش مشاهده جدایش زود هنگام برخی از نقاط ورق و تقویت قطری میان‌قاب و خارج شده آن از باربری می‌باشد. بنا براین انکرهای اضافه شده در این نقاط با الگوی خاصی چیده شده به طوریکه فاصله میان دو انکر متوالی حداکثر ۴۰ سانتیمتر می‌باشد. در نزدیکی کنج‌ها نیز از انکرهای به شکل منگنه که ورق‌های دو طرف دیوار را کاملاً به شکل منگنه در خود دربر می‌گیرد استفاده شده است.

## نمونه S<sup>۳</sup>

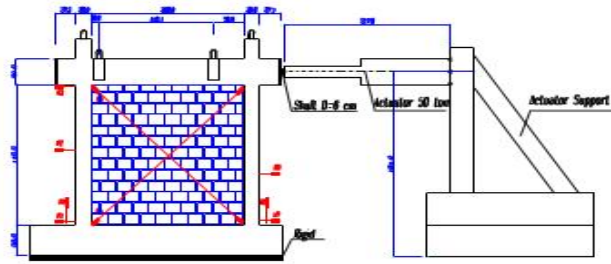
شکست‌های برشی ستون‌ها در نمونه‌های S<sup>۱</sup> و S<sup>۲</sup> سبب شد تا در نمونه S<sup>۳</sup> بالای ستون‌ها نیز مشابه آنچه در پای ستون‌ها بیان گردید با ورق‌های CFRP تقویت گردد. به این ترتیب از مرز اتصال ستون به تیر فوقانی تا ارتفاع ۴۰ سانتیمتر از ستون با دو لایه CFRP دور پیچ شده و همچنین از ورق‌های با کارکرد خمشی و برشی در محل اتصال ستون به تیر فوقانی استفاده شده است. تقویت قطری میان‌قاب و تعداد انکرهای متصل کننده این ورق‌ها به کنج‌های قاب بتنی مانند نمونه S<sup>۱</sup> و S<sup>۲</sup> بوده اما تعداد انکرهای میان‌قاب بنایی مانند نمونه S<sup>۲</sup> بوده و به جای انکرهای منگنه‌ای از همان انکرهای فیتیل‌ای استفاده شده است.

روش انجام کار مشابه نمونه‌های S<sup>۱</sup> و S<sup>۲</sup> می‌باشد.

نحوه انجام آزمایش به صورت شکل ۴-۳۱ است که در آن بارگذاری توسط یک جک ۵۰ تنی

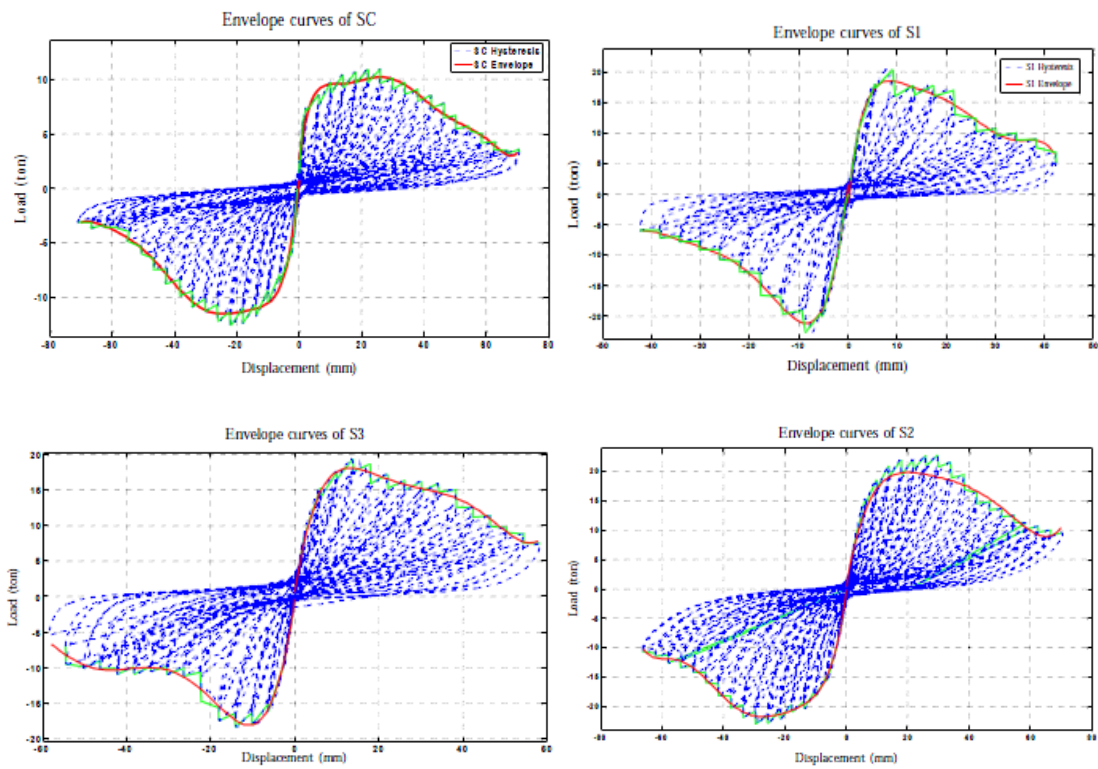
وارد می‌شود.





شکل ۴-۳۱- چیدمان آزمایش [۱۳]

در شکل ۴-۳۲ منحنی‌های هیستریزیس مربوط به نمونه‌های آزمایش شده را مشاهده می‌کنیم.



شکل ۴-۳۲- منحنی نتایج [۱۳]

نتایج حاصله از این تحقیق عبارتند از: مقاومت‌سازی با ورق‌های پلیمری مسلح تأثیر چندانی بر روی سختی اولیه نداشته در حالیکه بر روی روند کاهشی سختی مؤثر است. کاهش سختی در نمونه‌های مقاوم شده تا ۱۵ کیلو نیوتن بر میلی‌متر شدیدتر بوده و پس از آن روند کاهشی نرم‌تر می‌گردد. همچنین مقدار این کاهش برای حالتی که بالا و پایین ستون‌ها تقویت شود کم‌تر بوده است.

نمونه‌های مقاوم شده انرژی بیشتری را مستهلک کرده‌اند. مقدار انرژی مستهلک شده در نمونه‌ای که بالا و پایین ستون تقویت شده است، بیشتر است. برای این نمونه مقدار انرژی مستهلک شده در انتهای آزمایش تقریباً دو برابر نمونه کنترل می‌باشد. از آنجا که تست نمونه S۱ در تغییر مکان ۴۴ میلی‌متر متوقف شده است، امکان مقایسه مقدار انرژی مستهلک شده در تغییر مکان نهایی وجود ندارد. اما انرژی مستهلک شده در این میزان جابجایی تقریباً ۱/۵ برابر نمونه کنترل بوده است. انرژی مستهلک شده در تغییر مکان ۴۴ میلی‌متر برای نمونه کنترل در حدود  $2 \times 10^4 N.m$  بوده و برای نمونه S۱ در حدود  $3 \times 10^4 N.m$  و برای نمونه S۲ برابر با  $4 \times 10^4 N.m$  می‌باشد.

استفاده از ورق‌های پلیمری مسلح برای مقاومت‌سازی قاب‌های بتنی میان‌پر سبب می‌شود تا کاهش سختی با روند کندتری صورت گیرد.

با توجه به نتایج آزمایشات به نظر می‌رسد استفاده از روش مقاومت‌سازی ارائه شده می‌تواند سبب استهلاک بیشتر انرژی گردد. از طرفی هرگاه بالا و پایین ستون‌ها تقویت گردد، قابلیت استهلاک انرژی می‌تواند به دو برابر افزایش یابد.

تقویت میان‌قاب آجری فشاری به صورت قطری سبب تغییر الگوی ترک‌خوردگی و تمرکز شکست در گنجهای میان‌قاب شده و به پایداری دیوار در مقابل بارهای درون صفحه و خارج از صفحه کمک شایانی می‌کند. همچنین از بروز ترک‌های متعددی که عامل فروریزش و شکست موضعی میان‌قاب هستند جلوگیری می‌نماید.

به نظر این محققین مقاومت‌سازی قاب میان‌پر با پلیمرهای مسلح کربنی سبب افزایش دو برابر در

مقاومت شده و سطح آن را در پایان بارگذاری افزایش می‌دهد. همچنین به طور کلی انتظار می‌رود مقاومت قاب میان‌پر تقویت شده در انتهای بارگذاری ۲/۵ برابر بیشتر از حالت اولیه باشد.

استفاده از دورپیچ در پای ستون‌ها سبب افزایش شکل‌پذیری سیستم شده و شکست‌های ترد برشی پای ستون و بالای آن را مهار می‌کند. در این حالت انتظار می‌رود تنها در بارگذاری شدید ترک‌های خمشی با عرض بسیار کم در وسط ستون تشکیل شود.

وجود انکر جهت جلوگیری از جدایش ورق‌های پلیمری از سطح دیوار کاملاً ضروری است. وجود انکرهای فیتیل‌ای سبب می‌شود تا از ظرفیت کششی ورق‌ها استفاده بهینه‌ای شود و از جدایش‌های زود هنگام که عملاً ورق‌ها را از باربری خارج می‌کند جلوگیری شود [۱۳].

## فصل پنجم

نحوه مدل سازی اعضای بتن آرمه،

میان قاب آجری و FRP در

نرم افزار ANSYS

روش اجزای محدود، روشی عددی است که می‌توان آن را برای حل مسائل متعدد و متنوع مهندسی در حالات مختلف پایدار، خطی یا غیرخطی مانند تحلیل تنش، انتقال حرارت و جریان سیال به کار برد. این روش که ریشه‌های آن به سال‌های اولیه ۱۹۰۰ میلادی بر می‌گردد، عملاً در دهه ۶۰ میلادی به صورت نظام یافته و مدون، وارد مباحث مهندسی به خصوص مهندسی مکانیک و عمران شد و در دهه پایانی هزاره دوم به طور شگفت‌آوری در مراکز علمی و صنعتی جهان رسوخ نمود.

به طور کلی برای حل مسائل فیزیکی سه روش موجود است [۱۴]:

۱- روش تحلیلی دقیق (Exact Solution)

۲- روش عددی (Numerical Solution)

۳- روش تجربی (Experimental Method)

روش حل عددی که اجزای محدود زیر مجموعه آن می‌باشد، یکی از پرکاربردترین روش‌های مورد استفاده در حل مسائل مهندسی است. در روش اجزای محدود غالباً مسائل فیزیکی به کمک معادلات دیفرانسیل یا کمینه نمودن انرژی پتانسیل حاکم بر سیستم حل می‌شوند.

بدون شک روش اجزای محدود، انقلابی در صنعت جهان و نحوه نگرش به تحلیل و طراحی به وجود آورد. حل مسائلی که توسط روش معمول تحلیلی غیرممکن می‌نمود، قابلیت مدل‌سازی فرآیندهای واقعی صنعتی با کم‌ترین ساده‌سازی‌ها، توانمندی روش در ارائه نتایج قابل اطمینان، کاهش هزینه‌های سنگین تست‌های عملی در فرآیندهای طراحی، سرعت بالای روش در حل مسائل و بالاخره افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی در طراحی باعث گردید تا این روش به عنوان جزء جدانشدنی پیشرفت صنعتی درآید. نرم‌افزارهای تجاری اجزای محدود با هدف پاسخ به نیازمندی‌های علمی و صنعتی، طراحی و ... به بازار ارائه گردیدند. تعداد و تنوع این نرم‌افزارها امروزه به حدی رسیده که کاربر نمی‌تواند به راحتی یکی را انتخاب کند. گرچه قابلیت‌ها و توانمندی‌های این نرم‌افزارها متفاوت

است، اما در بسیاری از تحلیل‌ها مشابه و یکسان می‌باشند که می‌توان به نرم‌افزارهایی هم‌چون ANSYS، MARC، ABAQUS، ADINA، DIANA، NASTRAN و ASKA اشاره کرد.

اولین نسخه نرم‌افزار ANSYS در سال ۱۹۷۱ توسط محققین دانشگاهی شرکت Swanson پایه‌گذاری شد که اکنون با بیش از یک میلیون خط کد رایانه‌ای، جزء برترین نرم‌افزارهایی است که قادر به انجام تحلیل‌های غیرخطی و مکانیک شکست می‌باشد. ویرایش‌های گوناگونی از این نرم‌افزار موجود است که در این پایان‌نامه از ویرایش‌های ۱۱ و ۱۲ آن استفاده شده است. کار کردن با نرم‌افزار همیشه با فراگیری آن آغاز می‌شود. این عمل شاید ساده‌ترین بخش هر مدل‌سازی به حساب آید؛ آن‌چه بیش از همه اهمیت دارد، رسیدن به جواب‌های درست و قابل اطمینان در نتایج به دست آمده است. لذا در این فصل پس از آشنایی با مفهوم تحلیل غیرخطی و بیان اهمیت و لزوم کالیبراسیون، نحوه مدل‌سازی اعضای بتن‌آرمه، میان‌قاب آجری و FRP آموزش داده شده و با ارائه مدل‌سازی قاب بتن مسلح ساده، قاب بتن مسلح با میان‌قاب تقویت شده و نشده آزمایشگاهی، نکات حائز اهمیت در مدل‌سازی بیان می‌گردد. در ادامه با بررسی نتایج آن، نحوه حصول اطمینان به نتایج یک تحلیل غیرخطی به روش اجزای محدود، توضیح داده می‌شود.

## ۵-۲- مروری بر مفهوم تحلیل غیرخطی

به طور کلی غیرخطی شدن یک مسئله می‌تواند در دو شکل ظاهر شود [۱۵]:

**الف - غیرخطی هندسی:** این نوع غیرخطی بودن در برگیرنده تغییرات هندسه سازه بوده که

در این نوع مسائل ماتریس سختی سازه  $[K]$  تابعی از بردار تغییرمکان‌ها  $[U]$  و مشتقات آن است.

**ب - غیرخطی بودن ماده:** این نوع مسائل ممکن است در اثر وجود یک رابطه غیرخطی بین

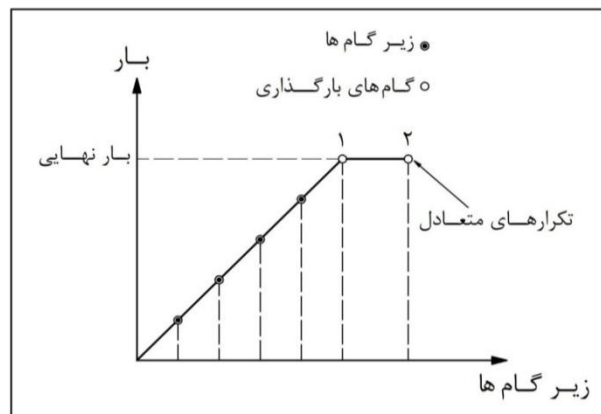
تنش و کرنش مواد به وجود آید. در این مواد تنش تابعی غیرخطی از کرنش است. از مصادیق این نوع

مواد بتن است. در سازه‌های بتن‌آرمه هر دو ماده بتن و فولاد رفتار کاملاً غیرخطی دارند. در نرم‌افزار

ANSYS انواع مختلفی از مواد غیرخطی قابل تعریف هستند. در بین این مواد، بتن به عنوان یک ماده

غیرخطی، شناخته شده و می‌توان ماده‌ای را به نام بتن در فهرست مواد غیرخطی آن معرفی کرد. در حل یک مساله غیرخطی عوامل بسیار مهمی دخالت دارند به طوری که عدم دقت در وارد کردن و معرفی آنها باعث می‌شود که نتایج کاملاً غلطی ارائه شود. از جمله این عوامل می‌توان به بارگذاری اشاره کرد؛ به طوری که تغییر در نحوه اعمال بار منجر به تغییر در روند حل و نتایج خواهد شد. در یک تحلیل غیرخطی می‌بایست بار به صورت تدریجی به سازه اعمال گردد. این کار در نرم‌افزار ANSYS طی دو روند کاملاً متمایز صورت می‌پذیرد. اول آن که بار در مراحل مختلف تحت عنوان گام بارگذاری به سازه اعمال شود.

در هر گام بارگذاری، زمان، یک پارامتر نمادین برای نشان دادن زمان انتهای بارگذاری است. روند دومی که در اعمال بار طی می‌کنیم، قطعه‌قطعه کردن هر گام بارگذاری است؛ که به هر یک از این قطعه‌های اعمال بار، زیرگام می‌گوییم. به مجموعه این بارگذاری‌های قطعه‌قطعه و متوالی تاریخچه بارگذاری گفته می‌شود. مفهوم گام بارگذاری و زیرگام در شکل ۵-۱ نشان داده شده است. در هر گام بارگذاری تعداد زیرگام می‌تواند بر حسب ضرورت زیاد یا کم گردد. این بدان معنا است که در مراحل اولیه بارگذاری می‌توان هر گام را با تعداد کم‌تری زیر گام حل کرد ولی، در بارهایی نزدیک به بار شکست، هم گام‌ها و هم‌چنین زیرگام‌های آن‌ها را می‌بایست ریزتر در نظر گرفت. باید به این نکته توجه کرد که میزان یا نحوه اعمال برخی از پارامترها برای هر مسئله متفاوت است.



شکل ۵-۱- مفهوم گام بارگذاری و زیرگام در تحلیل غیرخطی

در حل یک مدل غیرخطی بتن آرمه واضح است این پارامترها باید متناسب با همان حل تنظیم گردند. لذا در بخش‌های بعدی که منحصراً به مدل‌سازی غیرخطی در نرم‌افزار ANSYS پرداخته می‌شود، در مورد پارامترهای مهم در حل غیرخطی یک مدل بتن آرمه به تفصیل پرداخته خواهد شد.

### ۵-۳- جایگاه و اهمیت کالیبراسیون نمونه‌ها

زمانی که نمونه‌هایی را در آزمایشگاه می‌سازیم و آن‌ها را مورد آزمایش قرار می‌دهیم، دسته‌ای از نتایج در اختیار قرار می‌گیرد. گرچه ممکن است بعضی از آن نتایج همراه با خطا باشد؛ لیکن کلیت این نتایج به عنوان مبنایی برای استخراج‌های بعدی مورد توجه و استفاده قرار می‌گیرد. در مقابل، در یک تحلیل کامپیوتری اولین سؤال اساسی در مواجهه با هر نتیجه‌ای آن است که چگونه و تا چه حد به صحت این نتیجه اطمینان داریم. در هر تحقیق برای آن که بتوانیم نتایج تحلیل‌های رایانه‌ای خود را مبنایی برای نتیجه‌گیری‌ها و مقایسه‌های بعدی قرار دهیم، لازم است ابتدا توانمندی خود را برای مدل‌سازی به اثبات برسانیم. بهترین روند برای نیل به این هدف آن است که نمونه‌هایی از تحقیقات آزمایشگاهی (یا احیاناً تحلیلی) انجام شده توسط سایر محققین را انتخاب کنیم و با روش یا نرم‌افزار مورد استفاده خود سعی در به دست آوردن نتایج تقریباً مشابه داشته باشیم [۱۵].

در تحقیق حاضر این امر کلی و مهم با دو پیچیدگی همراه شده است؛ اول آن که ماهیت مدل‌سازی ماده‌ای مانند بتن (بتن آرمه) با وجود ترک‌خوردگی و ساختار حاکم بر شکست بتن از یک روند غیرخطی تبعیت می‌کند که امری پیچیده و حساس است. دوم آن که به نظر می‌رسد رفتار چندگانه بتن، فولاد، آجر و کامپوزیت را در کنار یکدیگر، به سختی و با رعایت نکات بسیار دقیقی می‌توان مدل‌سازی کرد. بنابراین وجود سرفصلی به منظور کالیبراسیون مدل‌ها، در بین کارهای انجام شده در این تحقیق امری اجتناب‌ناپذیر است.



## ۴-۵- نکات قابل توجه در مدل‌سازی اجزای محدود یک عضو بتن آرمه

به منظور مدل نمودن عضو بتن آرمه، لازم است که رفتار این ماده، هم‌چنین هندسه مدل در نرم‌افزار مورد نظر، شبیه‌سازی گردیده و مدل شود. در این مدل‌سازی موارد زیر باید رعایت گردد:

۱- ترک‌خوردگی و اثرات آن بر رفتار بتن تحت تنش کششی در نظر گرفته شود و در مواردی که بر بتن فشار محصورشدگی نیز اعمال گردیده، اثرات آن مدل گردد.

۲- با انتخاب المان و ماده‌ای با رفتار مناسب، افزایش مقاومت فشاری و کرنش بتن هنگامی که فشار محدودکننده جانبی قابل ملاحظه‌ای در اطراف نمونه وارد می‌شود، مدل گردد.

۳- از المان‌هایی مناسب برای در نظر گرفتن رفتار مصالح به کار رفته در ساخت نمونه، هم‌چون بتن، کامپوزیت FRP و آرماتورهای موجود، استفاده شود. به عنوان مثال، باید به دنبال راه‌کاری باشیم که از تحمل نیرو توسط FRP، به هنگام فشار جلوگیری شود.

۴- مقاومت برشی حاصل از درگیری بین سنگ‌دانه‌های موجود در مقطع ترک‌خورده در نظر گرفته شود [۱۶].

۵- در هر نوع مدل‌سازی از جمله مدل‌سازی اعضای بتن مسلح، باید با توجه به رفتار مورد انتظار از مدل، مدل‌های رفتاری و المان‌های کارا را پس از مطالعه دقیق راهنمای نرم‌افزار ANSYS انتخاب نمود.

مجموعه فوق از نکات لازم و ضروری برای مدل نمودن رفتار هر سازه‌ای که متشکل از اعضای بتن آرمه است، می‌باشد.

## ۵-۵- معرفی گزینه‌های المان‌ها، مدل‌های رفتاری و ثابت‌های حقیقی

اولین گام در مدل‌سازی اجزای محدود هر سازه‌ای، شناسایی مشخصات آن اعم از، رفتار مصالح به کار رفته در سازه، ابعاد، شرایط تکیه‌گاهی و ... می‌باشد.

مدل‌سازی قابلیت‌ها، رفتار و خواص مصالح، توسط سه گزینه زیر صورت می‌گیرد.

۱- المان (ELEMENT): در نرم‌افزار ANSYS، المان‌ها به منظور شبیه‌سازی قابلیت‌هایی نظیر خزش، تغییرشکل‌های بزرگ، تغییرشکل‌های پلاستیک، ترک‌خوردگی و خردشدگی و ... به کار می‌روند. به عنوان مثال با توجه به خواست ما در شبیه‌سازی ترک‌خوردگی و خردشدگی بتن، می‌بایست ما از المانی که دارای این قابلیت‌ها است استفاده کنیم. بنابر ویژگی‌های مورد نیاز در رفتار واقعی عضو، قابلیت‌های المان‌ها، قابل تنظیم در گزینه OPTION مربوط به آن المان هستند و به عنوان KEYOPT(n) شناخته می‌شوند، که n یک شماره مشخص می‌باشد. المان‌ها به دو گروه اصلی دو بعدی و سه بعدی تقسیم‌بندی می‌شوند.

۲- مصالح (MATERIAL): به منظور تعیین و اعمال رفتار مکانیکی مناسب و در برخی موارد، تنظیم برخی پارامترهای قابلیت‌های المان‌ها، به کار می‌روند. به عنوان مثال مدول الاستیسیته، مدول برشی، ضریب پواسون، منحنی تنش-کرنش مصالح و مقاومت‌های کششی و فشاری بتن مربوط به تنظیمات این گزینه هستند.

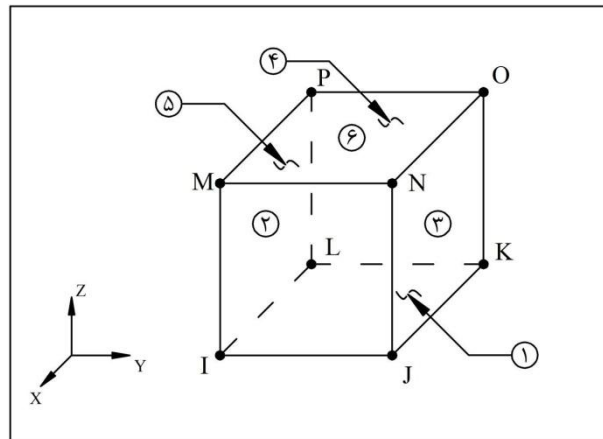
۳- ثابت حقیقی (REAL CONSTANT): ثابت‌های اعضای سازه‌ای در این قسمت مشخص می‌شوند. به عنوان مثال سطح مقطع آرماتورها، زوایای دورپیچ FRP، کرنش اولیه عضو و ... مربوط به تنظیمات این گزینه هستند. سه گزینه مذکور، در مدل‌سازی هر سازه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به گونه‌ای که ممکن است با کوچک‌ترین اشتباه و بی‌دقتی در تعریف پارامترهای مربوط به این گزینه، نتایج حاصل از تحلیل با خطای قابل ملاحظه‌ای همراه باشد.

## ۵-۶- مدل‌سازی بتن در نرم‌افزار ANSYS

### ۵-۶-۱- المان SOLID۶۵

المان مورد استفاده در مدل کردن قابلیت‌های بتن، المان SOLID۶۵ است. با توجه به

شکل ۵-۲ المان مذکور، المانی هشت گره‌ای بوده که هر گره آن، دارای سه درجه آزادی جابجایی در جهات X، Y و Z می‌باشد. این المان دارای قابلیت‌های ویژه جهت مدل‌سازی بتن، بتن‌آرمه، سنگ و کامپوزیت‌های تقویت‌شده هم‌چون فایبرگلاس می‌باشد. این المان شبیه به المان SOLID۴۵ که المانی برای مدل‌سازی اجسام جامد سازه‌ای سه بعدی با توانایی مدل‌سازی تغییرشکل‌های پلاستیک و خزش است، می‌باشد و علاوه بر آن قابلیت مدل‌سازی ترک‌خوردگی و خردشدگی مصالح را نیز دارا می‌باشد [۱۷].



شکل ۵-۲- المان SOLID۶۵ به همراه دستگاه مختصات محلی [۱۷]

برای المان SOLID۶۵ چهار خصوصیت کلی در نظر گرفته شده عبارتند از:

KEYOPT(۱)، که قابلیت ایجاد تغییرشکل‌های اضافی را به المان می‌دهد؛ و KEYOPT(۵) و KEYOPT(۶)، که منظور تعیین گزینه‌های خروجی قابل چاپ برای المان به کار می‌رود. همچنین مهم‌ترین قابلیت این المان KEYOPT(۷) می‌باشد. در این المان در صورت استفاده از قابلیت ترک‌خوردگی، چنان‌چه حل به یک حالت ترک‌خورده همگرا گردد، در جهت عمود بر صفحه ترک‌خوردگی، سختی المان صفر می‌گردد. چنان‌چه  $KEYOPT(۷)=۱$  در نظر گرفته شود، در زمانی که ترک‌خوردگی قریب الوقوع باشد، با استفاده از ضریب کاهش مقاومت بتن، همگرایی محاسبات تسریع می‌گردد [۱۶].

## ۵-۶-۲- مصالح (مدل رفتاری) مورد استفاده در شبیه‌سازی بتن

در این تحقیق، به منظور شبیه‌سازی رفتار بتن محصورنشده از ۳ مصالح یا مدل رفتاری استفاده شده است.

### ۱- ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic): این مدل رفتاری دارای دو پارامتر

مدول الاستیسیته و ضریب پواسون است که برای شبیه‌سازی رفتار بتن در ابتدای بارگذاری به کار می‌رود. در این مدل رفتاری می‌باید، مدول الاستیسیته مماسی اولیه و ضریب پواسون بتن وارد شود.

### ۲- کینماتیک چندخطی (Multilinear Kinematic Hardening plasticity): این مدل

(MKIN) با تعیین منحنی تنش-کرنش بتن، به منظور شبیه‌سازی رفتار بتن در طول بارگذاری به کار می‌رود. از نکات حائز اهمیت این مدل سازگاری آن با مدل کردن نرم‌شدگی مصالح است. در مواردی که مدل کردن نرم‌شدگی حائز اهمیت نیست می‌توان، از مدل ایزوتروپیک چندخطی (MISO) به جای کینماتیک چندخطی استفاده کرد.

در این مدل رفتاری می‌بایست، منحنی تنش-کرنش بتن وارد شود. با توجه به دقت مورد نظر می‌توان تعداد نقاط ورودی را کم و یا زیاد کرد. منحنی تنش-کرنش بتن را می‌توان از آزمایشات انجام شده و یا مدل‌های ریاضی پیشنهادی مانند، روابط هاگنستاد و تودسچینی [۱۸] به دست آورد.

### ۳- بتن (Concrete): این مدل رفتاری به منظور تعیین مشخصات و پارامترهای مربوط به

قابلیت‌های ترک‌خوردگی و خردشدگی بتن به کار می‌رود. در ادامه به بررسی دقیق این مدل رفتاری می‌پردازیم.

نکته بسیار مهمی که در مدل‌سازی اجزای محدود بتن‌آرمه باید به آن پرداخت، نحوه وارد شدن مساله ترک‌خوردگی المان‌ها در روند حل است. هم‌چنین غیرهمگن و غیرایزوتروپیک بودن بتن به پیچیدگی حل می‌افزاید. بسیاری از تحلیل‌های اولیه اجزای محدود اعضای بتن‌آرمه، ترک‌خوردگی را با استفاده از مدل‌های از پیش تعریف شده برای ترک‌خوردگی در محاسبات وارد می‌ساختند. با چنین

نگرشی در هر مرحله از بارگذاری هندسه‌ها تغییر می‌یافت؛ لذا، این دسته از تحلیل‌ها وقت‌گیر و محدود بودند [۱۶]. مدل دیگری که در تحلیل‌های اجزای محدود به کار می‌رود مدلی است که هاله‌ای از ترک خوردگی را در نظر می‌گیرد. این مدل، بتن ترک‌خورده را به صورت یک ماده اورتوتروپیک در نظر می‌گیرد. به این معنا که پس از ترک خوردن المان، مدول الاستیسیته را در راستای عمود بر ترک ایجاد شده در آن المان صفر منظور می‌کند. هر دو روش دارای قدمتی حدود ۳۵ سال بوده [۱۶] که روش دوم روش مورد استفاده در ANSYS است.

در نرم‌افزار ANSYS با استفاده از مدل رفتار مادی با عنوان CONCR، شکست مود ترد پیش‌بینی می‌گردد. هر دو نوع شکست ترک‌خوردگی و خردشدگی در این مدل در نظر گرفته شده است. این مدل تنها در المان بتن‌آرمه SOLID۶۵ قابل کاربرد می‌باشد و معیار شکست بتن به علت تنش‌های سه بعدی با استفاده از معیار شکست ویلیام-وارنک کنترل می‌گردد.

در این مدل رفتاری، نه پارامتر C۱ تا C۹ وجود دارد که در جدول داده‌های نرم‌افزار آورده شده است که پارامترهای C۳ تا C۸ مربوط به معیار شکست ویلیام-وارنک است. از میان این ۹ پارامتر، چهار پارامتر اول و پارامتر نهم به عنوان مقادیر ورودی به نرم‌افزار داده می‌شود و برای چهار پارامتر C۵ تا C۸ در معیار شکست ویلیام-وارنک، به صورت پیش‌فرض مقادیری برای آن در نظر گرفته شده است، که در صورت برقرار بودن رابطه (۵ - ۱)، این مقادیر معتبر می‌باشد. در این رابطه،  $\sigma_h$  تنش هیدرواستاتیک بوده و مطابق با رابطه (۵ - ۲) می‌باشد.  $f'_c$  مقاومت فشاری تک‌محوری بتن می‌باشد. هم‌چنین  $\sigma_{xp}$ ،  $\sigma_{yp}$  و  $\sigma_{zp}$  به ترتیب تنش‌های اصلی در جهات X، Y و Z می‌باشند.

یادآوری می‌شود که برای چهار پارامتر C۵ تا C۸، یا باید مقادیر در نظر گرفته شده در معیار

شکست ویلیام-وارنک را پذیرفت و یا هر چهار پارامتر را در نرم‌افزار وارد نمود.

$$|\sigma_h| \leq \sqrt{3}f'_c \quad (۵ - ۱)$$

$$\sigma_h = \frac{1}{3}(\sigma_{xp} + \sigma_{yp} + \sigma_{zp}) \quad (۵ - ۲)$$

پارامترهایی که باید توسط کاربر در جدول داده‌های مربوط به مدل مادی CONCR به نرم‌افزار داده شود عبارتند از:

۱- پارامتر اول (C1): ضریب انتقال برش در ترک باز یا  $\beta_t$ ؛ که مقدار آن بین صفر و یک متغیر است. از سوی محققین، مقادیر متفاوتی در بازه ۰/۰۵ تا ۰/۳ برای  $\beta_t$  پیشنهاد شده [۱۶] که با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته مقادیر پایین  $\beta_t$  منجر به قطع تحلیل می‌شود؛ لذا مقادیری در بازه ۰/۲ تا ۰/۳۵ برای  $\beta_t$  مناسب به نظر می‌رسد. در این تحقیق مقدار  $\beta_t$  برابر با ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

۲- پارامتر دوم (C2): ضریب انتقال برش در ترک بسته یا  $\beta_c$ ؛ که مقدار آن بین صفر و یک متغیر است. برای  $\beta_c$  تحقیقات انجام شده عدد ۱ را توصیه می‌کنند که با در نظرگیری توصیه نرم‌افزار ANSYS مبنی بر کوچک‌تر بودن مقدار  $\beta_c$  از ۱، مقدار آن برابر با ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

۳- پارامتر سوم (C3): مقاومت کششی محوری بتن یا  $f_r$ .

۴- پارامتر چهارم (C4): مقاومت فشاری تک‌محوری بتن یا همان  $f_c'$ .

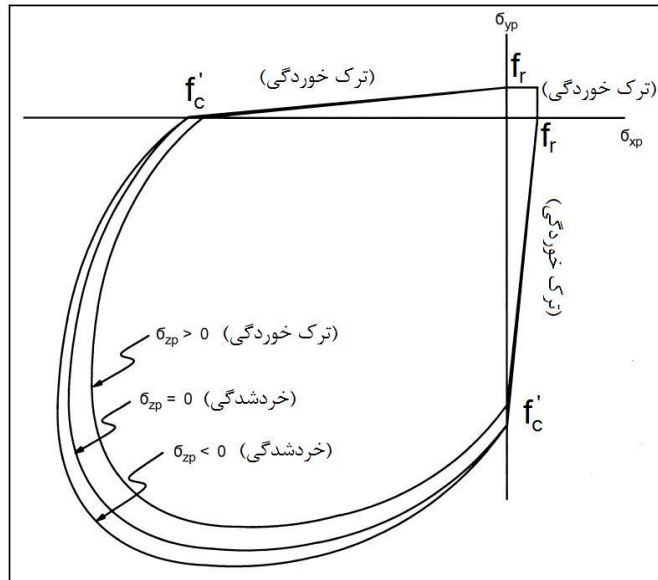
۵- پارامتر نهم تحت عنوان (C9): ضریب وادادگی مقاومت کششی یا  $T_c$  که مقدار پیش‌فرض آن ۰/۶ می‌باشد. چنانچه هر یک از پارامترهای سوم یا چهارم برابر با ۱- در نظر گرفته شود، به ترتیب از قابلیت ترک‌خوردگی و یا خردشدگی بتن در المان بتن‌آرمه صرف‌نظر می‌گردد [۱۶].

دو پارامتر مقاومت (پارامترهای سوم و چهارم) یعنی، مقاومت‌های فشاری و کششی محوری نهایی برای تعیین سطح شکست بتن بر اساس معیار ویلیام-وارنک (معیار شکست مورد استفاده در رفتار مادی CONCR) لازم می‌باشد و معیار شکست بتن بر اساس رابطه (۵ - ۳) تعیین می‌گردد. در این رابطه،  $F$  تابعی از تنش‌های اصلی ایجاد شده در المان SOLID۶۵ می‌باشد. هم‌چنین  $F_c$  مقاومت خردشدگی بتن و  $S$  سطح شکست بتن می‌باشد که این سطح شکست بر اساس تنش‌های اصلی و پنج پارامتر ورودی C3 تا C7 مربوط به مدل رفتاری CONCR تعیین می‌گردد.

$$\frac{F}{F_c} - S \geq 0 \quad (۳ - ۵)$$

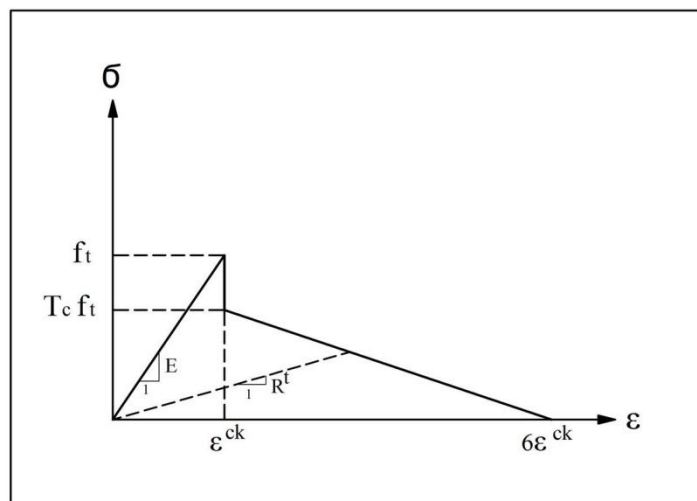
اگر در المانی این رابطه ارضاء نگردد، در این المان خردشدگی و یا ترک خوردگی ایجاد نمی‌شود؛ و در صورت برقراری این رابطه، چنانچه یکی از تنش‌های اصلی کششی باشد، المان شکسته می‌شود و اگر همه تنش‌های اصلی فشاری باشند، المان خرد می‌شود. این پدیده در شکل ۳-۵ با تعبیر دیگری بیان شده است. این شکل یک سطح شکست سه بعدی برای بتن را نشان می‌دهد و تنش‌های قابل ملاحظه غیر صفر اصلی در جهات X و Y به ترتیب با  $\sigma_{xp}$  و  $\sigma_{yp}$  نشان داده شده است. منحنی‌های مشخص شده در صفحه  $\sigma_{xp} - \sigma_{yp}$  معرف سه سطح شکست برای بتن می‌باشند. مدل شکست، تابعی از علامت تنش اصلی در جهت Z، یعنی  $\sigma_{zp}$  می‌باشد. به عنوان مثال اگر  $\sigma_{xp}$  و  $\sigma_{yp}$  هر دو منفی یعنی فشاری باشند و  $\sigma_{zp}$  اندکی مثبت یعنی کششی باشد، ترک خوردگی در جهت عمود به  $\sigma_{zp}$  قابل پیش‌بینی می‌باشد؛ و چنانچه  $\sigma_{zp}$  صفر و یا اندکی منفی گردد، المان آماده خرد شدن می‌باشد. در یک المان بتنی، ترک خوردگی زمانی که تنش کششی اصلی در هر جهتی خارج از سطح شکست قرار گیرد، رخ می‌دهد. زمانی که همه تنش‌های اصلی، فشاری و خارج از سطح شکست قرار گیرند، خردشدگی در بتن رخ می‌دهد، و پس از آن مدول الاستیسیته در همه جهات، صفر منظور شده و المان عملاً نابود می‌گردد [۱۶].

مدل رفتاری در نظر گرفته شده برای بتن تحت کشش و پس از ترک خوردگی، مطابق با شکل ۴-۵ می‌باشد. به منظور تسریع در همگرایی تحلیل، در صفحه ترک، مقاومت کششی آن المان با استفاده از ضریب وادادگی تنش کششی، برابر با  $T_c f_t$  در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳-۵- سطح سه بعدی شکست بتن در فضای تنش‌های اصلی بر اساس معیار شکست ویلیام-وارنک [۱۶]

مطابق شکل ۴-۵ در راستای عمود بر صفحه ترک، سختی المان ترک‌خورده در این راستا به جای صفر، برابر با  $R_t$  در نظر گرفته می‌شود؛ و در صورتی که  $KEYOPT(7)=0$  (مربوط به المان SOLID۶۵) باشد،  $T_c=0$  در نظر گرفته می‌شود. مهم‌ترین نتیجه صفر نشدن سختی المان در جهت عمود بر ترک بلافاصله پس از ترک خوردن المان، ایجاد مقاومت‌های برشی در المان و ایجاد قابلیت گسترش سطح ترک خوردگی در عضو می‌باشد.



شکل ۴-۵- مدل در نظر گرفته شده برای بتن تحت تنش کششی و پس از ترک خوردگی [۱۶]



## ۵-۷- مدل سازی آرماتورهای طولی و عرضی در نرم افزار ANSYS

در نرم افزار ANSYS دو راه کار به منظور مدل سازی آرماتورها وجود دارد [۱۷].

۱- استفاده از قابلیت المان SOLID۶۵.

۲- استفاده از المان LINK۸.

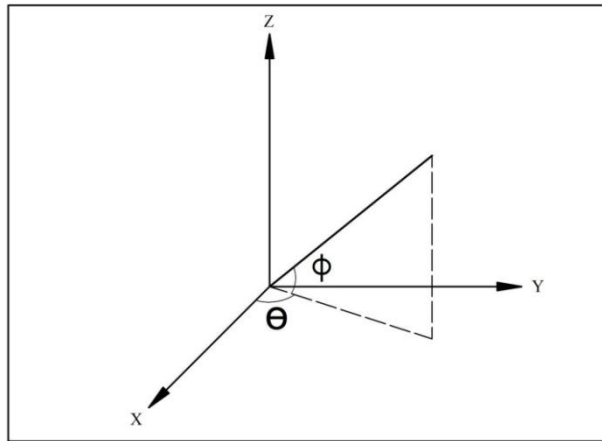
### ۵-۷-۱- قابلیت مدل سازی آرماتور در المان SOLID۶۵

در المان SOLID۶۵ قابلیت تعریف آرماتور در سه راستای مختلف وجود دارد که از آن به مدل Smearad یاد می شود. در این المان نسبت حجمی آرماتورها به حجم بتن در یک ناحیه مشخص و معین را می توان، به صورت فولاد پخش شده (Smearad) در آن حجم از بتن قرار داد، و با تعیین دو زاویه بر حسب درجه، آرماتورها را در امتداد مناسبی جایگذاری کرد.

برای این منظور در ثابت های حقیقی مربوط به المان SOLID۶۵ مشخصات آرماتور را تعریف می نماییم. این مشخصات شامل شماره مدل مادی (رفتاری) در نظر گرفته شده برای آرماتور با پارامتر MAT، نسبت حجم آرماتور تقسیم بر حجم کل المان که آرماتور در آن قرار می گیرد، با پارامتر VR و مقدار زوایای  $\phi$  و  $\theta$  با توجه به دستگاه مختصات محلی تعریف شده برای المان مطابق با شکل ۵-۵ می باشد.

مطابق شکل ۵-۵، زاویه  $\phi$  معرف زاویه امتداد آرماتورها با صفحه X-Y مختصات محلی، و زاویه  $\theta$  معرف مقدار زاویه تصویر امتداد آرماتورها در صفحه X-Y با محور X می باشد. این توده آرماتور، قابلیت تحمل کشش، فشار و تغییر شکل های پلاستیک و خزش را مطابق با ماده و خواص مادی (رفتاری) در نظر گرفته شده برای آن دارد و هیچ برشی را تحمل نمی کند.

دو ایراد کلی به این روش وارد است. اول آن که موقعیت مشخص و دقیقی برای آرماتورها در نظر گرفته نمی شود؛ و دوم آن که بین میلگرد و بتن چسبندگی کامل در نظر گرفته شده و به سختی می توان ارتباط دیگری بین آن دو در نظر گرفت [۱۵].



شکل ۵-۵- جهت‌های المان پخش‌شده (Smearred)، با دستگاه مختصات SOLID۶۵ [۱۷]

جهت برطرف کردن این ایرادها، دو راه حل کلی وجود دارد که منجر به ایجاد دو روش متفاوت

برای مدل‌سازی آرماتورهای اعضای بتن‌آرمه می‌شود [۱۵].

۱- حجم‌های مدل خود را در نواحی اطراف آرماتورها ریزتر می‌کنیم. این عمل در واقع سبب می‌شود که در آن نواحی، حجم‌های ریزتری با نسبت زیاد آرماتور داشته باشیم؛ به عبارت ساده‌تر می‌توان گفت که آرماتور را با المان SOLID۶۵ مدل کرده‌ایم و المانی که درصد بالایی از حجم آن در راستای آرماتور از جنس فولاد می‌باشد.

۲- آرماتورها با LINK۸ مدل شود.

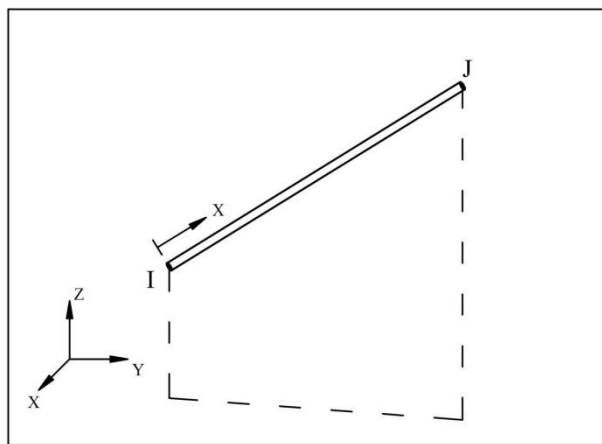
اشکال دیگری که به این شیوه مدل‌سازی آرماتورها وارد می‌شود آن است که مدت زمان فرایند تحلیل را به شدت افزایش می‌دهد و با توجه به محدودیت اکثر کاربران در زمینه دسترسی به رایانه‌های پرسرعت، استفاده از این روش منطقی به نظر نمی‌رسد.

### ۵-۷-۲- المان LINK۸

این المان دارای کاربردهای متنوع در مدل‌سازی‌های مهندسی بوده و بر این اساس می‌تواند به عنوان یک المان خرپا، یک المان کابل، یک المان اتصال و یا یک المان فنر و ... در نظر گرفته شود. این المان سه بعدی دو گره‌ای، یک المان فشار-کشش تک‌محوره با سه درجه آزادی در جهات X، Y و

Z در هر گره می‌باشد. لازم به ذکر است که رفتار کشش تنها و یا فشار تنها، با المان LINK۱۰ قابل تعریف می‌باشد [۱۷].

در شکل ۵-۶، موقعیت گره‌ها، شکل هندسی و دستگاه مختصات المان مشخص می‌باشد. این المان با دو گره، مساحت مقطع عرضی و یک کرنش اولیه، به همراه مشخصات مادی تعریف می‌گردد. مساحت مقطع عرضی و کرنش اولیه نیز در ثابت‌های حقیقی المان تعریف می‌گردند.



شکل ۵-۶- المان LINK۸ به همراه دستگاه مختصات محلی [۱۷]

مزایای استفاده از المان LINK۸ به منظور مدل‌سازی آرماتورها به قرار زیر است [۱۵].

- ۱- باعث سهولت در مدل‌سازی می‌شود.
  - ۲- مورد تأکید راهنمای نرم‌افزار.
  - ۳- ارتباط بین گره‌های میلگرد و بتن را می‌توان به هر شکل دلخواه ایجاد کرد.
  - ۴- زمان انجام تحلیل مدل ساخته‌شده به مراتب کمتر از مدل‌های ساخته‌شده با روش حجم‌های ریز (Smearred) است.
  - ۵- آرماتور دقیقاً سر جای خود مدل می‌شود.
- با توجه به مزایای مذکور به منظور مدل‌سازی آرماتورها از این المان استفاده شده است. در این سیستم مدل‌سازی المان‌های خطی آرماتور (LINK۸) را به دو صورت می‌توان تعریف نمود.

۱- با رسم خط و سپس شبکه‌بندی، به گونه‌ای که گره‌های ایجاد شده روی این خط (گره‌های آرماتور) درست روی گره‌های ایجاد شده در شبکه‌بندی بتن باشد. آن‌گاه می‌توان درجات آزادی گره‌هایی را که در یک موقعیت قرار دارند با استفاده از معادلات وابسته‌سازی به هم مرتبط کرد.

۲- روش دیگر آن است که ابتدا بتن را با استفاده از المان SOLID۶۵ شبکه‌بندی کنیم. سپس آرماتورهای طولی را در موقعیت مورد نظر بین گره‌های ایجاد شده در بتن و با استفاده از دستور Create Elements رسم کنیم. در این روش دیگر نیازی به معادلات وابسته‌سازی نیست؛ هر چند رسم آرماتور در این روش نیاز به حوصله و دقت بیشتر دارد.

### ۵-۷-۳- مصالح (مدل رفتاری) مورد استفاده در شبیه‌سازی فولاد آرماتورها

در این تحقیق، به منظور مدل‌سازی رفتار فولاد آرماتورها، از ۲ مصالح یا مدل رفتاری استفاده شده است.

۱- ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic): این مدل رفتاری دارای دو پارامتر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون می‌باشد. این مدل برای شبیه‌سازی رفتار فولاد در ابتدای بارگذاری به کار می‌رود.

در این مدل رفتاری می‌بایست، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون فولاد مصرفی وارد شود.

۲- ایزوتروپیک دوخطی (Bilinear Isotropic Hardening plasticity): این مدل

(BISO) با تعیین منحنی تنش-کرنش فولاد، به منظور شبیه‌سازی رفتار فولاد در طول بارگذاری به کار می‌رود.

در این مدل رفتاری می‌بایست، تنش تسلیم فولاد و شیب منحنی تنش-کرنش، پس از نقطه

تسلیم وارد شود. این مدل رفتاری قادر به پیش‌بینی سخت‌شدگی و نرم‌شدگی فولاد نمی‌باشد.

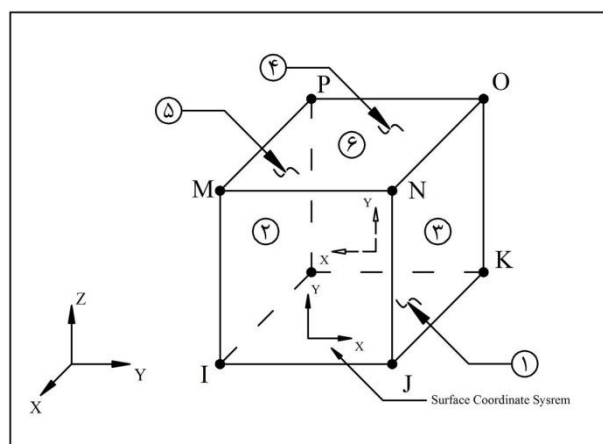
در مواردی که مدل‌سازی سخت‌شدگی فولاد و یا حتی نرم‌شدگی آن مد نظر باشد می‌بایست از

مدل‌های رفتاری MISO به جای ایزوتروپیک دوخطی (BISO) استفاده کرد.

## ۵-۸- مدل سازی صفحات بارگذاری و تکیه گاهها در نرم افزار ANSYS

### ۵-۸-۱- المان SOLID۴۵

یک المان سازه ای ۸ گرهی بوده که برای مدل سازی صفحات فولادی مورد نیاز در نقاط بارگذاری و محل تکیه گاهها استفاده می شود. با توجه به شکل ۵-۷، این المان دارای ۸ گره با سه درجه آزادی در هر گره (سه درجه آزادی جابجایی (انتقالی) در جهت های  $X, Y, Z$ ) می باشد و قابلیت شکل پذیری، خزش، برآمدگی، تغییر شکل ها و کرنش های بزرگ را دارد [۱۷].



شکل ۵-۷- المان SOLID۴۵ به همراه دستگاه مختصات محلی [۱۷]

### ۵-۸-۲- مدل های رفتاری در شبیه سازی صفحات بارگذاری و تکیه گاهها

در این تحقیق، به منظور شبیه سازی رفتار صفحات بارگذاری، از ۱ مصالح یا مدل رفتاری استفاده شده است.

**ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic):** این مدل رفتاری دارای دو پارامتر مدول الاستیسیته و ضریب پواسون می باشد. وجود این مدل برای شبیه سازی رفتار این صفحات در ابتدای بارگذاری ضروری است. وجود همین یک مدل رفتاری به منزله یکسان بودن رفتار مصالح در تمام طول تحلیل می باشد.

در وارد کردن این مدل رفتاری برای صفحات بارگذاری، می‌بایست دو نکته مهم زیر مد نظر قرار گیرد.

۱- با توجه به صلبیت نسبی صفحات بارگذاری و تکیه‌گاه‌ها در آزمایشگاه، مدول الاستیسیته آن طوری تعیین شود که منعکس‌کننده صلبیت آن در مقایسه با بتن باشد.

۲- به منظور سازگاری مناسب این صفحات با بتن، ضریب پواسون آن‌ها برابر یا نزدیک با ضریب پواسون بتن در نظر گرفته شود.

### ۵-۹- نحوه مدل‌سازی یک عضو بتن آرمه در ANSYS

مدل‌سازی یک عضو یعنی تعیین و تطبیق مشخصات عضو، اعم از رفتار مادی، مشخصات هندسی، شرایط مرزی و نحوه بارگذاری، به گونه‌ای که عکس‌العمل رفتاری و خروجی‌هایی متناسب و نزدیک به نتایج واقعی از آن حاصل شود. اطمینان از نزدیک شدن نتایج خروجی با نتایج آزمایشگاهی که با تعدیل پارامترهای قابل تنظیم در نرم‌افزار همانند ضرایب انتقال برش در ترک‌های باز و بسته صورت می‌گیرد، تعیین صحت عمل کرد یا همان کالیبراسیون نامیده می‌شود. آنچه که نقشی اساسی در این مدل‌سازی دارد، معادل‌سازی رفتار غیرخطی عضو مورد نظر در نرم‌افزار با مدل‌های ریاضی موجود در شرایط تحلیل غیرخطی می‌باشد.

به طور کلی برای مدل‌سازی هر عضوی در نرم‌افزار ANSYS، مراحل زیر باید مد نظر قرار گرفته و به طور مشخص تعریف گردد:

۱- ترسیم شکل هندسی عضو با توجه به ابعاد نمونه و در نظرگیری سیستم واحدی یکسان و استفاده از دستگاه مختصات محلی و کلی مناسب با توجه به هندسه عضو. در المان بتن آرمه خصوصیات المان، مشتمل بر زوایا و جهتهای مربوط به قرارگیری آرماتورها و جهتهای ترک‌خوردگی در المان بر اساس دستگاه مختصات محلی تعریف شده، برای آن المان سنجیده می‌شود.

در نرم‌افزار ANSYS برای تعیین دستگاه مختصات محلی، از دستگاه مختصات کلی (اصلی) که دارای مبدا ثابتی بوده و همه چیز در یک مدل‌سازی نسبت به آن سنجیده می‌شود، استفاده می‌گردد. به طور کلی این نرم‌افزار شامل سه نوع دستگاه مختصات کلی دکارتی، استوانه‌ای و کروی می‌باشد.

۲- در نظرگیری المان‌های متناسب با رفتار عضو سازه‌ای مورد نظر و تنظیم مشخصات اصلی، در گزینه OPTION مربوط به آن المان.

۳- بیان خصوصیات و رفتار مکانیکی مواد و مصالح استفاده شده در عضو در گزینه MATERIAL PROPERTISE، که این قسمت متشکل از دو بخش می‌باشد.

الف - تعریف خصوصیات خطی المان‌ها که بر دو نوع مواد همسان‌گرد<sup>۱</sup> و غیرهمسان‌گرد<sup>۲</sup> می‌باشد. در این بخش سختی و ضرایب پواسون اولیه مواد مورد استفاده با در نظرگیری شماره‌ای منحصر به فرد برای هر ماده تعریف می‌شود. چنانچه رفتار یک ماده در تمام جهات یکسان باشد، آن ماده همسان‌گرد و چنانچه در هر جهتی دارای رفتار مادی متفاوتی باشد آن ماده غیرهمسان‌گرد نامیده می‌شود.

ب - با در نظرگیری شماره‌ای که خصوصیات خطی آن ماده در قسمت قبل، تعیین شده است، خصوصیات رفتار غیرخطی مادی در قسمت ELEMENT TABLE تعیین می‌گردد.

۴- با توجه به نوع المان و رفتار مادی تعریف شده قبلی، خصوصیات ویژه، برای المان‌های گوناگون، قابل تعریف می‌باشد؛ که تحت عنوان ثابت‌های حقیقی در قسمت REAL CONSTANTS مربوط به آن المان تعریف می‌گردد.

۵- تخصیص مشخصات تعریف شده قبلی، اعم از نوع المان، خصوصیات ویژه برای هر المان، نوع ماده مورد استفاده و دستگاه مختصات محلی که خصوصیات آن المان با توجه به آن در نظر گرفته شده، برای هر قسمت حجمی، سطحی یا خطی از عضو ترسیم شده. این مرحله با استفاده از قسمت

---

۱ Isotropic

۲ Non-Isotropic

DEFINE ATTRIBUTE انجام می‌گیرد.

۶- المان‌بندی اشکال ترسیم شده.

۷- اعمال بارگذاری مورد نظر بر روی عضو؛ این بارگذاری شامل تخصیص شرایط مرزی، اعم از قیود گیرداری گره‌ها، شرایط تقارن و پادتقارن و یا اعمال نیروهای متمرکز گره‌ای، سطحی و یا حجمی و یا تغییر مکان‌های مربوط به هر گره، می‌باشد.

۸- تعیین پارامترهای مربوط به معیار همگرایی تحلیل غیرخطی، که بیش‌تر با استفاده از معیارهای کنترل نیرو، جابجایی، لنگر و دوران، و با توجه به نوع بارگذاری، اعمال می‌گردند. پس از آن حداکثر تعداد تکرار تا دستیابی به معیار همگرایی تعیین شده، مشخص می‌گردد.

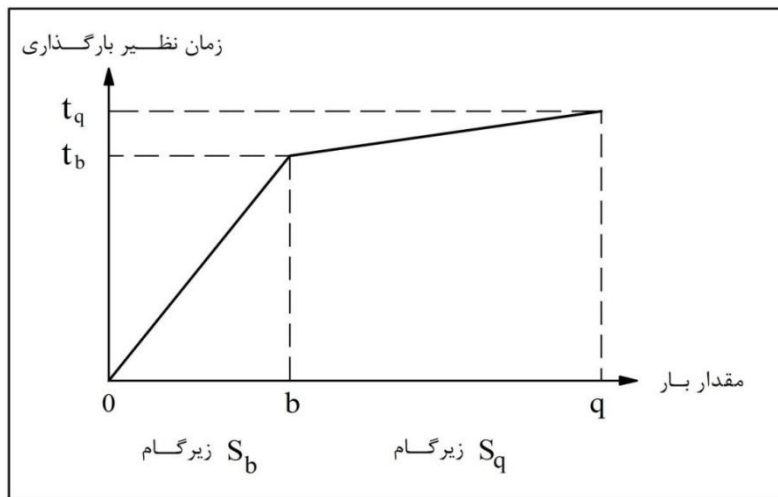
۹- به منظور در نظر گرفتن بارگذاری تدریجی یا نموی، تعداد گام‌های اعمال بار برای رسیدن به بار حداکثر اعمال شده بر عضو، تعریف می‌گردد. به طور کلی در تحلیل غیرخطی اجزای محدود یک مدل، قابلیت در نظرگیری روند تدریجی بارگذاری وجود دارد و در هر مرحله، روند محاسبات به صورت محدود (یکی از دلایل این محدودیت، تعیین حداکثر تعداد تکرار در مرحله قبلی می‌باشد) تا آن‌جایی که معیار همگرایی تعریف شده برای نرم‌افزار تأمین گردد، تکرار می‌شود.

برای این منظور در نرم‌افزار ANSYS گزینه‌ای تحت عنوان LOAD STEP به مفهوم گام بارگذاری وجود دارد که با توجه به آن می‌توان مراحل متفاوتی از روند تدریجی بارگذاری و یا باربرداری را بر یک سازه اعمال نمود. از آن‌جا که حل مسائل پلاستیسیته و غیرخطی تابعی از مسیر و تاریخچه بارگذاری می‌باشد، لذا قابلیت تنظیم روند تدریجی بارگذاری به مقدار مورد نیاز با توجه به زیرگام‌های هر مرحله بارگذاری تحت عنوان SUB STEP در نرم‌افزار وجود دارد.

مطابق با شکل ۵-۸ اگر مقدار کل بار مورد نظر برابر با  $q$  بوده و نیاز به تعریف دو گام بارگذاری تا مقادیر  $b$  و  $q$  با پارامتر نمادین زمان برابر با  $t_b$  و  $t_q$  به عنوان مراحل پایان بار باشد و تعداد زیرگام‌های هر مرحله از بارگذاری، برابر با  $S_b$  و  $S_q$  در نظر گرفته شده باشد، به شرط همگرا شدن روند تکراری



حل در هر مرحله، ابتدا باری تدریجی از صفر تا  $b$  با گام  $b/S_b$  به مدل اعمال می‌گردد و سپس در مرحله دوم، بارگذاری با افزایش تدریجی به مقدار  $(q-b/S_q)$  تا پایان نماد زمان  $t_q$ ، به مقدار بار  $b$  قبلی اضافه می‌گردد، تا بار نهایی به  $q$  برسد. لازم به توضیح است که زمان به عنوان یک پارامتر قابل شمارش و نمادین بوده و دارای مفهوم واقعی زمان نمی‌باشد [۱۵].



شکل ۵-۸- مراحل اعمال گام‌های بارگذاری

۱۰- تخصیص نوع تحلیل مورد نیاز که شامل استاتیکی، دینامیکی، گذرا و ... بوده و تنظیم پارامترهای قابل تعریف برای تحلیل اجزای محدود و اجرای تحلیل.

۱۱- کنترل نتایج خروجی حاصل از تحلیل در پردازشگرهای POST۱ و POST۲۶ و کالیبره نمودن نرم‌افزار با توجه به نتایج آزمایشگاهی موجود.

پس از بیان مختصری از مراحل مدل‌سازی اجزای محدود یک عضو بتن‌آرمه به منظور آشنایی بهتر با این مراحل، مدل‌سازی یک قاب بتن‌آرمه بیان می‌گردد. این قاب بتن مسلح توسط پارسا و همکاران در سال ۲۰۰۶ تحت آزمایش قرار گرفته است [۱۹].

## فصل ششم

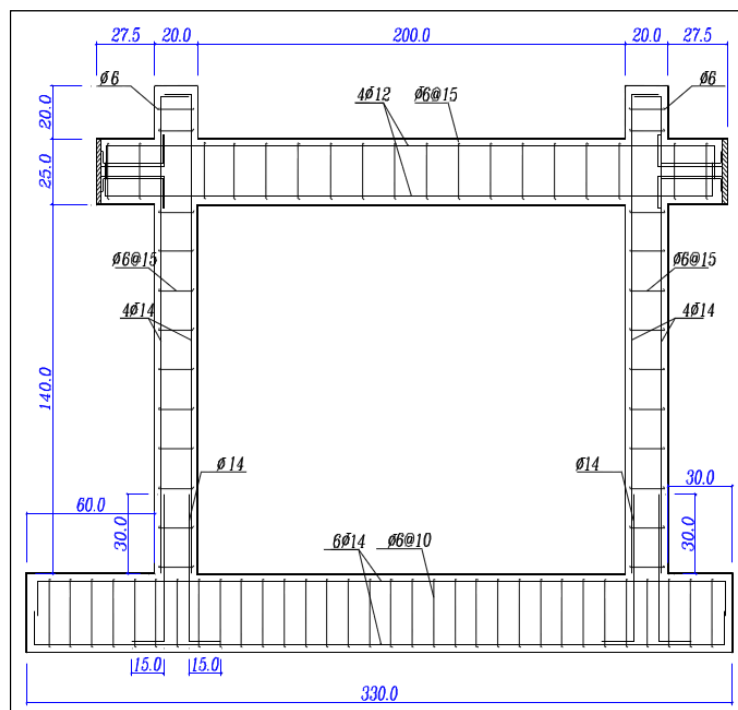
بررسی صحت مدل سازی قاب،

میان قاب آجری و FRP در

نرم افزار ANSYS

## ۱-۶- کالیبراسیون یک قاب بتن مسلح

در این قسمت می‌خواهیم به مدل‌سازی یک قاب بتن مسلح اقدام کرده و اعتبار آن را با نتایج آزمایشگاهی بررسی کنیم. مشخصات نمونه آزمایشگاهی در شکل ۱-۶ آورده شده است. قاب مورد نظر در آزمایشگاه تحت بار جانبی رفت و برگشتی افزایشی قرار گرفته و منحنی بار-تغییر مکان دوره‌ای (هیستریزیس) در اختیار می‌باشد [۱۹].



شکل ۱-۶- جزئیات ابعاد و آرماتورهای قاب بتنی (اندازه‌ها به سانتیمتر می‌باشد)

## ۱-۱-۶- ابعاد و مشخصات قاب بتن مسلح

برای به دست آوردن ابعاد مقاطع و مشخصات آرماتورها، یک ساختمان چهار طبقه بتنی با سیستم قاب خمشی و با ابعاد واقعی که در هر امتداد دارای چهار دهانه است در نظر گرفته شده است. باتوجه به این که بررسی رفتار میان قاب‌ها در ساختمان‌های موجود موردنظر بوده، جهت طراحی این سازه از اولین ویرایش آئین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰) [۲۰]

استفاده گردیده و تمعدا در طراحی و اجرای آن نقاط ضعف متداول اجرایی در نظر گرفته شده تا رفتار هرچه بیشتر شبیه به سازه‌های موجود باشد. این موارد عبارتند از:

- در طراحی خاموت ستون‌ها ضوابط شکل‌پذیری رعایت نشده و حداقل مقادیر آئین-نامه به طور یکنواخت در طول ستون‌ها اجرا شده است.
- علی‌رغم توصیه آئین‌نامه، هیچ‌گونه خاموتی در ناحیه اتصال تیر به ستون به کار نرفته است.
- ضوابط مربوط به حداقل مقاومت خمشی ستون‌ها (تیرضعیف-ستون قوی) رعایت نشده است.

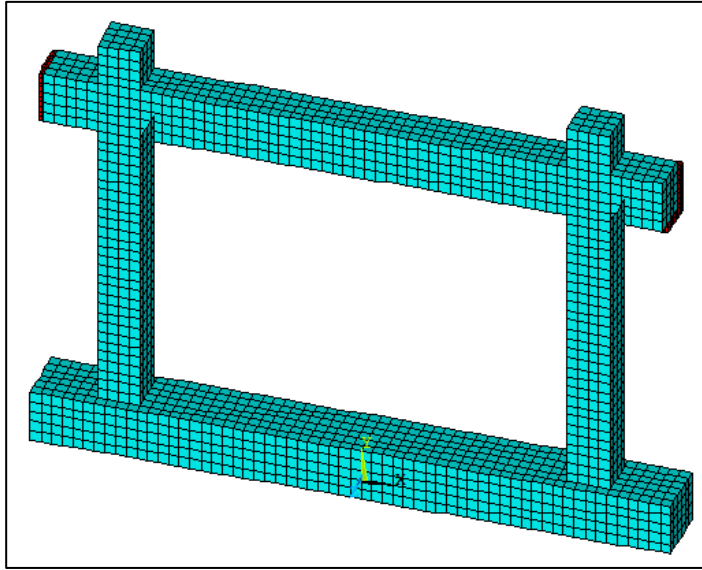
در مطالعه انجام شده، بعد از طراحی سازه، یکی از قاب‌های پایینیترین طبقه به عنوان مدل اصلی برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی انتخاب گردیده و با توجه به ضریب مقیاس انتخاب شده ( $1/2$ )، مشخصات، ابعاد کلی و جزئیات آرماتورگذاری نمونه‌ها به صورت شکل ۶-۱ در نظر گرفته شده است [۱۹].

#### ۶-۱-۲- مشخصات مصالح

در مطالعه آزمایشگاهی انجام شده، مقاومت فشاری بتن برابر با  $25/595$  مگاپاسکال و ضریب پواسون آن  $0/2$  می‌باشد.

ستون این قاب با ۴ آرماتور طولی  $14\phi$ ، تیر آن با ۴ آرماتور طولی  $12\phi$ ، تیر فونداسیون با ۶ آرماتور طولی  $14\phi$  از نوع AIII و همه با آرماتورهای عرضی  $6\phi$  از نوع ساده مسلح شده‌اند.

این قاب توسط نرم‌افزار ANSYS مدل‌سازی شده که در شکل ۶-۲ مدل شبکه‌بندی شده آن مشاهده می‌شود.



شکل ۲-۶- مدل شبکه‌بندی شده قاب بتن مسلح

### ۳-۱-۶- داده‌های ورودی اجزای محدود

#### ۱-۳-۱-۶- داده‌های ورودی بتن

مشخصات زیر برای مدل‌های رفتاری بتن در نظر گرفته شده است.

#### ۱- ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic):

بر طبق رابطه پیشنهادی ACI 318-2008، مدول الاستیسیته بتن معمولی بر طبق رابطه ۱-۶

برابر  $23/78$  گیگاپاسکال به دست می‌آید (در سیستم واحد N-mm).

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c} \quad (۱ - ۶)$$

ضریب پواسون بتن برابر با  $0/2$  در نظر گرفته شده است.

#### ۲- کینماتیک چندخطی (Multilinear Kinematic Hardening plasticity):

تخصیص منحنی تنش-کرنش بتن از مهم‌ترین پارامترهای تعیین کننده نتایج حاصل از تحلیل

اجزای محدود است. کاجلاکف و همکاران به منظور مدل‌سازی اجزای محدود تیر بتن مسلح مدل زیر

را برای منحنی تنش-کرنش بتن پیشنهاد دادند. معادلات (۲ - ۶)، (۳ - ۶) و (۴ - ۶) برای تعیین

منحنی تنش-کرنش تک‌محوری و فشاری بتن که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است، استفاده شد [۱۶].

$$f = \frac{E_c \times \varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o}\right)^2} \quad (۲ - ۶)$$

$$\varepsilon_o = \frac{2 \times f'_c}{E_c} \quad (۳ - ۶)$$

$$E_c = \frac{f}{\varepsilon} \quad (۴ - ۶)$$

که در این روابط:

تنش در هر نقطه:  $f$

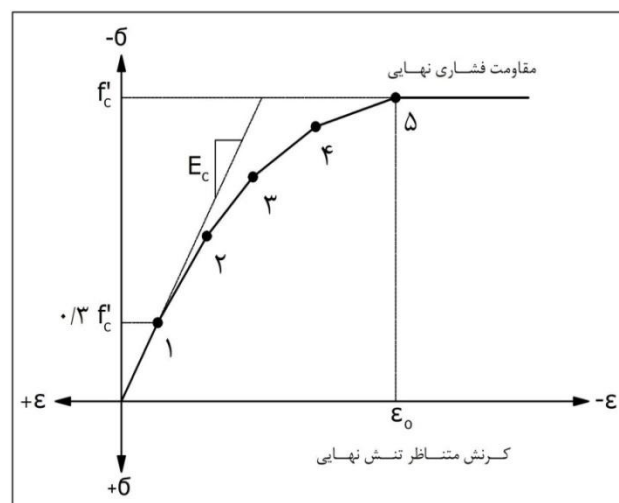
کرنش در هر نقطه:  $\varepsilon$

کرنش در مقاومت فشاری نهایی ( $f'_c$ ):  $\varepsilon_o$

می‌بایست به این نکته توجه شود که مدول الاستیسیته اولیه مماسی در این مدل، با مدول

الاستیسیته محاسبه شده در قسمت اول (مربوط به مدل رفتاری ایزوتروپیک خطی) برابر باشد؛ در غیر

این صورت با پیغام اخطار در زمان تحلیل مواجه خواهیم شد.



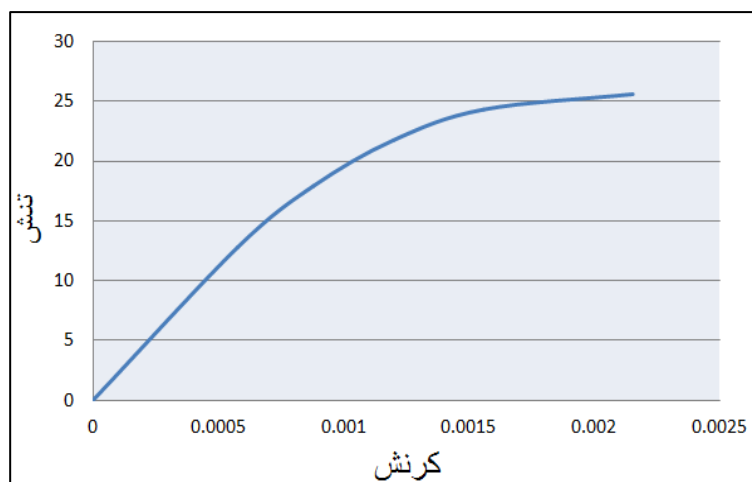
شکل ۳-۶- منحنی تنش-کرنش تک‌محوری فشاری بتن [۱۶]

همان‌طور که در شکل ۳-۶ مشاهده می‌شود، مقدار تنش در نقطه شماره یک برابر با  $f_c' / 3$  است، با قرار دادن این مقدار در معادله (۴ - ۶) که نشان‌دهنده رابطه تنش- کرنش بتن در ناحیه خطی می‌باشد، کرنش این نقطه را می‌توان محاسبه نمود. از معادله (۴ - ۶) برای به دست آوردن بقیه نقاط استفاده می‌شود. مقدار  $\epsilon_o$  بکاررفته در این نقاط نیز از معادله (۳ - ۶) به دست می‌آید [۱۶].

در جدول ۱-۶ و شکل ۴-۶ مقادیر ورودی نمودار تنش-کرنش بتن به نرم‌افزار و منحنی آن نشان داده شده است.

جدول ۱-۶ مقادیر ورودی نمودار تنش-کرنش بتن به نرم‌افزار

کرنش	تنش (مگاپاسکال)
۰/۰۰۰۵۷۷	۱۲/۷۹۷
۰/۰۰۰۸۷۹	۱۷/۹۱۶
۰/۰۰۱۱۹۹	۲۱/۷۵۶
۰/۰۰۱۵۵۸	۲۴/۳۱۵
۰/۰۰۲۱۵۳	۲۵/۵۹۵



شکل ۴-۶- منحنی تنش-کرنش بتن

### ۳- بتن (Concrete):

از میان ۹ پارامتر این مدل رفتاری، ۵ پارامتر آن محاسبه شده و بقیه توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود (می‌بایست اعداد مربوط به آن‌ها برابر با صفر قرار داده شود).

۱- پارامتر C1: ضریب انتقال برش در ترک باز یا  $\beta_t$ ؛ که مقدار آن برابر با ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

۲- پارامتر C2: ضریب انتقال برش در ترک بسته یا  $\beta_c$ ؛ که مقدار آن برابر با ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

۳- پارامتر C3: مقاومت کششی محوری بتن یا  $f_r$ .

بر طبق رابطه پیشنهادی ACI 318-2008، مقاومت کششی بتن (تنش ترک‌خوردگی) بر طبق رابطه زیر و برابر ۳/۱۴ مگاپاسکال به دست می‌آید.

$$f_r = 0.62\sqrt{f'_c} \quad (5-6)$$

۴- پارامتر C4: مقاومت فشاری تک‌محوری بتن یا همان  $f'_c$ ؛ که مقدار آن برابر با ۲۵/۵۹۵ مگاپاسکال می‌باشد؛ اما با توجه به معرفی نمودار تنش-کرنش، مقدار ورودی آن ۱- می‌باشد.

۵- پارامتر C9: ضریب وادادگی مقاومت کششی یا  $T_c$  که مقدار پیش‌فرض آن ۰/۶ می‌باشد. مقدار ورودی آن برابر با مقدار پیش‌فرض نرم‌افزار، ۰/۶ در نظر گرفته شده است.

مقدار بقیه پارامترهای در این مدل رفتاری صفر وارد می‌شود؛ تا مقادیر آن‌ها را نرم‌افزار محاسبه کند. در جدول ۶-۲ مشخصات ورودی بتن در نرم‌افزار به طور خلاصه آورده شده است.

جدول ۶-۲- مشخصات ورودی بتن در نرم‌افزار برای مدل‌سازی قاب بتنی

$E_c$ (GPa)	$f'_c$ (MPa)	$f_r$ (MPa)	$\nu_c$	$\beta_t$	$\beta_c$	$T_c$
۲۳/۷۸	-۱	۳/۱۴	۰/۲	۰/۲	۰/۹	۰/۶



## ۶-۱-۳-۲- داده‌های ورودی آرماتورهای طولی و عرضی

مشخصات زیر برای مدل‌های رفتاری آرماتورهای طولی و عرضی در نظر گرفته شده است.

### ۱- ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic):

در جدول ۶-۳ جدول ۶-۴ مشخصات ورودی این مدل رفتاری برای آرماتورهای طولی و عرضی آورده شده است. همان‌طور که پیش‌تر عنوان گردید، این مدل برای شبیه‌سازی رفتار فولاد در ابتدای بارگذاری به کار می‌رود.

جدول ۶-۳- مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آرماتورهای طولی و عرضی قاب بتنی

مشخصات فولاد	$E_s$ (GPa)	$\nu_s$
آرماتورهای طولی و عرضی	۲۰۰	۰/۳

### ۲- ایزوتروپیک دوخطی (Bilinear Isotropic Hardening plasticity):

در جدول ۶-۴ مشخصات ورودی این مدل رفتاری برای آرماتورهای طولی و عرضی آورده شده است. این مدل نیز برای شبیه‌سازی رفتار فولاد در طول بارگذاری مورد استفاده قرار گرفته است.

جدول ۶-۴- تنش تسلیم و مدول مماسی آرماتورهای طولی و عرضی قاب بتنی

مشخصات فولاد	$f_y$ (MPa)	$E_2$ (GPa)
آرماتورهای طولی	۴۰۰	۰
آرماتورهای عرضی	۲۴۰	۰

منظور از  $E_2$ ، مدول مماسی بوده که شیب منحنی تنش-کرنش فولاد پس از نقطه تسلیم می-

باشد..

یادآوری می‌شود که برای آرماتورهای طولی و عرضی می‌بایست، ثابت‌های حقیقی که همان

مساحت سطح مقطع هر آرماتور است تعریف شود. مساحت هر آرماتور طولی  $\phi 14$  برابر با  $153/86$

میلی‌متر مربع، مساحت هر آرماتور طولی  $\phi 12$  برابر با  $113/04$  میلی‌متر مربع و هر آرماتور عرضی

برابر با ۲۸/۲۶ میلی متر مربع است.

### ۶-۱-۳-۳- داده‌های ورودی صفحه بارگذاری و تکیه‌گاه صلب

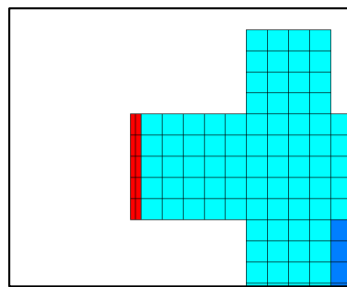
#### ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic):

در جدول ۵-۶ مشخصات ورودی این مدل رفتاری برای صفحه بارگذاری (شکل ۵-۶)

مشخص شده است.

جدول ۵-۶- مدول الاستیسیته و ضریب پواسون صفحات بارگذاری قاب بتنی

$E_s$ (GPa)	$\nu_s$
۲۰۰	۰/۳



شکل ۵-۶- صفحه بارگذاری

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مدول الاستیسیته این قطعات به منظور عمل‌کرد صلب آن‌ها بالا

در نظر گرفته شده است (حدود ۱۰ برابر بتن و برابر با فولاد).

### ۶-۱-۴- شبکه‌بندی مدل

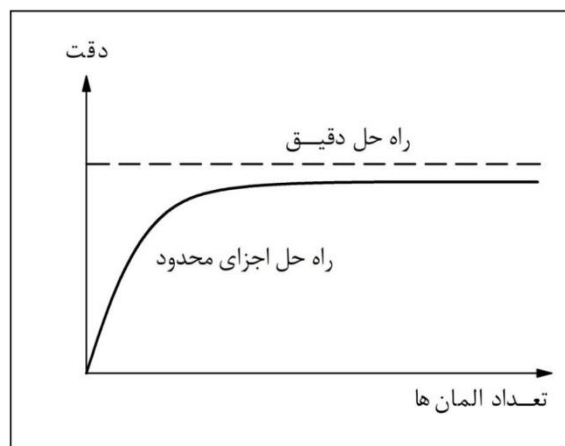
انتخاب تراکم شبکه، یکی از مهم‌ترین مسائل در مبحث مدل‌سازی با نرم‌افزارهای مختلف المان

محدود است. زیرا یکی از پارامترهای مهم در همگرایی نتایج، انتخاب تعداد مناسب المان‌های مورد

استفاده است. شکل ۶-۶ دقت نتایج با توجه به تعداد المان‌ها را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل

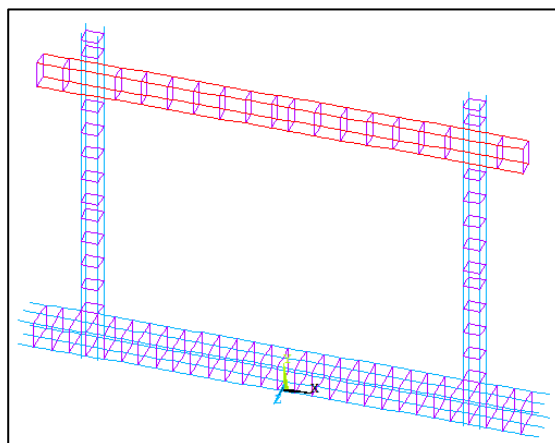
بر می‌آید با افزایش تعداد المان‌ها، دقت تقریب در مدل اجزای محدود افزایش می‌یابد؛ اما با توجه به

میل کردن شیب نمودار به سمت صفر، ریز کردن شبکه‌بندی از یک مقدار مشخص به بعد منطقی نبوده و ابعاد شبکه‌بندی می‌بایست با توجه به مسئله همگرایی و میزان دقت مورد نظر صورت گیرد.



شکل ۶-۶- تأثیر تعداد المان‌ها در دقت نتایج حاصل از اجزای محدود

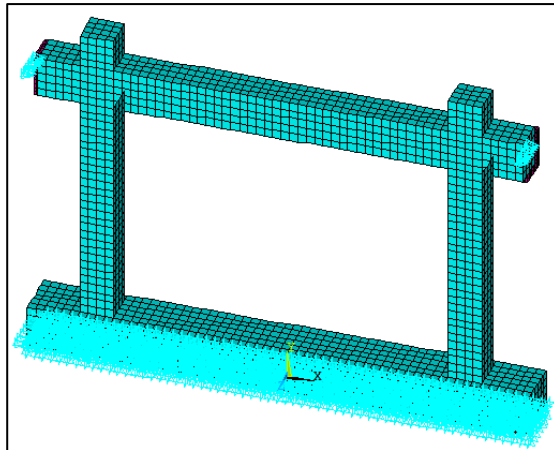
توجه به این نکته حائز اهمیت است که شبکه‌بندی اجزای محدود می‌بایست تا حد ممکن، متقارن باشد. توصیه اکید نرم‌افزار ANSYS این است که مدل‌سازی‌های انجام گرفته با المان SOLID۶۵، دارای شبکه‌های ۶ وجهی بوده و از المان‌های تیز گوشه دوری شود. همچنین قسمت‌هایی که خروجی‌های تحلیل از آن‌ها استخراج می‌شوند، دارای شبکه‌بندی ریزتری باشند. شبکه‌بندی مدل در شکل ۶-۲ و شکل ۶-۷ نشان داده شده است.



شکل ۶-۷- شبکه‌بندی آرماتورهای طولی و عرضی قاب بتنی

## ۶-۱-۵- بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی

مدل‌های المان محدود در شرایط کاملاً مشابه نمونه‌های آزمایشی بارگذاری شدند. به همین منظور بارگذاری مدل از نوع کنترل تغییرمکان در نظر گرفته شد (شکل ۶-۸).



شکل ۶-۸- شرایط تکیه‌گاهی و اعمال بار قاب بتنی

با توجه به شکل ۶-۸، سطح پائینی سازه به عنوان تکیه‌گاه آن مدل‌سازی شده و تمامی گره‌های این ناحیه در تمامی جهات ( $UX$ ،  $UY$ ،  $UZ$ ) مقید شدند. همچنین صفحات بارگذاری در انتهای تیر، ناحیه بارگذاری نمونه بوده و تغییرمکان‌های اجباری در جهت طول قاب ( $X$ ) به گره‌های وسط آن‌ها اعمال می‌شود.

## ۶-۱-۶- روش تحلیل

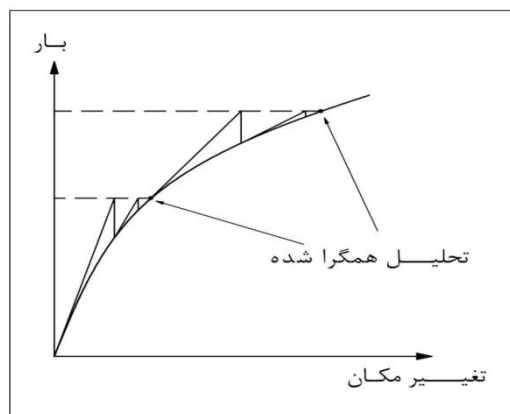
یکی از مسائل مهمی که در تحلیل تمامی مدل‌ها از جمله مبحث مدل‌سازی اعضای بتن‌آرمه همواره مورد توجه بوده، رفتار متفاوت بتن تحت اثر بارهای خارجی به علت خواص غیرخطی و مقاومت کششی کم آن است. در شروع بارگذاری، به علت پایین بودن مقدار تنش‌های کششی و فشاری در بتن، قطعه به صورت الاستیک و خطی عمل می‌کند. در این بازه ماتریس‌های سختی المان‌ها ثابت بوده و بارگذاری بر روی آن‌ها اثری ندارد. در برابر آن، غیرخطی بودن رابطه تنش- کرنش

سبب تغییر ماتریس سختی المان‌ها می‌شود. به عبارت دیگر این ماتریس تابعی از تغییر مکان‌های گرهی است. در نتیجه معادله حاکم بر رفتار سازه به صورت غیرخطی در می‌آید. موادی مانند بتن، خاک، فولاد نرمه و ... دارای رفتار غیرخطی هستند.

در تحلیل‌های غیرخطی، کل بار خارجی در چند قسمت کوچک تحت عنوان گام‌های بارگذاری بر سازه وارد می‌شود و اعمال هر یک از این گام‌های بارگذاری به سازه توسط زیرگام، به صورت تدریجی می‌باشد. روش‌های گوناگونی برای حل دستگاه معادلات غیرخطی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش تکراری نیوتن-رافسون اشاره کرد (شکل ۶-۹). نرم‌افزار ANSYS نیز در تحلیل‌های غیرخطی از این روش استفاده می‌نماید. در روش مذکور، تحلیل غیرخطی با مجموعه‌ای از تحلیل‌های خطی صورت می‌گیرد. نخستین تحلیل، زیر اثر بار خارجی وارد به سازه انجام می‌پذیرد. در تحلیل‌های بعدی، نیروی نامتعادل (اختلاف نیروی خارجی نخستین و نیروی داخلی کنونی) وارد تحلیل می‌گردد. هر گام تحلیل، یک گام تکراری خواهد بود. لازم است توجه شود که تغییر مکان به دست آمده در هر تکرار، با مجموع تغییر مکان تحلیل‌های پیشین جمع می‌گردد. تکرارها تا زمانی ادامه می‌یابند که نیروی نامیزان از مقدار مشخصی کمتر شود. به این میزان، مقدار خطا گویند [۲۱].

تحلیل مدل مورد نظر نیز به روش تحلیل غیرخطی استاتیکی انجام شده است. در این روش

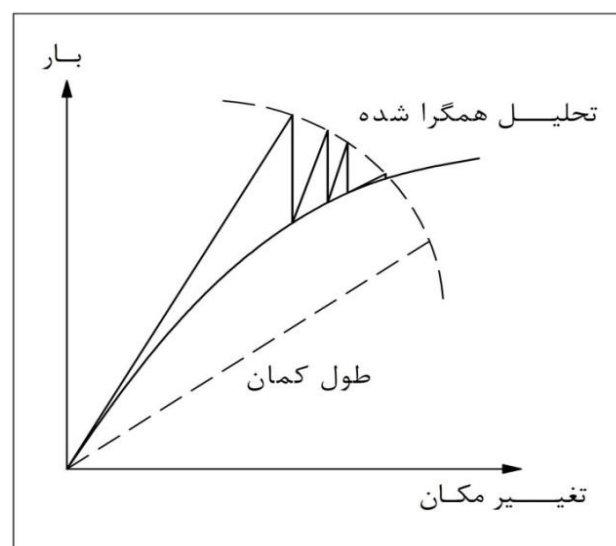
نرم‌افزار بار را به تدریج افزایش می‌دهد تا جایی که سازه به مرز ناپایداری (واگرایی مسئله) می‌رسد.



شکل ۶-۹- روش تکراری نیوتن-رافسون [۱۶]

در این حالت فعال کردن الگوریتم گام زمانی خودکار (Automatic Time Stepping) و دو نیمه‌سازی در حل، توصیه می‌شود. الگوریتم گام اتوماتیک زمانی به طور خودکار به دنبال بار می‌گردد، در صورتی که بار خطی در تحلیل استاتیکی غیرخطی اعمال شده باشد، و این الگوریتم نیز فعال باشد، هنگام حل مسئله در صورتی که همگرایی در نقطه‌ای از بارگذاری ارضاء نشود، الگوریتم به طور خودکار نمو بارگذاری تعیین شده را نصف کرده و حل را دوباره ادامه می‌دهد؛ تا جایی که با اعمال کوچک‌ترین نمو در بار، همگرایی ایجاد نشود. هم‌چنین استفاده از قابلیت " جستجوی خط " (Line Search) در همگرایی تحلیل غیرخطی نقش به‌سزایی دارد.

توجه به این نکته حائز اهمیت است که اگر شیب منحنی بار-تغییر مکان صفر و در حالت بحرانی منفی شود، ادامه فرایند تحلیل سخت و یا در بعضی مواقع غیرممکن می‌شود و با افزایش انحراف (تِلرانس) معیارهای همگرایی و یا حتی حذف معیار همگرایی نیرو، ادامه تحلیل غیرممکن می‌شود. در این مواقع استفاده از گزینه " طول منحنی " (Arc Length) بسیار کارآمد است. این گزینه در تحلیل مرحله پس از کمانش سازه بسیار کارآمد است (شکل ۶-۱۰) [۲۲].



شکل ۶-۱۰- رفتار همگرایی طول کمان [۲۲]

در حل عددی مسائل غیرخطی باید به موارد زیر توجه شود.

۱- المان بندی مدل با دقت انجام شود، المان‌های با اخطارهای مربوط به شکل (دقت) المان، می‌تواند منجر به واگرایی در یک مسئله غیرخطی شود. اخطارهای مربوط به شکل المان می‌تواند مربوط به شکل آن و یا زوایای آن باشد. به عنوان مثال دقت بعضی از المان‌ها در شبکه بندی ۵ وجهی و بعضی دیگر نسبت به وجود زوایای تیز گوشه کاهش می‌یابد.

۲- تعداد نمونه‌های بار متناسب با شرایط مسئله، به اندازه کافی انتخاب شود.

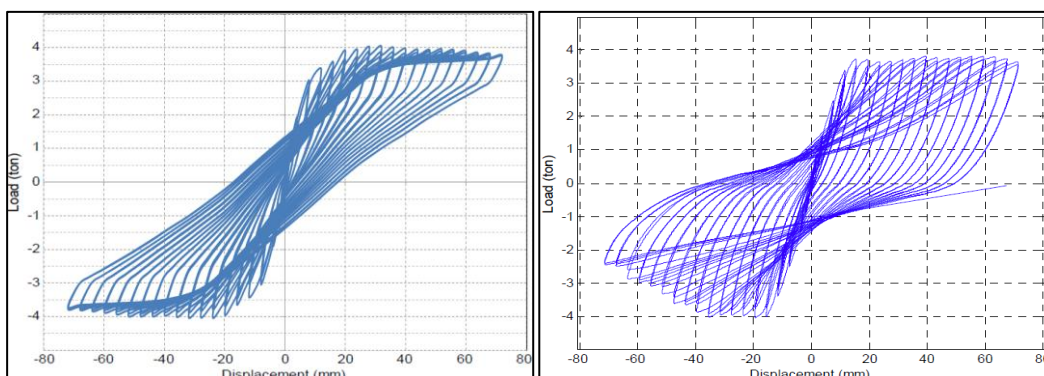
۳- انحراف‌ها (تولرانس‌ها)، نوع المان انتخاب شده، و مبنای همگرایی نیز در برخی موارد می‌تواند عاملی در همگرا شدن یا نشدن یک مسئله غیرخطی باشد.

برای تحلیل، دو معیار همگرایی نیرو و تغییرمکان مورد استفاده قرار گرفت. حدود انحراف (تولرانس) همگرایی، همان مقادیر پیش فرض ANSYS یعنی، برای تغییرمکان، ۰/۰۵ و برای نیرو، ۰/۰۰۵ در نظر گرفته شد. باید به این نکته توجه شود که همگرایی معیار نیرو به مراتب مشکل‌تر از همگرایی معیار تغییرمکان است.

## ۶-۱-۷- نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی

نمودار هیستریزیس حاصل از تحلیل اجزای محدود و آزمایش قاب بتنی در شکل ۶-۱۱ آورده

شده است.



شکل ۶-۱۱- نمودارهای هیستریزیس آزمایشگاهی (سمت راست) و اجزای محدود قاب بتنی (سمت چپ)

یادآوری موارد زیر در مورد مدل سازی، تحلیل و استخراج خروجی این مدل حائز اهمیت است.

۱- بارگذاری مدل از نوع تغییرمکان بوده است.

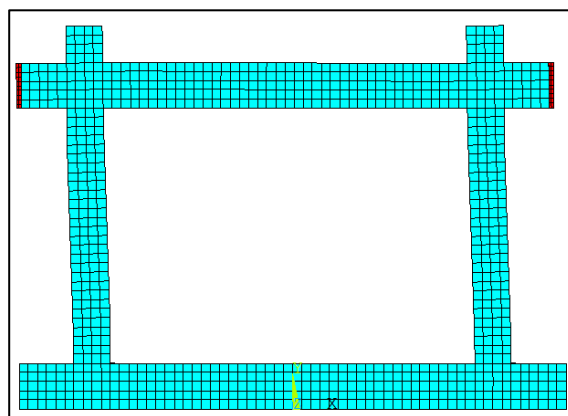
۲- در نمودار آزمایشگاهی، تغییرمکان، به وسیله جک هیدرولیکی در وسط ارتفاع تیر اعمال شده است؛ بنابراین، تغییرمکان مدل اجزای محدود نیز بر مبنای تغییرمکان دو نقطه ابتدایی و انتهایی تیر وارد شده است. نیرو نیز از مجموع نیروهای وارد بر تکیه گاه ها به دست آمده است. در جدول ۶-۶ حداکثر نیرو و سختی به همراه اختلاف آن ها آورده شده است.

جدول ۶-۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود، برای قاب بتنی

اختلاف	نتایج اجزای محدود	نتایج آزمایشگاهی	پارامترهای مورد استفاده در اعتبارسنجی
۷/۲ %	۴/۰۲	۳/۷۵	حداکثر نیروی تحمل شده توسط قاب (Ton)
۵/۰ %	۶/۳	۶	سختی اولیه (KN/mm)

همان طور که در جدول ۶-۶ مشاهده می شود، مقادیر بدست آمده از نرم افزار از دقت قابل قبولی

برخوردار است. در شکل ۶-۱۲ تغییر شکل قاب نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۲- تغییر شکل قاب بتن مسلح

## ۲-۶- کالیبراسیون یک قاب بتن مسلح با میان قاب آجری

در قسمت های قبلی به شناخت اجمالی از نحوه مدل سازی یک عضو بتن آرمه و نحوه تنظیم



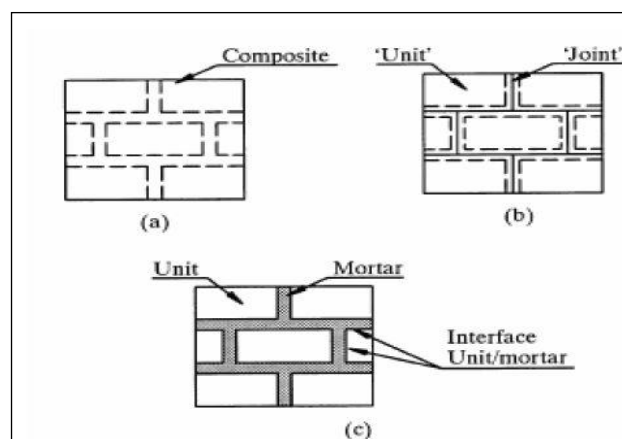
پارامترهای آن پرداختیم؛ که با انجام یک مثال عملی و مدل‌سازی یک قاب بتن مسلح به پایان رسید. در این قسمت با استفاده از تجارب گذشته و شناخت توانایی نرم‌افزار در بیان رفتار بتن، نحوه مدل‌سازی دیوار آجری بیان می‌گردد. در این راستا سعی شده تا یک قاب بتنی با میان‌قاب آجری تحت بار جانبی رفت و برگشتی افزایشی در نرم‌افزار ANSYS مدل گردد.

#### ۶-۲-۱- داده‌های ورودی اجزای محدود

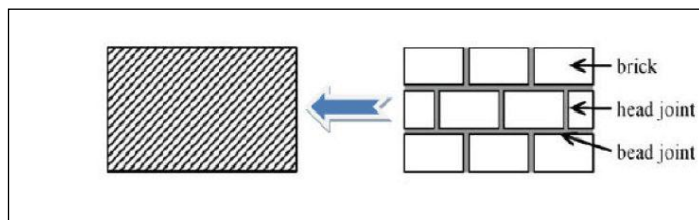
داده‌های ورودی برای بتن، میلگردهای فولادی و صفحات بارگذاری مشابه مدل قبل بوده و فقط می‌بایست میان‌قاب آجری به مدل قبلی اضافه گردد.

#### ۶-۲-۲- المان و مدل رفتاری، برای مدل‌سازی دیوار آجری

بطور کلی دو روش برای معرفی دیوار مصالح بنای به نرم افزارها وجود دارد. میکرو (Micro Modeling) و ماکرو (Macro Modeling). که در مدل میکرو هر سه جزء موجود در دیوار شامل آجر، ملات و سطح تماس بین این دو، مدل می‌شود. ولی در مدل ماکرو کل دیوار بصورت یک ماده همگن لحاظ شده و در این تحقیق هم از همین روش استفاده شده است. در شکل (۶-۱۳) و (۶-۱۴) جزئیات این دو روش دیده می‌شود.



شکل ۶-۱۳- مدل میکرو (Micro Modeling)

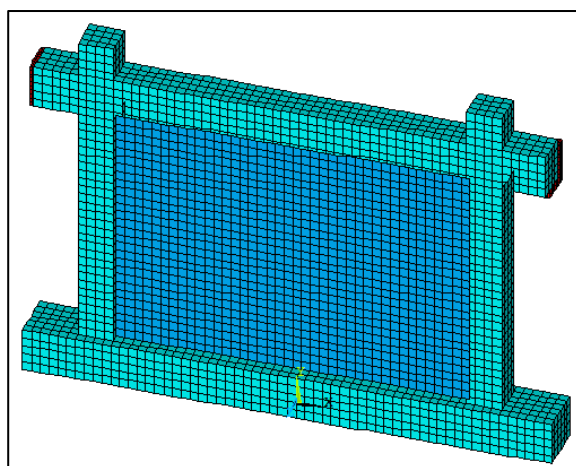


شکل ۶-۱۴-مدل ماکرو (Macro Modeling)

#### ۶-۲-۲-۱-المان SOLID۶۵

با توجه به مشابهت خواص دیوار مصالح بنایی و بتن همچون ترد شکن بودن و ...، در معرفی این مصالح همانند بتن عمل شده است.

در شکل ۶-۱۵ شبکه‌بندی دیوار آجری و قاب پیرامون آن نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۵- شبکه‌بندی میان قاب آجری و قاب بتنی پیرامونی

#### ۶-۲-۲-۲- داده‌های ورودی میان قاب آجری

مشخصات زیر برای مدل‌های رفتاری دیوار آجری در نظر گرفته شده است.

##### ۱- ایزوتروپیک خطی (Linear Isotropic):

بر طبق رابطه پیشنهادی آئین نامه استرالیا برای سازه‌های بنایی [۲۳]، مدول الاستیسیته دیوار

آجری بر طبق رابطه زیر برابر  $\frac{2}{8}$  گیگاپاسکال به دست می‌آید (در سیستم واحد N-mm).

ضریب پواسون میان قاب برابر با ۰/۱۵ در نظر گرفته شده است.

## ۲- کینماتیک چندخطی (Multilinear Kinematic Hardening plasticity):

مراحل این قسمت مشابه بتن انجام شده است.

### ۳- بتن (Concrete):

از میان ۹ پارامتر این مدل رفتاری، ۵ پارامتر آن محاسبه شده و بقیه توسط نرم افزار محاسبه می شود (می بایست اعداد مربوط به آن ها برابر با صفر قرار داده شود).

۱- پارامتر C۱: ضریب انتقال برش در ترک باز یا  $\beta_t$ ؛ که مقدار آن برابر با ۰/۲ در نظر گرفته شده است.

۲- پارامتر C۲: ضریب انتقال برش در ترک بسته یا  $\beta_c$ ؛ که مقدار آن برابر با ۰/۹ در نظر گرفته شده است.

۳- پارامتر C۳: مقاومت کششی محوری دیوار آجری یا  $f_r$ . مقاومت کششی دیوار آجری (تنش ترک خوردگی) برابر ۱/۲۴ مگاپاسکال به دست می آید.

۴- پارامتر C۴: مقاومت فشاری یا همان  $f_c'$ ؛ که مقدار آن طبق آئین نامه استرالیا [۲۳] برابر با ۴ مگاپاسکال می باشد؛ البته به دلیل قطری بودن نیروی وارده به دیوار مقاومت قطری منظور شده است؛ اما با توجه معرفی نمودار تنش- کرنش، مقدار ورودی آن ۱- می باشد.

۵- پارامتر C۹: ضریب وادادگی مقاومت کششی یا  $T_c$  که مقدار پیش فرض آن ۰/۶ می- باشد. مقدار ورودی آن برابر با مقدار پیش فرض نرم افزار، ۰/۶ در نظر گرفته شده است. مقدار بقیه پارامترهای در این مدل رفتاری صفر وارد می شود؛ تا مقادیر آن ها را نرم افزار

محاسبه کند. در جدول ۶-۷ مشخصات ورودی میان قاب در نرم افزار به طور خلاصه آورده شده است.

جدول ۶-۷- مشخصات ورودی در نرم افزار برای مدل سازی میان قاب

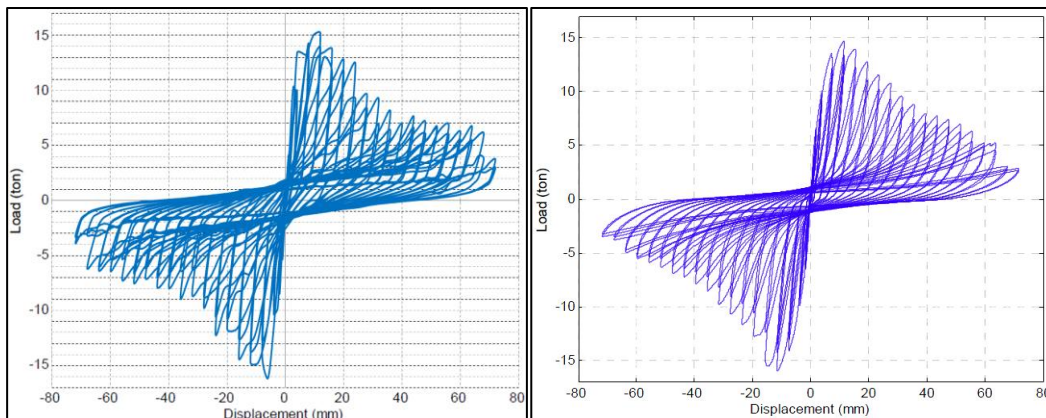
$E_c$ (GPa)	$f_c'$ (MPa)	$f_r$ (MPa)	$\nu_c$	$\beta_t$	$\beta_c$	$T_c$
۲/۸	-۱	۱/۲۴	۰/۱۵	۰/۲	۰/۹	۰/۶

#### ۴- ثابت حقیقی (Real Constant):

در این قسمت باید مقدار سختی بعد از شکست<sup>۱</sup> را وارد کنیم. این مقدار بر اساس پیشنهاد نگارنده برابر ۰/۱ تعیین می‌گردد.

#### ۳-۲-۶- نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی

نمودار هیستریزیس حاصل از تحلیل اجزای محدود و آزمایش قاب بتنی با میان‌قاب در شکل ۱۶-۶ آورده شده است.



شکل ۱۶-۶- نمودارهای هیستریزیس آزمایشگاهی (سمت راست) و اجزای محدود قاب بتنی با میان‌قاب (سمت چپ)

در جدول ۸-۶ حداکثر نیرو و سختی به همراه اختلاف آن‌ها آورده شده است.

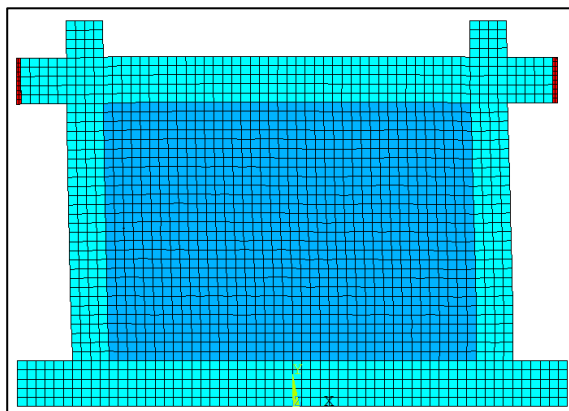
جدول ۸-۶- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود، برای قاب بتنی

پارامترهای مورد استفاده در اعتبارسنجی	نتایج آزمایشگاهی	نتایج اجزای محدود	اختلاف
حداکثر نیروی تحمل شده توسط قاب (Ton)	۱۵/۸	۱۶/۲	۲/۵ %
سختی اولیه (KN/mm)	۴۹	۴۹/۹۶	۲ %

مطابق جدول ۸-۶، نتایج بدست آمده از نرم‌افزار از دقت خوبی برخوردار است و می‌توان از این

<sup>۱</sup> Crushed stiffness factor

نتایج در ادامه استفاده نمود. در شکل ۶-۱۷ تغییر شکل قاب همراه با میان قاب نشان داده شده است.



شکل ۶-۱۷- تغییر شکل قاب همراه با میان قاب آجری

### ۳-۶- کالیبراسیون یک قاب بتن مسلح با میان قاب آجری تقویت شده با FRP

قسمت‌های قبلی به شناخت اجمالی از نحوه مدل‌سازی یک قاب بتن‌آرمه و میان قاب آجری نحوه و تنظیم پارامترهای آن اختصاص داشت. در این قسمت با استفاده از تجارب گذشته و شناخت توانایی نرم‌افزار یک قاب بتن مسلح با میان قاب آجری تقویت شده با FRP مدل می‌گردد. اهمیت این قسمت از آن جهت است که با مدل‌سازی نمونه‌های آزمایشگاهی، شیوه‌های ارائه شده مورد تأیید قرار گرفته و از آن در فصل بعد برای مدل‌سازی نمونه‌هایی که نتایج آزمایشگاهی آن موجود نیست، استفاده شده است.

### ۳-۶-۱- داده‌های ورودی اجزای محدود

داده‌های ورودی برای بتن، میلگردهای فولادی، میان قاب آجری و صفحات بارگذاری مشابه مدل قبل بوده و فقط می‌بایست FRP به مدل قبلی اضافه گردد.

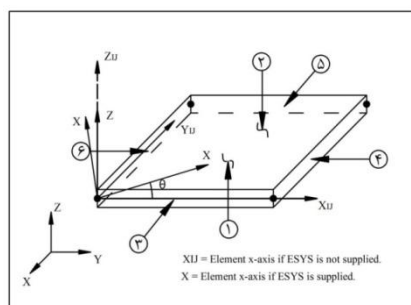
## ۶-۳-۲- المان و مدل رفتاری، برای مدل سازی FRP

### ۶-۳-۱- المان SHELL۴۱

المان SHELL۴۱ یک المان سه بعدی می باشد که دارای سختی غشایی یا درون صفحه ای بوده در حالی که فاقد سختی خمشی یا برون صفحه ای می باشد. هر گره المان دارای سه درجه آزادی تغییر مکان در جهات  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  می باشد. این المان دارای قابلیت تحلیل با ایجاد تغییر شکل های بزرگ می باشد. برای این المان می توان خاصیتی به نام پارچه گونگی (CLOTH OPTION) در نظر گرفت تا بر این اساس در فشار، هم چون پارچه حالت چروک خوردگی (WRINKLING) پیدا کرده و هیچ گونه فشاری را تحمل نکند [۱۷].

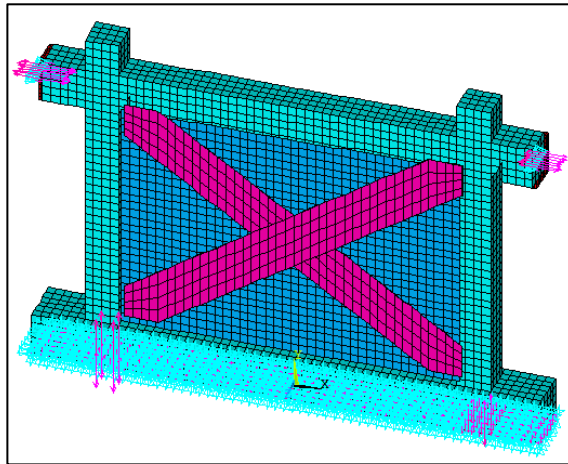
در شکل ۶-۱۸ موقعیت گره ها و دستگاه مختصات المان نشان داده شده است. در این شکل زاویه  $\theta$  میزان دوران امتداد محور  $X$  را با امتداد  $i$ - $z$  نشان می دهد. این امتداد به همراه ضخامت های گره های المان در ثابت حقیقی مربوط به این المان قابل تعریف می باشد. چنانچه ضخامت المان ثابت باشد، تنها تعریف ضخامت یک گره کافی می باشد.

همان گونه که بیان گردید، این المان دارای قابلیت چروک شدگی در فشار می باشد. به عبارت دیگر با استفاده از این خاصیت، فقط تنش های کششی در المان ایجاد می گردد. برای فعال نمودن این قابلیت، در قسمت مربوط به مشخصات المان، گزینه (1) KEYOPT را در حالت فقط کشش قرار می دهیم؛ در نتیجه امکان ایجاد رفتار پارچه گونه در یک یا دو جهت برای المان فراهم می گردد.



شکل ۶-۱۸- المان SHELL۴۱ به همراه دستگاه مختصات محلی [۱۷]

در شکل ۱۹-۶ شبکه‌بندی مدل نشان داده شده است.



شکل ۱۹-۶- شبکه‌بندی میان‌قاب آجری و قاب بتنی پیرامونی و تقویت FRP

#### ۲-۲-۳-۶- داده‌های ورودی FRP

تمامی مشخصات قاب و میان‌قاب آجری مشابه مدل‌های قبلی است و تنها تفاوت در تقویت آن با یک لایه صفحه FRP به ضخامت ۰/۱۶۵ است. در جدول ۹-۶ مشخصات مکانیکی صفحات FRP آمده است. در مدل آزمایشگاهی، لایه‌های FRP با لایه ای از چسب و رزین به بدنه میان‌قاب آجری - که از قبل مسطح شده و سطح آن به خوبی از هرگونه آلودگی پاک شده است - چسبانده شده و برای جلوگیری از جداسازی لایه‌ها به وسیله مهارهایی به قاب بتنی و نیز لایه‌ای که در سمت دیگر میان‌قاب نصب شده است، متصل شده‌اند.

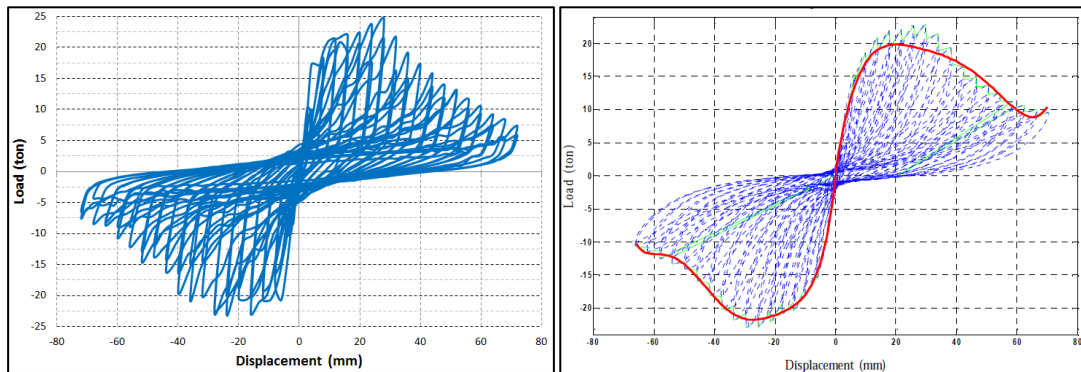
جدول ۹-۶- مشخصات مکانیکی FRP، مورد استفاده در تقویت میان‌قاب بر حسب گیگاپاسکال

Ex	Ey	Ez	Gxy	Gyz	Gxz	$\epsilon_{fu}$
۲۳۰	۱۲	۱۲	۷	۶	۶	۰/۰۱۵

#### ۳-۳-۶- نتایج به دست آمده از تحلیل اجزای محدود و مقایسه آن‌ها با نتایج آزمایشگاهی

نمودار هیستریزیس حاصل از تحلیل اجزای محدود و آزمایش قاب بتنی با میان‌قاب آورده شده

است (شکل ۶-۲۰).



شکل ۶-۲۰- نمودارهای هیستریزس آزمایشگاهی (سمت راست) و اجزای محدود قاب بتنی با میان قاب آجری تقویت شده با لایه‌های FRP (سمت چپ)

در جدول ۶-۱۰ حداکثر نیرو و سختی به همراه اختلاف آن‌ها آورده شده است.

جدول ۶-۱۰- مقایسه نتایج آزمایشگاهی و اجزای محدود، برای قاب بتنی

پارامترهای مورد استفاده در اعتبارسنجی	نتایج آزمایشگاهی	نتایج اجزای محدود	اختلاف
حداکثر نیروی تحمل شده توسط قاب (Ton)	۲۳/۲	۲۴/۸	۶/۸٪
سختی اولیه (KN/mm)	۵۰	۵۱/۷	۳/۴٪

تا این قسمت به بررسی اعتبار مدل‌سازی‌های انجام شده در نرم‌افزار ANSYS پرداختیم، در

فصل آینده با استفاده از این روش به تاثیر نحوه مقاوم‌سازی میان قاب‌ها می‌پردازیم.



## فصل هفتم

الگوهای مختلف تقویت دیوار میان قاب

با FRP

## ۷-۱- مقدمه

در مسائل مربوط به مقاوم‌سازی، توجه به میزان تاثیر عملیات مقاوم‌سازی بر مشخصات رفتاری سازه و گرفتن نتیجه دلخواه با کمترین هزینه و صعوبت اجراء مهمترین دغدغه مهندسان است. مشخصات مقاومتی قاب‌های مورد مطالعه مانند سختی، بیشینه مقاومت قاب و انرژی جذب شده در برابر بار جانبی با تقویت FRP به میزان بسیاری افزایش می‌یابد که برای رسیدن به حد مورد نیاز برای مقاومت در برابر بار جانبی و لحاظ کردن مسائل اقتصادی، باید میزان تاثیر شکل‌های مختلف تقویت و اندازه مناسب صفحات FRP بررسی شود. از این رو در این فصل نحوه تقویت اعضاء از نظر شکل و اندازه را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

## ۷-۲- نمونه‌های مورد آزمایش

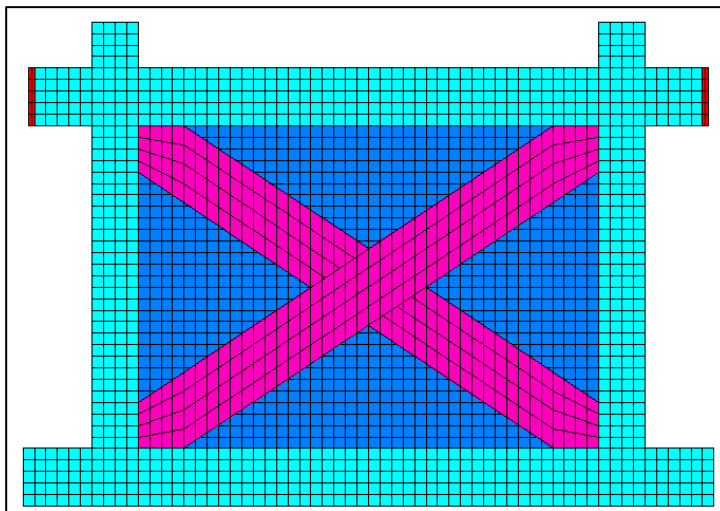
تاکنون تحقیقات بسیاری در مورد نحوه اعمال تقویت بر روی سازه‌ها انجام شده که هم در مورد سازه‌های فولادی و هم در مورد سازه‌های بتنی به انواع روش‌های اجرائی تقویت انجامیده است. این تحقیقات هم بر روی ابعاد و هم بر روی شکل تقویت انجام شده و تاثیر نتایج این تحقیقات را می‌توان در پروژه‌های مقاوم‌سازی که امروزه در سراسر دنیا انجام می‌گیرد، مشاهده کرد. در این تحقیق برای انتخاب مدل‌ها هم از اشکال مختلف و هم از ضخامت‌های مختلف لایه‌های FRP استفاده شده است. در انتخاب ضخامت صفحات سعی شده تا امکان تهیه آن میسر باشد.

تمامی نمونه‌ها از یک قاب بتن مسلح که با میان‌قاب آجر فشاری به صورت کامل پر شده تشکیل شده‌اند، که ابعاد و مشخصات قاب بتنی مسلح و میان‌قاب آجری دقیقاً مشابه نمونه ایست که در اعتبارسنجی کار از آن استفاده شده است. تفاوت مدل‌ها، در شیوه تقویت با صفحات FRP از نظر شکل (ضربدری، هشت یا شورون، و K شکل) و همچنین از نظر ضخامت لایه‌های FRP می‌باشد.

در این تحقیق از FRP با الیاف کربن یا همان CFRP استفاده شده است.

### ۷-۲-۱- نمونه‌های X

در این نمونه‌ها، تقویت میان‌قاب با استفاده از شکل بادبند ضربدری که در سازه‌های فولادی کاربرد دارد، انجام می‌شود. به این ترتیب چهار لایه FRP که دو به دو به صورت ضربدر قرار می‌گیرند، در دو طرف دیوار آجری مدل می‌شوند. لازم به ذکر است که به دلیل فرض چسبانیده شدن کامل لایه‌های FRP به سطح دیوار و استفاده کافی از مهارهای فیتیله‌ای و منگنه‌ای در تحقیق آزمایشگاهی، از جداسازی صفحات در مدل صرف‌نظر شده است. این نمونه‌ها شامل ۵ نمونه با ضخامت‌های متفاوت بوده که به ترتیب عبارتند از: X-۱ که در آن  $t=0/5mm$ ، X-۲ که در آن  $t=1/0mm$ ، X-۳ که در آن  $t=2/5mm$ ، X-۴ که در آن  $t=2/0mm$  و X-۵ که در آن  $t=2/5mm$ . شمای کلی نمونه‌های X در شکل ۷-۱ نشان داده شده است.

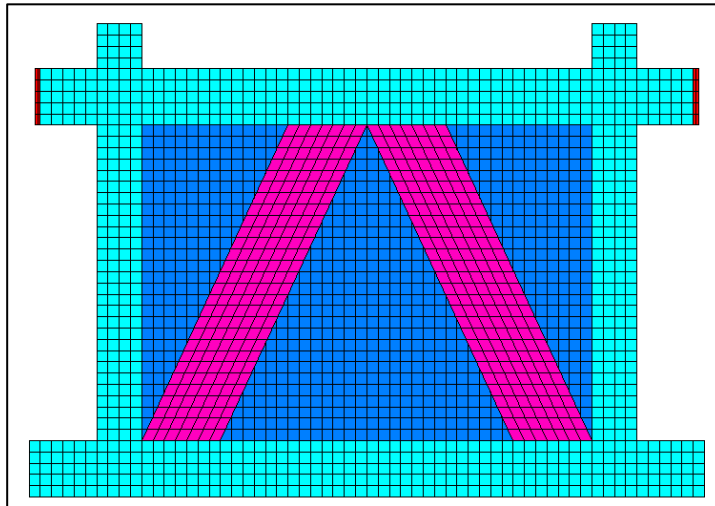


شکل ۷-۱- نمای کلی نمونه‌های X

### ۷-۲-۲- نمونه‌های S

در این نمونه‌ها، تقویت قاب و میان‌قاب با استفاده از شکل بادبند شورون که در سازه‌های فولادی کاربرد دارد، انجام می‌شود. به این ترتیب دو لایه FRP که به صورت بادبند شورون فولادی قرار می‌گیرند، در دو طرف دیوار آجری مدل می‌شوند. بنا به دلایلی که پیش‌تر گفته شد، در این مدل

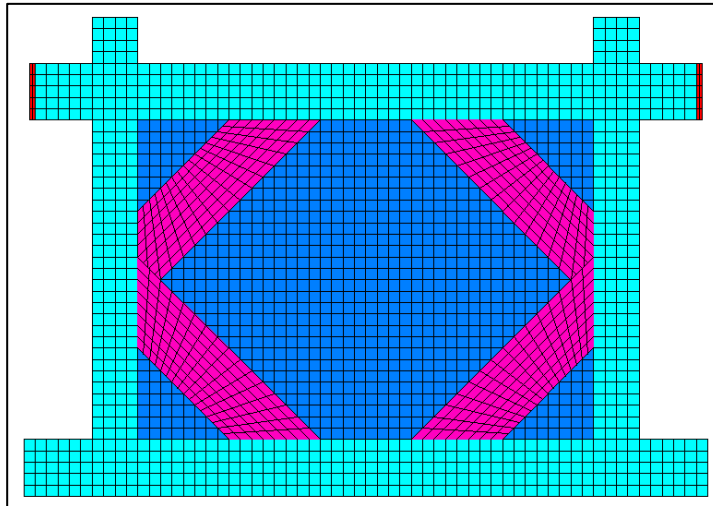
نیز از جدادگی صفحات در مدل صرفنظر شده است. این نمونه ها نیز شامل ۵ نمونه با ضخامت‌های متفاوت بوده که به ترتیب عبارتند از: S-۱ که در آن  $t=0/5\text{mm}$ ، S-۲ که در آن  $t=1/0\text{mm}$ ، S-۳ که در آن  $t=1/5\text{mm}$ ، S-۴ که در آن  $t=2/0\text{mm}$  و S-۵ که در آن  $t=2/5\text{mm}$ . شمای کلی نمونه‌های S در شکل ۲-۷ نشان داده شده است.



شکل ۲-۷- نمای کلی نمونه‌های S

### ۳-۲-۷- نمونه‌های K

در این نمونه‌ها، تقویت قاب و میان‌قاب با استفاده از شکل بادبند زانویی که در سازه‌های فولادی کاربرد دارد، انجام می‌شود. به این ترتیب هشت لایه FRP که دو به دو به صورت حرف انگلیسی K قرار می‌گیرند، در دو طرف دیوار آجری مدل می‌شوند. بنا به دلایلی که پیش‌تر گفته شد، در این مدل نیز از جدادگی صفحات در مدل صرفنظر شده است. این نمونه ها نیز شامل ۵ نمونه با ضخامت‌های متفاوت بوده که به ترتیب عبارتند از: K-۱ که در آن  $t=0/5\text{mm}$ ، K-۲ که در آن  $t=1/0\text{mm}$ ، K-۳ که در آن  $t=1/5\text{mm}$ ، K-۴ که در آن  $t=2/0\text{mm}$  و K-۵ که در آن  $t=2/5\text{mm}$ . شمای کلی نمونه‌های K در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۷-۳- نمای کلی نمونه‌های K

#### ۷-۲-۴- مشخصات مصالح

تمامی مصالح مطابق با نمونه‌های کالیبراسیون در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۷-۱- مشخصات ورودی بتن در نرم‌افزار برای مدل‌سازی قاب بتنی

$E_c$ (GPa)	$f_c'$ (MPa)	$f_r$ (MPa)	$\nu_c$	$\beta_t$	$\beta_c$	$T_c$
۲۳/۷۸	-۱	۳/۱۴	۰/۲	۰/۲	۰/۹	۰/۶

جدول ۷-۲- مدول الاستیسیته و ضریب پواسون آرماتورهای طولی و عرضی قاب بتنی



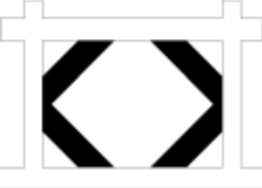
مشخصات فولاد	$E_s$ (GPa)	$\nu_s$
آرماتورهای طولی و عرضی	۲۰۰	۰/۳

جدول ۷-۳- تنش تسلیم و مدول مماسی آرماتورهای طولی و عرضی قاب بتنی

مشخصات فولاد	$f_y$ (MPa)	$E_2$ (GPa)
آرماتورهای طولی	۴۰۰	۰
آرماتورهای عرضی	۲۴۰	۰

مشخصات کامل نمونه‌ها را می‌توان در جدول ۷-۴ مشاهده نمود.

جدول ۷-۴- مشخصات نمونه‌ها

نام نمونه	ضخامت لایه FRP	نحوه قرارگیری صفحات FRP
X-۱	۰/۵	
X-۲	۱/۰	
X-۳	۱/۵	
X-۴	۲/۰	
X-۵	۲/۵	
S-۱	۰/۵	
S-۲	۱/۰	
S-۳	۱/۵	
S-۴	۲/۰	
S-۵	۲/۵	
K-۱	۰/۵	
K-۲	۱/۰	
K-۳	۱/۵	
K-۴	۲/۰	
K-۵	۲/۵	

جدول ۷-۵- مدول الاستیسیته و ضریب پواسون صفحات بارگذاری صلب قاب بتنی

$E_s$ (GPa)	$\nu_s$
۲۰۰	۰/۳

جدول ۶-۷- مشخصات ورودی در نرم افزار برای مدل سازی میان قاب

$E_c$ (GPa)	$f_c'$ (MPa)	$f_r$ (MPa)	$\nu_c$	$\beta_t$	$\beta_c$	$T_c$
۲/۸	-۱	۱/۲۴	۰/۱۵	۰/۲	۰/۹	۰/۶

جدول ۷-۷- مشخصات مکانیکی FRP، مورد استفاده در تقویت میان قاب بر حسب گیگاپاسکال

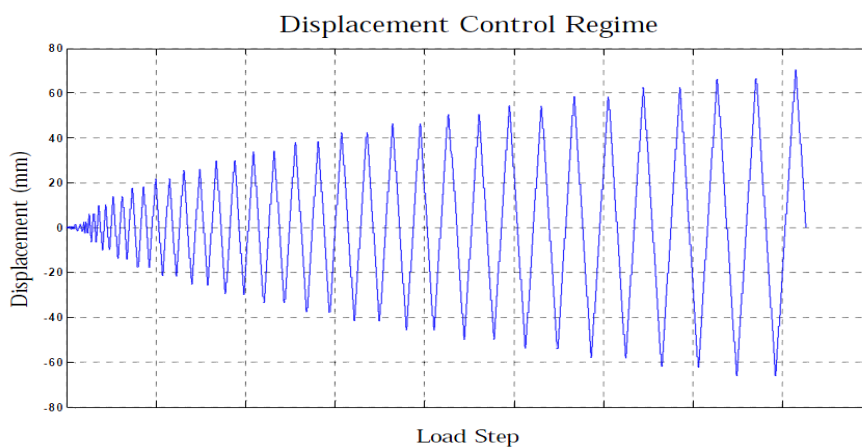
Ex	Ey	Ez	Gxy	Gyz	Gxz	$\epsilon_{fu}$
۲۳۰	۱۲	۱۲	۷	۶	۶	۰/۰۱۵

### ۳-۷- نحوه اعمال بار

به طور کلی در آزمایشاتی که در آن رفتار لرزه‌ای یک سازه یا عضو سازه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد، به دو صورت بار اعمال می‌شود. در روش اول بار به صورت نیروی کنترل شده به نمونه‌ها وارد می‌شود، اما در روش دوم که در این تحقیق نیز از همین روش استفاده شده، بارگذاری از طریق اعمال تغییرمکان‌های مشخص به نمونه وارد می‌شود.

اعمال بار یا تغییرمکان می‌تواند هم به صورت استاتیکی و هم به صورت دینامیکی انجام پذیرد. که در این تحقیق از روش استاتیکی استفاده شده است. مجموع زمان بارگذاری در حدود ۳۰ دقیقه می‌باشد.

در شکل ۴-۷ تغییرمکان‌های اعمال شده به نمونه‌ها را می‌توان مشاهده کرد.



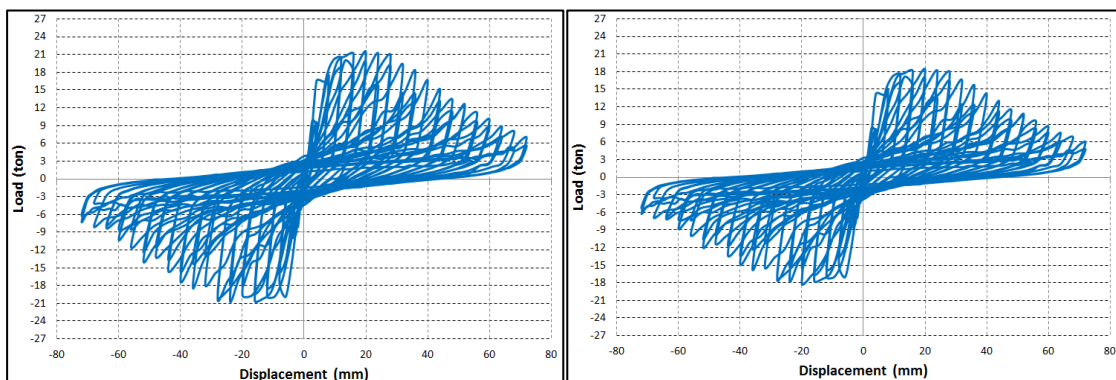
شکل ۴-۷- تغییرمکان‌های اعمال شده به نمونه‌ها

## ۷-۴- نتایج آزمایش

یک سازه یا عضو سازه ای که تحت بار جانبی رفت و برگشتی قرار میگیرد، دارای رفتار چرخه ای است که معمولا آن را با منحنی چرخه ای نیرو-تغییرمکان (هیسترزیس) بیان می کنند که سطح زیر آن بیانگر مقدار انرژی جذب شده در بارگذاری و باربرداری توسط سیستم می باشد. این منحنی گاهی در حوالی مرکز خود دارای فرورفتگی ناشی از مسائلی مثل ترک خوردگی بتن و میان قاب و نیروهای برشی می باشد.

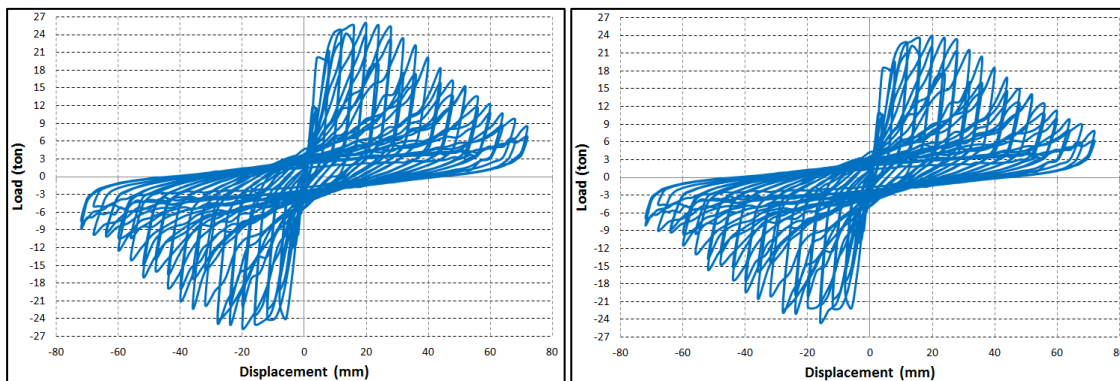
۱- در نمونه های X، مشاهده شد که در آغاز بارگذاری، با افزایش تغییر مکانها در ابتدا مقاومت به میزان زیادی افزایش داشته ولی این افزایش بعد از رسیدن به تغییرمکان ۱۲ میلیمتر متوقف می-شود. سپس با عبور از تغییرمکان ۲۸ میلیمتر مقاومت سازه دچار افت تدریجی شده که این امر ناشی از رسیدن المانهای دیوار آجری و قاب بتنی به حد گسیختگی می باشد.

نتایج حاصل از آزمایش نمونه های X را می توان در شکل های ۷-۵، ۷-۶ و ۷-۷ مشاهده نمود. در این نمودارها بار بر حسب تن و تغییرمکان بر حسب میلیمتر می باشد.

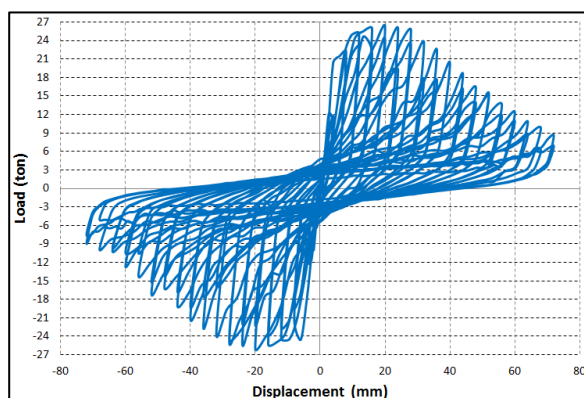


شکل ۷-۵- نمودار هیسترزیس نمونه های X-۱ (سمت راست) و X-۲ (سمت چپ)





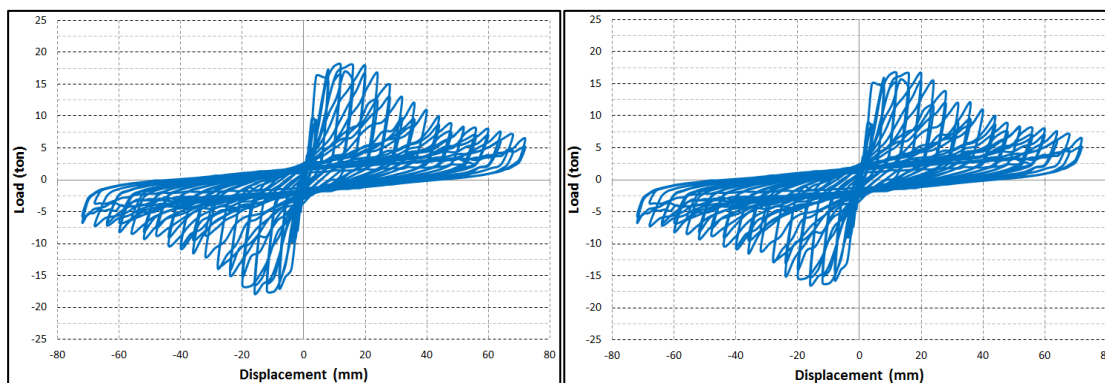
شکل ۶-۷- نمودار هیستریزیس نمونه‌های X-۳ (سمت راست) و X-۴ (سمت چپ)



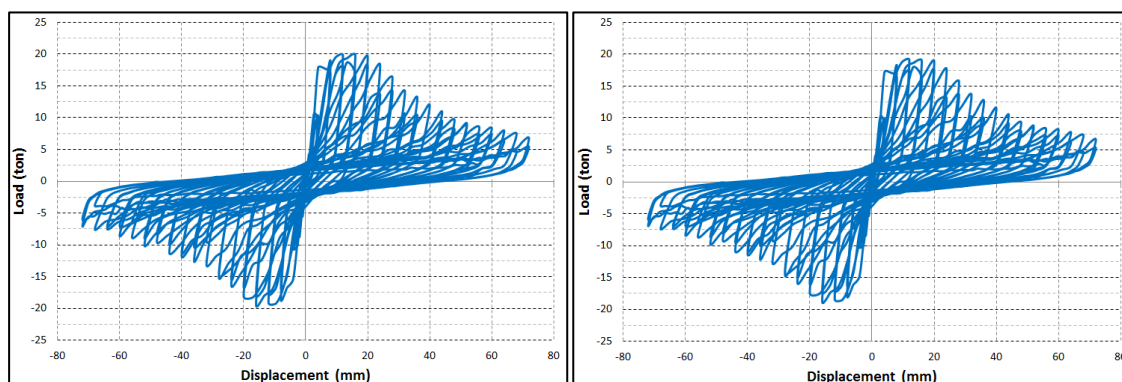
شکل ۷-۷- نمودار هیستریزیس نمونه‌های X-۵

۲- در نمونه‌های S، در آغاز بارگذاری، با افزایش تغییر مکان‌ها در ابتدا مقاومت افزایش داشته ولی این افزایش بعد از رسیدن به تغییر مکان ۸ میلیمتر متوقف می‌شود. سپس با عبور از تغییر مکان ۲۰ میلیمتر مقاومت سازه دچار افت شده که این امر ناشی از رسیدن المان‌های دیوار آجری و قاب بتنی به حد گسیختگی می‌باشد. در انتها نیز منحنی هیستریزیس با شیب کمتری به کاهش ادامه می‌دهد.

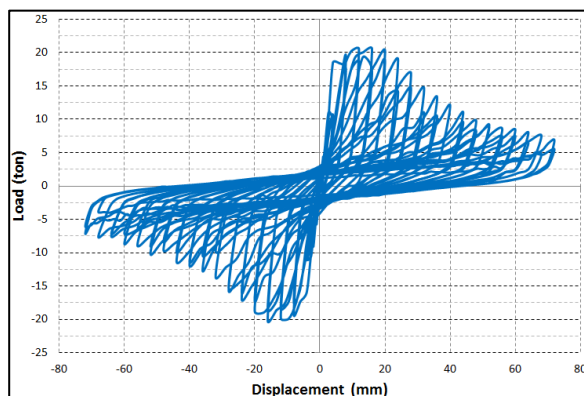
لازم به ذکر است که نمونه‌های S با وجود مقاومت کمتر در اول آزمایش، عملکرد خوبی در شکل‌پذیری و حفظ مقاومت کل سیستم در مراحل پایانی از خود نشان می‌دهند. نتایج حاصل از آزمایش نمونه‌های S را می‌توان در شکل‌های ۷-۸ الی ۷-۱۰ مشاهده نمود.



شکل ۷-۸- نمودار هیستریزیس نمونه‌های S-۱ (سمت راست) و S-۲ (سمت چپ)



شکل ۷-۹- نمودار هیستریزیس نمونه‌های S-۳ (سمت راست) و S-۴ (سمت چپ)

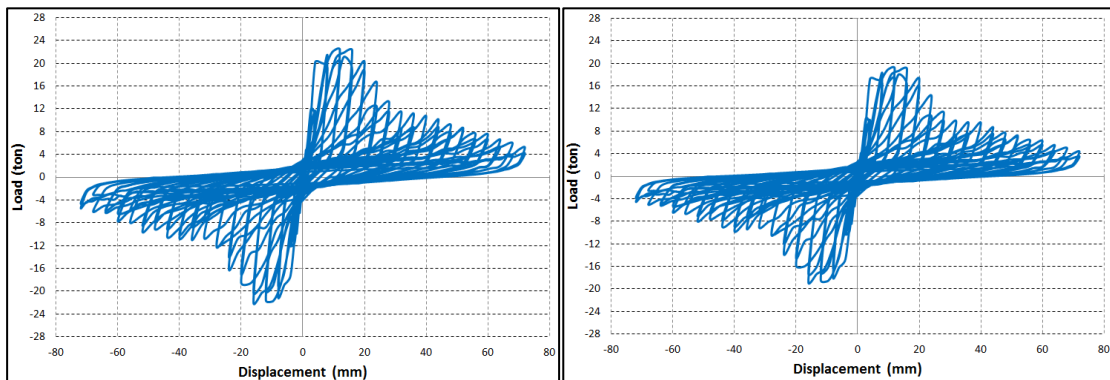


شکل ۷-۱۰- نمودار هیستریزیس نمونه‌های S-۵

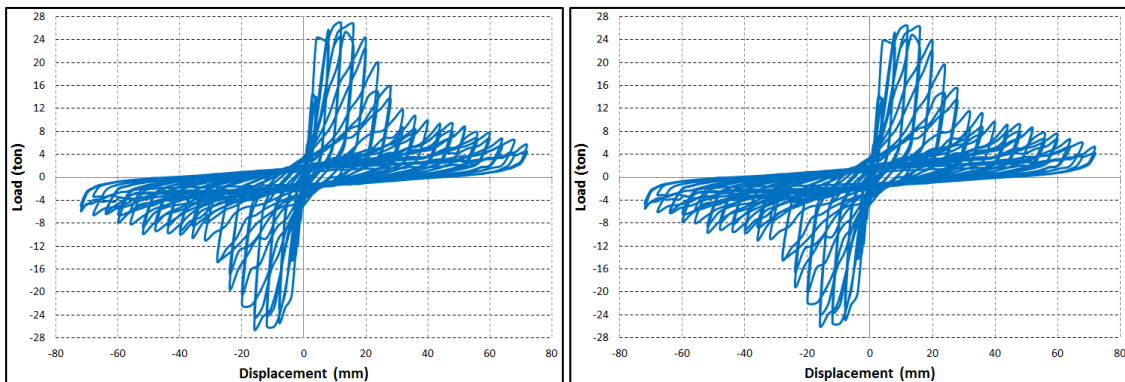
۳- در نمونه‌های K، در آغاز بارگذاری، با افزایش تغییر مکان‌ها در ابتدا شاهد افزایش شدید در مقاومت هستیم، ولی این افزایش بعد از رسیدن به تغییر مکان ۸ میلیمتر متوقف می‌شود. سپس با عبور از تغییر مکان ۱۶ میلیمتر مقاومت سازه دچار افت شدید شده که این امر ناشی از رسیدن المان-

های قاب بتنی به حد گسیختگی و گسیختگی بیش تر میان قاب نسبت به مدل های دیگر می باشد. در این نمونه ها به دلیل تمرکز لایه های FRP در گوشه ها، حفاظت کمتری از قسمت میانی دیوار آجری می شود. به همین دلیل شاهد افت شدید در مقاومت سیستم به دلیل گسیختگی یکباره بخش بزرگی از میان قاب هستیم.

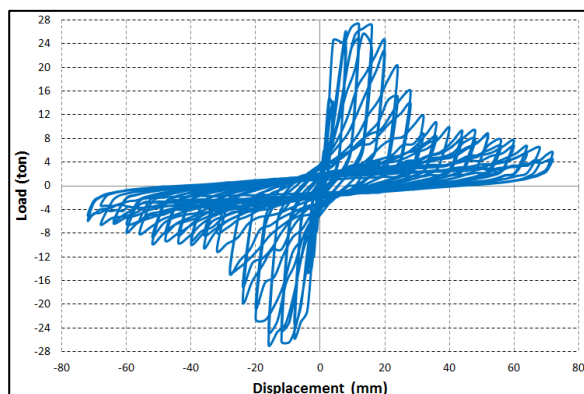
نتایج حاصل از آزمایش نمونه های K را می توان در شکل های ۷-۱۱ الی ۷-۱۳ مشاهده نمود.



شکل ۷-۱۱- نمودار هیستریزیس نمونه های K-۱ (سمت راست) و K-۲ (سمت چپ)



شکل ۷-۱۲- نمودار هیستریزیس نمونه های K-۳ (سمت راست) و K-۴ (سمت چپ)



شکل ۷-۱۳- نمودار هیستریزیس نمونه‌های K-۵

## ۷-۵- مقایسه نتایج

### ۷-۵-۱- جذب انرژی

با بررسی نمونه‌ها در می‌یابیم که نمونه‌های K دارای بالاترین بیشینه مقاومت و همچنین سختی بوده ولی نمونه‌های X با وجود مقاومت بیشینه کمتر، اما روند کاهش مقاومت ملایم، دارای میزان جذب انرژی بیش‌تر بوده و عملکرد مناسب‌تری از خود نشان می‌دهد. نمونه‌های S نیز با وجود کمترین میزان بیشینه مقاومت و مقاومت و جذب انرژی بیشتر نسبت به نمونه‌های K در انتهای بارگذاری عملکرد قابل قبولی از خود نشان می‌دهد.

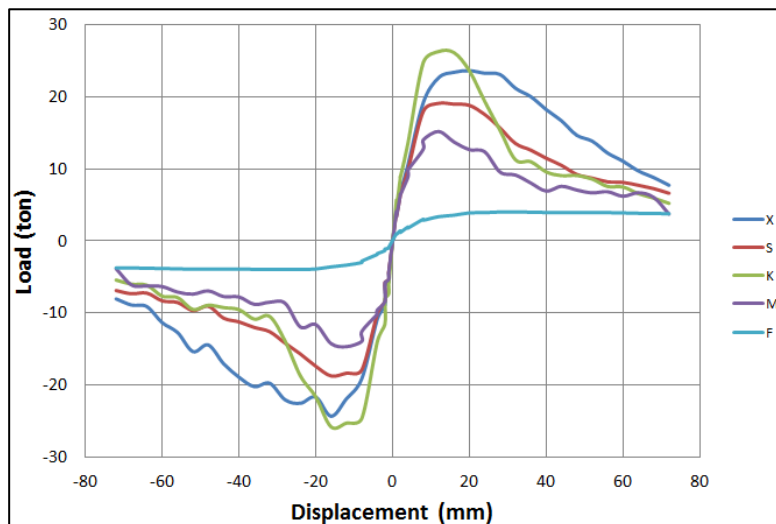
میزان جذب انرژی مدل‌های مختلف را در جدول ۷-۸ می‌توان مشاهده کرد.

جدول ۷-۸- میزان جذب انرژی مدل‌های مختلف

نوع مدل	میزاد جذب انرژی
مدل تقویت نشده	$2/8 \times 10^4 \text{ N.M}$
X-۳	$4/6 \times 10^4 \text{ N.M}$
K-۳	$3/9 \times 10^4 \text{ N.M}$
S-۳	$3/6 \times 10^4 \text{ N.M}$

مقایسه پوش منحنی هیستریزیس سه نمونه X-۳، S-۳ و K-۳ در شکل ۷-۱۴ قابل مشاهده

می‌باشد.



شکل ۷-۱۴ - مقایسه پوش منحنی هیستریزیس سه نمونه X-۳، S-۳ و K-۳ به همراه قاب بتنی و قاب با میان قاب

### ۷-۵-۲ سختی

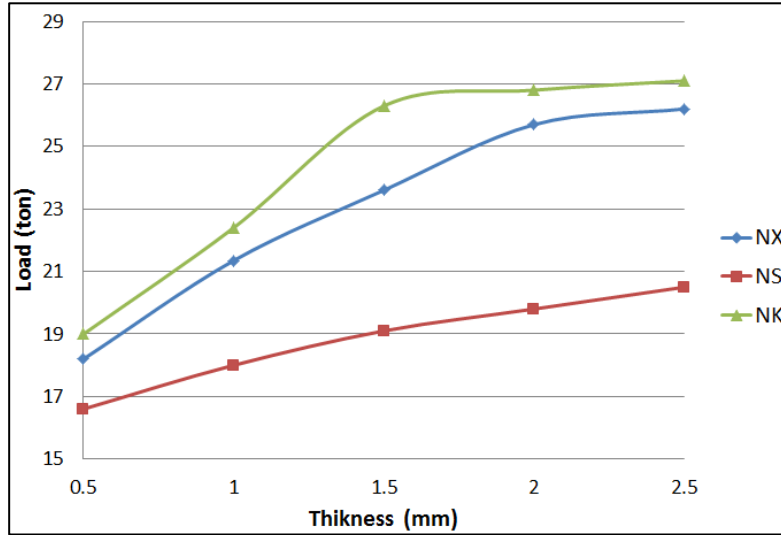
همان‌طور که در شکل مشاهده می‌کنیم، مقدار سختی در دو نمونه X و S برابر بوده که این مقدار با مقدار سختی نمونه بدون تقویت تقریباً مساوی می‌باشد. اهمیت این امر در این است که می‌توان با استفاده از این دو روش، بدون افزایش قابل توجه در سختی سازه (و به تبع آن نیروی زلزله) می‌توان مقاومت را افزایش داد.

### ۷-۵-۳ مقاومت

بررسی نتایج نشان می‌دهد که افزایش در ضخامت لایه‌های FRP در تمامی سه شیوه تقویت، باعث افزایش مقاومت می‌شود. اما این روند در نمونه X در ضخامت ۲/۵ میلیمتر و در نمونه K در ضخامت ۲ میلیمتر متوقف شده و از آن به بعد روند افزایش مقاومت کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده را می‌توان گسیختگی کششی بتن در محل اتصال لایه‌های FRP به بدنه سازه عدم تحمل و انتقال بار

بیش تر به آن لایه‌ها دانست.

در شکل ۷-۱۵ می‌توان روند افزایش مقاومت در اثر افزایش ضخامت را مشاهده کرد.



شکل ۷-۱۵- روند افزایش مقاومت نمونه‌ها در اثر افزایش ضخامت

## فصل هشتم

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۸-۱- نتیجه گیری

۱- میان قابها باعث افزایش قابل ملاحظه سختی قاب می گردند. در نمونه مورد بررسی در فصل پنجم، در خصوص سختی، افزایشی در حدود ۷ برابر قاب بدون میان قاب مشاهده می شود.

۲- در قابهای مورد بررسی در این تحقیق حداکثر مقاومت افقی قابهای دارای میان قاب آجر فشاری ۳/۷۵ برابر قاب معمولی می باشد.

۳- اضافه کردن میان قابها موجب افزایش استهلاک انرژی قاب شده به طوری که در نمونه مورد بررسی در جابجایی نسبی ۲/۵٪ استهلاک انرژی قابهای دارای میان قاب آجر فشاری ۲ برابر قاب بدون میان قاب می باشد. تقویت میان قابها با لایه های FRP نیز باعث افزایش قابل توجهی در استهلاک انرژی می شود.

۴- تقویت سازه ها با هر سه روش مورد بررسی در این پایان نامه می تواند تاثیر مناسبی در عملکرد سازه داشته باشد. ولی با توجه به نکات زیر در مورد نمونه هایی که با شکل ضربدری لایه ها تقویت شده اند:

الف- افزایش ناچیز میزان سختی سازه نسبت به نمونه تقویت نشده.

ب- افزایش قابل توجه در مقاومت نهایی سازه.

ج- بالاترین میزان انرژی جذب شده توسط سیستم.

این روش برای عملیات مقاوم سازی پیشنهاد می گردد.

۵- استفاده از لایه های FRP جهت مقاوم سازی میان قابها باعث افزایش قابل توجهی در مقاومت قابهای دارای میان قاب شده، به طوری که در نمونه های مورد بررسی، حداکثر این افزایش در حدود ۷۰٪ بوده است.

۶- استفاده از لایه های FRP جهت مقاوم سازی میان قابها در نمونه های تقویت شده با الگوی



ضربداری و شورون، باعث افزایش ناچیزی در سختی سازه شده، به طوری که در نمونه‌های مورد بررسی این افزایش کمتر از ۰.۵٪ بوده است. این امر موجب می‌شود تا بتوانیم بدون افزایش سختی و در نتیجه ثابت ماندن نیروی زلزله، مقاومت سازه را در برابر این نیرو افزایش دهیم.

۷- در صورت استفاده از سیستم FRP با شکل بادبندی K جهت مقاوم‌سازی میان‌قاب‌ها، مقاومت الاستیک سازه به‌طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد.

۸- در محاسبه ضخامت لایه‌های FRP باید به این نکته توجه داشت که نمی‌توان جهت مقاوم‌سازی میان‌قاب ضخامت لایه‌ها را بیش از اندازه افزایش داد. انتقال نیرو از قاب بتنی و میان‌قاب آن به لایه‌های FRP از طریق محل‌های اتصال این لایه‌ها انجام می‌پذیرد. حال آن‌که به دلیل محدودیت مقاومت بتن و مصالح آجری و نیز تمرکز تنش در محل‌های اتصال، انتقال نیرو به لایه‌های FRP تا حد مشخصی امکان‌پذیر می‌باشد. از این رو اضافه نمودن ضخامت لایه‌ها منوط به توانایی انتقال نیرو از سایر اجزاء سازه به این لایه‌ها می‌باشد. این امر از لحاظ مسائل اقتصادی نیز حائز اهمیت است.

۹- روش‌های عددی و بخصوص روش اجزاء محدود به کمک نرم افزارهایی چون ANSYS بخوبی می‌تواند در مورد عملکرد غیر خطی قاب و میانقاب در برابر بارگذاری رفت و برگشتی مورد استفاده قرار گیرد. از این طریق می‌توان در جهت کاهش هزینه‌های آزمایشگاهی و زمان تحقیق گام برداشت.

## ۸-۲- پیشنهادات

- ۱- در این تحقیق عرض لایه‌های FRP ثابت در نظر گرفته شده بود که می‌توان در تحقیقات آینده به بررسی تاثیر تغییر این پارامتر بر رفتار سیستم پرداخت.
- ۲- وجود بازشو در میان قاب و تاثیر آن بر الگوی مقاوم‌سازی با لایه‌های FRP و نیز تاثیر آن بر رفتار سازه می‌تواند موضوع تحقیقاتی در آینده باشد.
- ۳- شایسته است تاثیر مقاوم‌سازی به شیوه مورد بررسی در این تحقیق در سازه‌های چند طبقه و چند دهانه و استفاده ترکیبی از این الگوها مورد بررسی قرار گیرد.
- ۴- بررسی اثر لغزش بین لایه‌های FRP و سطح میان قاب با استفاده از المان‌های تماسی نیز می‌تواند در تحقیقات آینده مورد بررسی قرار گیرد.

- [١] Bank, L, ٢٠٠٦, “Composites for Construction: Structural Design with FRP materials”, *Book*.
- [٢] Van Den Einde L. &etc. ,”Use of FRP Composites in Civil Structural Applications”, *Elsevier* , ٢٠٠٣.
- [٣] Della Corte G., & etc., “Push-Pull Tests on a Real Masonry-Infilled Building”, *The ١٤<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, ٢٠٠٨.
- [٤] Tumialan G., & etc., “Field Evaluation of Unreinforced Masonry Walls Strengthened with FRP Composites Subjected to Out-of-Plane Loading”, *ASCE Structures Congress*, Philadelphia, U.S., ٢٠٠٠.
- [٥] Silva P.F., & etc., “Performance of Infilled URM wall Systems Retrofitted with FRP Rods and Laminates to Resist In-Plane and Out-of-Plane Loads”, *Structural Faults and Repairs*, London, U.K., ٢٠٠١.
- [٦] Tumialan G., & etc., “Shear Strengthening of Masonry Walls with FRP Composites”, *Composites ٢٠٠١ Convention and Trade Show, Composites Fabricators Association*, Tampa, Florida, U.S., ٢٠٠١.
- [٧] Binici B., & etc., “Analysis of Infilled Reinforced Concrete Frames Strengthened with FRPs”, *Springer* , ٢٠٠٦.
- [٨] Binici B., & etc., “Analysis and Design of FRP Composites for Seismic Retrofit of Infill Walls in Reinforced Concrete Frames”, *Elsevier*, ٢٠٠٦.
- [٩] Yuksel E., & etc., “Seismic Retrofit of Infilled Reinforced Concrete Frames with CFRP Composites”, *Springer*, ٢٠٠٦.
- [١٠] Altin S., & etc., “An Experimental Study on Strengthening of Masonry Infilled RC Frames Using Diagonal CFRP Strips”, *Elsevier*, ٢٠٠٧.
- [١١] Erol G., & etc., “Seismic Strengthening of Infilled RC Frames by CFRP”, *The ١٤<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, ٢٠٠٨.
- [١٢] Yuksel E., & etc., “Performance of Alternative CFRP Retrofitting Schemes Used

in Infilled RC Frames”, *Elsevier*, ۲۰۰۹.

[۱۳] Nateghi-Elahi F., & etc., “Experimental Behavior of Brick-Infilled Concrete Frames Strengthened by CFRP with Improved Attachig Technique”, *The ۱۴<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, ۲۰۰۸.

[۱۴] جاهد مطلق، حمیدرضا، نوبان، محمد رضا و اشراقی، محمد امین، ۱۳۸۳، "اجزاء محدود (ANSYS)" چاپ سوم، انتشارات دانشگاه تهران.

[۱۵] طلایی طب، سید بهزاد، "افزایش شکل پذیری اتصالات بتن آرمه با استفاده از ورقه های FRP" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی اصفهان، پاییز ۱۳۸۲.

[۱۶] Kachlakev, D., Miller, T., Yim, S. and Chansawat, Kasidit, “Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Structures Strengthened with FRP Laminates,” Final Report for Oregon Department of Transportation Research Group, *Internet File*, ۲۰۰۱.

[۱۷] *ANSYS User's Manual*, ۱۲<sup>th</sup> Version ANSYS, ۲۰۰۹.

[۱۸] دکتر داود مستوفی نژاد، کتاب سازه های بتن آرمه، جلد اول.

[۱۹] فرزاد پارسا و عبدالرضا سروقد مقدم (۱۳۸۷)، "بررسی آزمایشگاهی عملکرد میان قاب های مصالح بنایی در قاب های بتنی"، نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۲، شماره ۶، آذرماه ۱۳۸۷، ۶۸۱ - ۶۹۰.

[۲۰] *Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings*. (۲۰۰۵، ۱۹۸۷). Standard No. ۲۸۰۰-۰۵, ۱<sup>rd</sup> & ۳<sup>rd</sup> Edition, No. S-۲۵۳, BHRC publication.

[۲۱] رضانی، زهرا، ۱۳۸۷، "بررسی نحوه مقاوم سازی برشی تیرهای بتنی مسلح توسط FRP" پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، تابستان ۱۳۸۷.

[۲۲] <http://www.padtinc.com>, Website.

[۲۳] *Australian Standard, Masonry structures*. (۲۰۰۷). Standard No. ۳۷۰-۲۰۰۱.

## Abstract

Brick infill is one of the common infills which -according to common designing methods- its effect is ignored in behavior of structures. Its gravity load is the only thing that is applied. However, recent experiments indicate that the brick infill has certain effects on seismic behavior of structures.

Many structures that have been constructed with concrete moment frame system and infills which due to various reasons -such as change in codes and weakness of construction- need to be retrofitted persuade researchers to study infill's role in structure behavior. Recent studies show that strengthening infills can be helpful in improving structure behaviors.

Nowadays, use of fiber reinforced polymer (FRP) is one of the most useable retrofitting methods of reinforced concrete members. Using these polymers for strengthening brick members has attracted so much attention in recent years. By strengthening infills its properties -such as crushing and inflexibility- are improved and it can be used for the strengthening of the entire structure.

The main subject in this thesis is modeling the nonlinear behavior of concrete materials, brick wall and linear behavior of FRP with the use of ANSYS software. In order to model nonlinear behavior of concrete William-Warnk rupture criterion has been used. After that, a 1-story 1-span frame in classes: 1- without infill, 2- with infill and 3- with infill that strengthened with FRP laminates are modeled. Accuracy of presented models had been validated based on the results of tests done by other researchers.

After validation, we are going to study about the rate of improvement in structure behavior by strengthening with different shapes and thickness of FRP laminates.

**Keywords:** Finite Element, Infill, FRP, Strengthening, Concrete Frame.



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Engineering**  
**Civil Engineering Department**

**Investigation on behaviour of infills  
retrofitted with fiber reinforced polymer  
(FRP)**

By:  
**Hossein Mohammadirad**

Under Supervision of:  
**Dr. Farshid J. Alaei**

A thesis submitted to the Graduate Studies Office in  
partial fulfillment of the requirements for the degree of

**Master of Science**  
in  
**Structural Engineering**

July ۲۰۱۱