



## بررسی عددی رفتار دیوارهای بنایی مقاوم سازی شده با الیاف CFRP تحت بارگذاری استاتیکی و چرخه‌ای

محمد رضا داودی<sup>۱</sup>، مهدی عبادی<sup>۲</sup>، حسین فلاح نژاد<sup>۳</sup>، سید رسول نبویان<sup>۴</sup>

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

۲- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه سمنان

۳ و ۴- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

mehdisaze87@gmail.com

### خلاصه

عواملی نظیر عدم یکپارچگی در دیوارها، عدم کلاف‌بندیهای مناسب و وجود بازشوهای بیش از حد در دیوارها موجب انهدام سازه‌های بنایی در برابر بارهای جانبی می‌شوند. در سالهای اخیر استفاده از پلیمرهای تقویت شده با الیاف به عنوان یک راهکار مناسب جهت بهبود رفتار سیستم مقاوم جانبی مطرح بوده است. در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از مدل‌سازی عددی مبتنی بر اجزا محدود، اثر استفاده از الیاف پلیمری بر رفتار دیوارهای بنایی بررسی شود. در همین راستا دیواربنایی با استفاده از سه آرایش مختلف، مقاوم سازی شد و در پایان منحنی‌های نیرو-جابجایی ارائه و با هم مقایسه گردید. در حالت بارگذاری استاتیکی افزایش حداکثر نیروی مقاوم دیوار با پوشش‌های سه گانه ذکر شده به ترتیب برای پوششهای ضربدری، قاب‌مانند و سراسری ۵۵،۴۷ و ۹۷ درصد افزایش مقاومت ایجاد شد. در حالت بارگذاری سیکلی، حداکثر مقاومت برشی پای دیوار به ترتیب برای پوششهای ضربدری، قاب‌مانند و سراسری ۵۴،۶۲ و ۱۱۵ درصد افزایش مقاومت حاصل شد.

**کلمات کلیدی:** سازه بنایی، مقاوم‌سازی، CFRP، مدل‌سازی عددی، منحنی نیرو-تغییر مکان

### ۱- مقدمه

در اغلب ساختمان‌های بنایی از هیچگونه کلاف فلزی و یا بتنی به منظور تحمل بارهای جانبی وارد در حین زلزله استفاده نمی‌شود. ساختمان‌های بنایی به خاطر مقاومت کم و تردی دیوارها در برابر زلزله بسیار آسیب پذیر می‌باشند. آسیب پذیری بالای این سازه‌ها به خاطر ترکیب نامطلوب خواص مکانیکی آن می‌باشد. دیوارهای بنایی بسیار سنگین و دارای مقاومت کششی بسیار کمی می‌باشند. از آنجا که مقاومت فشاری مصالح بنایی بسیار بیشتر از مقاومت کششی آن می‌باشد، ترک‌های قابل توجه بیشتر در مناطق کششی اتفاق می‌افتد. تخریب و دوباره سازی اینگونه سازه‌ها راه حل اقتصادی مناسبی نمیتواند باشد، بلکه شناخت رفتار اینگونه سازه‌ها و روشهای بهسازی آنها راهی است که باید برای آن برنامه ریزی گردد.

گسترده‌گی تحقیقات انجام شده در زمینه‌ی ساختمان‌های مصالح بنایی به دلیل منسوخ شدن و عدم استفاده در اکثر نقاط دنیا مانند مصالحی نظیر فولاد یا بتن نیست ولی به هر حال در دهه‌های اخیر، مطالعات آزمایشگاهی و عددی بر روی ساختمان‌های بنایی صورت گرفته است.

بندتی و همکاران [۱]، تعداد ۱۱۹ عدد آزمایش میز لرزان بر روی ۲۴ مدل از خانه‌های دو طبقه انجام دادند. ایشان نتیجه گیری کردند با استفاده از تکنیک‌های ساده مانند پر کردن ترک‌های موجود و یا نوارهای فلزی افقی در دیوارها میتوان عملکرد سازه را در تحریک‌ها بهبود بخشید.

کورادی و همکاران [۲] نیز با انجام آزمایش‌های فشار قطری، سیستم مقاوم سازی پیشنهادی خود را مورد بررسی قرار دادند. این سیستم شامل تراشیدن نوارهایی در داخل دیوار و پر کردن آنها با ملات مناسب بود. آنها نتیجه گیری کردند این روش می‌تواند تا ۳ برابر، سختی برشی دیوار را افزایش دهد.

گوبراه و گل [۳]، آزمایش‌هایی را بر روی ۵ نمونه تمام مقیاس دیوار آجری انجام دادند. بارگذاری اعمال شده رفت و برگشتی و در جهت خارج صفحه بود. دیوارها با استفاده از نوارهای افقی و قائم FRP تقویت شدند. سیستم مقاوم سازی آنها که قابی از FRP را در اطراف بازشوها ایجاد می‌کرد سبب افزایش مقاومت و شکل پذیری دیوارها به ترتیب به میزان ۳ و ۱۰ برابر گردید.

ساتیران و همکاران [۴] آزمایش فشار قطری را بر روی تعدادی نمونه بنایی که با استفاده از مش‌های پلی پروپیلن مقاوم سازی شده بودند انجام دادند. ایشان نتیجه گیری کردند استفاده از سیستم می‌تواند مقاومت و شکل پذیری درون صفحه دیوارهای بنایی را به ترتیب تا ۲،۵ و ۴۵ برابر افزایش دهد.



یی و همکاران [۵] مدل المان محدود سه بعدی الاستیک یکپارچه و همچنین غیر الاستیک غیر یکپارچه را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گیری کردند مدل های غیر الاستیک یکپارچه نمی تواند رفتار گهواره ای و لغزشی اجزای بنایی که از مهمترین مودهای خرابی این ساختمان ها محسوب می گردد را مدل سازی کند . از آنجا که آزمایش امری هزینه بر و وقت گیر است لذا میتوان با انجام مطالعات عددی و کالیبراسیون پارامترهای ورودی مدل عددی ، به مدلی دست یافت که قابلیت ارزیابی رفتار لرزه ای سایر سازه ها با روشهای گوناگون مقاومسازی را در پی داشته باشد. در مطالعه پیش رو اثر استفاده از الیاف پلیمری در قالب چینههای مختلف روی دیوارهای بنایی غیر مسلح بر روی مقاومت برشی و میزان جذب انرژی آنها به کمک روشهای عددی بررسی میشود.

## ۲-مدلسازی عددی:

### ۱-۱- مشخصات هندسی و مکانیکی مصالح:

دیوار های به کار رفته در این آنالیز دارای ابعاد  $20 \times 100 \times 100$  سانتی متر هستند که از بلوکهایی به ابعاد  $20 \times 20 \times 10$  سانتی متر ساخته شده اند. نحوه ی قرار گرفتن بلوکها در کنار هم به صورتی است که درزها و شکافهای عمودی در دو ردیف بالا و پایین متوالی در یک راستا نباشند و به نوعی یک پیوستگی در دیوار ایجاد شود. در این مطالعه بارگذاری به صورت استاتیکی و سیکی است. بنابراین باید از یک مدل رفتاری مناسب برای بلوکهای بنایی استفاده شود تا تحت بارهای رفت و برگشتی ، هم در فشار و هم در کشش پاسخ مناسبی بدهند لذا از مدل رفتاری آسیب پلاستیک بتن استفاده میشود . برای مقاوم سازی نیز از الیاف CFRP به عرض  $10$  سانتی متر استفاده شده است. مشخصات مصالح استفاده شده در جدولهای ۱ الی ۴ آمده است.

جدول ۱- مشخصات الیاف پلیمری [8]

مشخصات الیاف پلیمری	
مدول الاستیسیته کششی (MPa)	۲۳۰۰۰۰
ضریب پواسون	۰/۳
ضخامت (mm)	۰/۱۳
مقاومت کششی (MPa)	۳۵۰۰
کرنش نهایی در کشش (%)	۱/۵

جدول ۲- مشخصات الاستیک بلوک

مشخصات الاستیک بلوک	
مدول الاستیسیته (MPa)	۳۲۰۰
ضریب پواسون	۰/۱۸
چگالی ( $\frac{kg}{m^3}$ )	۱۸۰۰

جدول ۳- رفتار فشاری بلوک بنایی در حالت پلاستیک

فشار	
کرنش پلاستیک	تنش (MPa)
۰	۷,۲۶
۰,۰۰۰۴۶	۷,۰۳
۰,۰۰۲۹	۶,۵۸
۰,۰۰۴۴	۵,۹
۰,۰۰۶	۴,۸۳
۰,۰۰۸	۳,۴۷

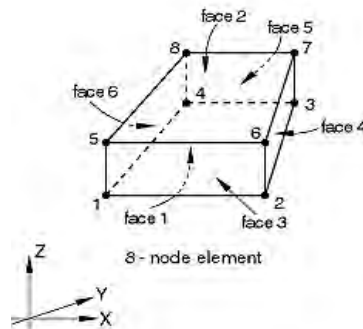
جدول ۴- رفتار کششی بلوک بنایی در حالت پلاستیک

کشش	
کرنش پلاستیک	تنش (MPa)
۰	۱,۵
۰,۰۰۱	۰,۵
۰,۰۰۳	۰,۱

برای مدل کردن رفتار ملات در حالت نرمال از رفتار تماس سخت استفاده شده است و در حالت مماسی نیز از ضریب اصطکاک ثابت استفاده شد. میزان ضریب اصطکاک برای شبیه سازی رفتار برشی ملات ۰.۶ و میزان چسبندگی برابر با ۳.۵ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در نظر گرفته شده است. در این مقاله از مقدار کم مقاومت کششی ملات صرف نظر شده است و بیشتر روی استفاده از مقاومت برشی آن تمرکز میشود.

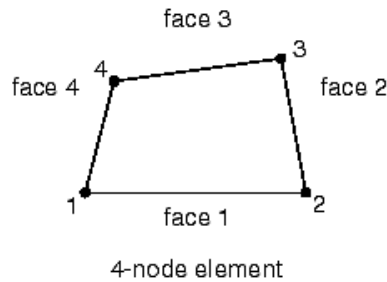
## ۲-۲- المانهای به کار رفته در مدل عددی:

در این مقاله برای مدلسازی دیوارهای بنایی، از ۲ المان مختلف برای بلوکها و الیاف پلیمری استفاده شده است. بلوکهای بنایی با استفاده از المان شش وجهی Solid، مش بندی شدند. این المان از نوع پوسته و سه بعدی با هشت گره است که هر کدام از گره های آن دارای ۳ درجه آزادی در امتداد محورهای اصلی هستند و قابلیت پذیرش هر نوع بار جرمی، دورانی و همچنین بارهای سطحی و خطی را با شدتهای مختلف دارند. جهت توزیع نیروها، تغییر مکانها و سایر پارامترها در این المان از توابع شکل به دست آمده از روش های انتگرالگیری کاهش یافته استفاده می شود.



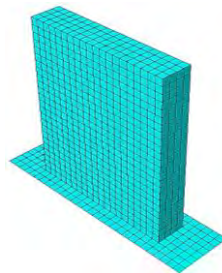
شکل ۱- المان solid مورد استفاده برای بلوکهای بنایی

برای مش بندی نوارهای FRP از یکی از انواع المانهای پوسته ای استفاده شد. این المان، یک المان ۴ گره ای و سه بعدی با ضخامت بسیار کم است که در هر گره خود دارای ۶ درجه آزادی کامل است و توانایی در نظر گرفتن کرنشهای غیرخطی را نیز دارد. جهت توزیع نیروها، تغییر مکانها و سایر پارامترهای مورد نیاز در این المان هم از توابع شکل حاصل از روش های انتگرالگیری کاهش یافته استفاده می شود.



شکل ۲- المان پوسته ای مورد استفاده برای الیاف نواری پلیمری

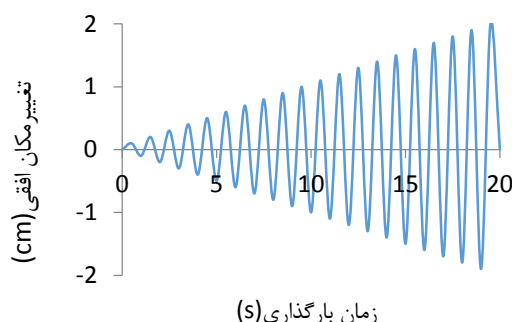
لازم به ذکر است که در شبکه بندی مدل المان محدود مدل عددی حاضر، ۲۰۰۰ المان حجمی و ۳۰ المان پوسته ای در واحد طول برای FRP بکار رفته است. در مدل المان محدود می توان تماس میان اعضای دیوار را مدل نمود. جهت مدل نمودن تماس میان سطوح تماسی از حالت تماس عمومی استفاده شده است. شکل ۳ مدل المان محدود نمونه بدون الیاف را نشان می دهد.



شکل ۳- مدل عددی مش بندی شده

### ۳-۲- حالات بارگذاری و نحوه آرایش الیاف :

در این مقاله برای اعمال بارها از یک تیر صلب با ابعاد  $20 \times 20 \times 100$  سانتی متر روی دیوار استفاده شد تا بارهای قائم و جانبی به آن اعمال شوند. ابتدا بار فشاری قائم به میزان ۱۲ کیلوگرم بر سانتی مترمربع به صورت تدریجی و پس از آن تغییر مکان جانبی متناسب با حالت بارگذاری به دیوار وارد می شود. این تغییر مکان در حالت مونوتونیک به صورت خطی افزایش یافته تا حداکثر ۳ سانتی متر و در حالت سیکلی به صورت رفت و برگشتی با دامنه حداکثر ۲ سانتی متر (شکل ۴) در نظر گرفته شد. همچنین در نظر گرفتن بار فشاری در واقع به منظور لحاظ کردن اثر سقف روی دیوار است تا شرایط مدلسازی به شرایط واقعی نزدیکتر شود. برای مقاوم سازی از الیاف با عرض ۱۰ سانتی متر به شکلهای مختلف بر روی دیوار استفاده شد. در حالت اول الیاف به شکل ضربدری، در حالت دوم به صورت قاب دور تا دور دیوار و در حالت سوم به صورت سراسری روی سطح خارجی دیوار قرار گرفتند. این عمل تنها روی یک سطح بیرونی دیوار انجام گرفته است و در نهایت نتایج حاصله که همان نمودارهای نیرو - تغییر مکان هستند با یکدیگر مقایسه شده اند.



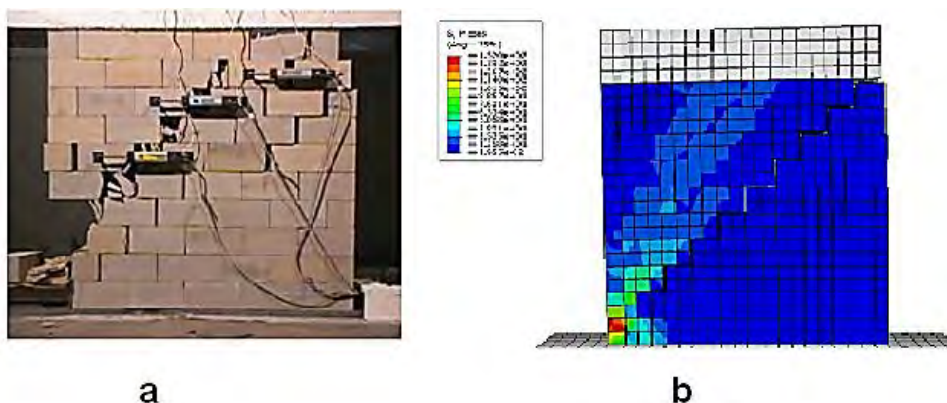
شکل ۴- نحوه تغییرات جابجایی جانبی بر حسب زمان در بارگذاری سیکلی

### ۳- نتایج:

#### ۳-۱- اعتبار سنجی :

آقای دانیل الیویرا [6] مدل آزمایشگاهی شامل دیوارهایی با ابعاد یک متر در یک متر و با ضخامت ۲۰ سانتی متر که ابعاد بلوکهای استفاده شده در آنها  $10 \times 20 \times 20$  سانتی متر است را مورد آزمایش قرار داد. ابتدا بارگذاری عمودی ۱۰۰ کیلو نیوتن روی دیوار اعمال شده و پس از اعمال بار قائم مذکور، دیوار تحت بارگذاری جانبی به صورت استاتیکی افزایش یافته قرار گرفت.

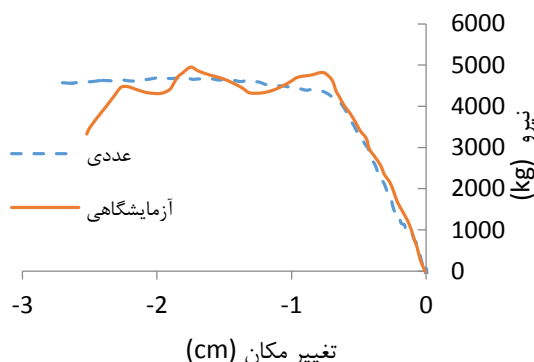
حال به بررسی وضعیت مدل عددی تحت بارگذاری اشاره شده در بالا و مقایسه نتیجه حاصل از آن با نتیجه آزمایشگاهی پرداخته میشود.



شکل ۵- وضعیت مدل عددی (b) و آزمایشگاهی (a) برای دیوار با سربار قائم ۱۰۰ کیلو نیوتن

همانطور که مشاهده میشود در ناحیه خطی بین نمودارها تطابق خوبی برقرار است اما با ورود به ناحیه غیرخطی میتوان اختلافاتی در نمودارهای عددی و آزمایشگاهی مشاهده نمود. به این صورت که در مدل عددی پس از رسیدن به نقطه حداکثر مقاومت، روند نمودار تقریباً ثابت است و عموماً در همان مقدار باقی می ماند، در حالیکه در نمودار مدل آزمایشگاهی، پس از عبور از ناحیه خطی، افت مقاومت وجود دارد و بتدریج این کاهش مقاومت بیشتر است. این تغییرات در نمودار مربوط به مدل‌های عددی دیده نمی شود و می توان آن را ناشی از تغییرات مشخصات رفتاری مصالح در ناحیه غیرخطی و همچنین پیچیدگی موجود در اندرکنش بین

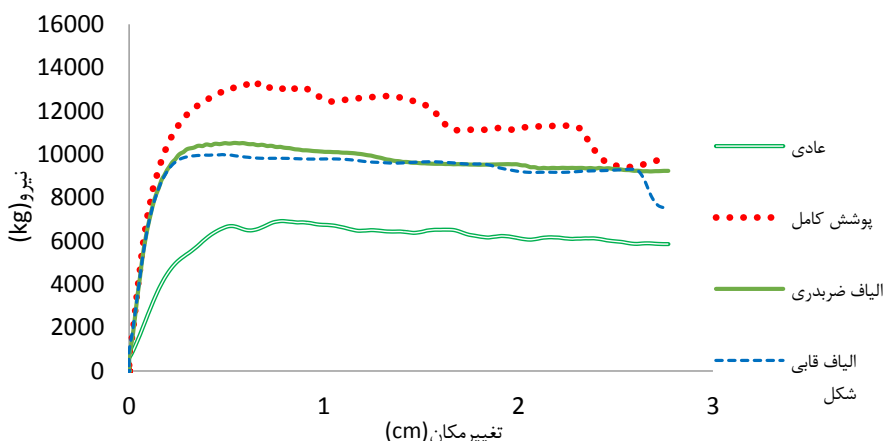
بلوک ها و رفتار غیرخطی ملات دانست در مجموع با توجه به میزان کم اختلافات بین جواب های عددی و آزمایشگاهی ، می توان نتایج این مدل سازی را دارای دقت خوب و کافی قلمداد کرد.



شکل ۶- نمودار نیرو - تغییر مکان مدل عددی و آزمایشگاهی تحت بار قائم ۱۰۰ کیلو نیوتن

### ۳-۲- نتایج بارگذاری مونوتونیک :

در شکل ۷ بطور همزمان منحنی های نیرو - جابجایی تمام مدل های عددی ساخته شده آمده است که از روی آن می توان به میزان تاثیر هر یک از روش های مقاوم سازی با الیاف بر روی جذب نیروی برشی در پایه دیوار و همچنین تاثیر آنها در بحث جذب انرژی که وابسته به سطح زیر منحنی نمودارهاست ، مورد مقایسه قرار داد. در نهایت به طور کلی می توان گفت که برای حالت بارگذاری استاتیکی افزایشده بهترین جواب مربوط به حالت مقاوم سازی با الیاف کامل است و حالت مقاوم سازی شده با الیاف ضربدری و الیاف در گوشه ها در مراتب بعدی قرار می گیرند.



شکل ۷- نمودار نیرو- تغییر مکان تمام مدل های عددی در بارگذاری استاتیکی افزایشده

در هنگام مقایسه بین حالات مختلف باید به مساحتی از دیوار که با الیاف پوشانیده شده است نیز توجه کرد و میزان تاثیر آن را هم در نظر گرفت. در جدول ۵ مقایسه ای بین سطح پوشش داده شده دیوار توسط الیاف و میزان افزایش مقاومت برشی متناسب با هر یک از حالات مقاوم سازی انجام شده است.

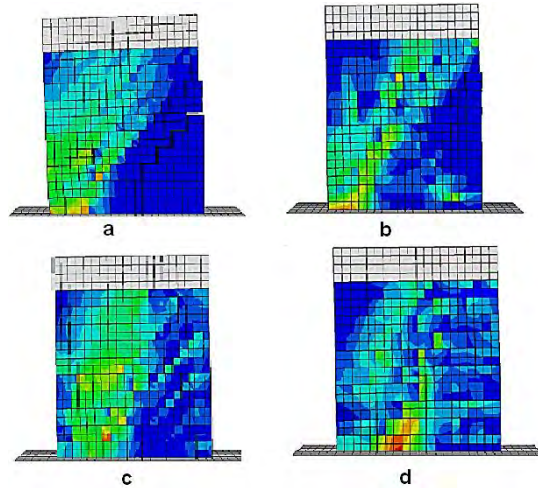
جدول ۵- مقایسه سطح پوشش توسط الیاف و میزان افزایش مقاومت برشی متناسب

حالت مقاوم سازی	درصد سطح پوشش داده شده با الیاف FRP	مقاومت برشی پایه دیوار (ton)
عادی	۰	۶/۸
الیاف ضربدری	۲۵	۱۰/۵
الیاف در گوشه ها	۳۵	۱۰
پوشش کامل	۱۰۰	۱۳/۴

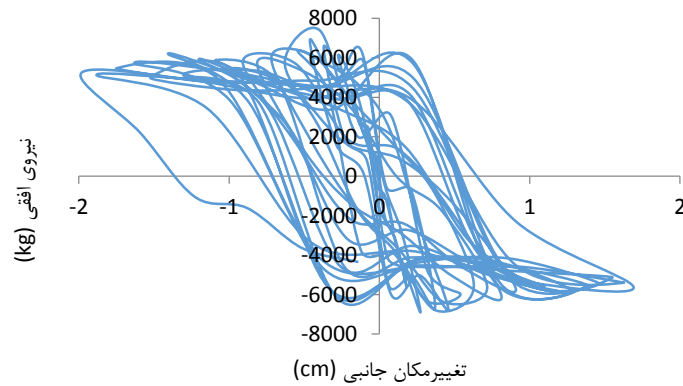
در شکل ۸ نحوه تغییر شکل و تنش های ترکیبی ایجاد شده در دیوار بنایی مدل سازی شده در حالات مختلف پوشش الیاف ، ارائه شده است.

### ۳-۳- نتایج بارگذاری سیکلیک :

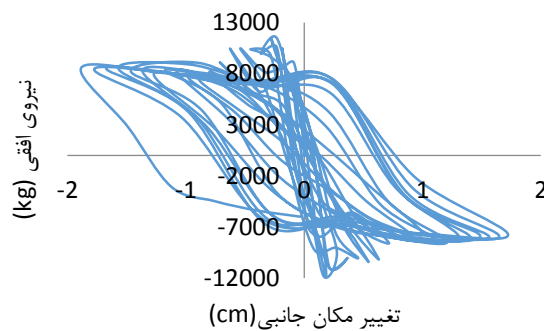
منحنی هیستریزس مدل فاقد الیاف که در واقع مدل کنترلی به شمار میرود، در شکل ۹ نشان داده شده است. از منحنی شکل ۹ می توان فهمید که میزان حداکثر مقاومت جانبی دیوار در برابر بار برشی چرخه ای اعمال شده برابر با ۷۴۰۰ کیلوگرم است و این در حالی است که از حداکثر نیروی جانبی تحمل شده توسط دیوار در حالت بارگذاری استاتیکی افزاینده که با شرایط مشابه از نظر بار قائم و سایر موارد انجام گرفته بود، ۶۰۰ کیلوگرم بیشتر است که ۱۰٪ افزایش را نشان می دهد. منحنی هیستریزس مدل با الیاف ضربدری در شکل ۱۰ آمده است.



شکل ۸- نحوه تغییر شکل و تنشهای ترکیبی ایجادشده در دیوار  
الف-عادی، ب- پوشش ضربدری، ج- پوشش قایبی، د- پوشش کامل

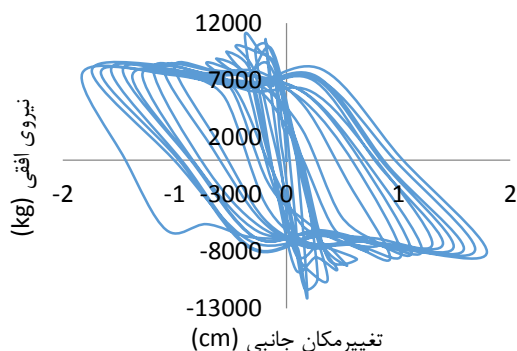


شکل ۹- منحنی هیستریزس دیوار عادی بدون تقویتی



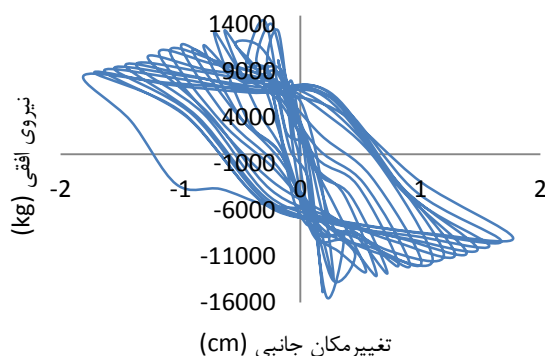
شکل ۱۰- منحنی هیستریزس دیوار مقاومسازی شده با الیاف ضربدری

همانطور که از منحنی هیستریزس بالا مشخص است، در این حالت دیوار توانسته نیرویی برابر با ۱۱۴۰۰ کیلوگرم را تحمل کند که این مقدار نسبت به حالت بدون الیاف ۴۰۰۰ کیلوگرم افزایش یافته است. در این حالت سطح زیر منحنی در هر چرخه نسبت به حالت عادی بیشتر است که در واقع میتوان گفت از نظر استهلاک انرژی سیستم با الیاف ضربه‌داری وضعیت مطلوب تری را ایجاد کرده است. در مرحله بعد بارگذاری سیکلی روی دیوار بنایی که با استفاده از الیاف در گوشه های آن مسلح شده است، انجام گرفت. منحنی هیستریزس مدل مقاومت‌سازی شده با الیاف در گوشه‌ها در شکل ۱۱ آمده است.



شکل ۱۱- منحنی هیستریزس دیوار مقاومت‌سازی شده با الیاف در گوشه‌ها

با توجه به نمودار فوق می‌توان فهمید در این حالت، دیوار توانسته حداکثر نیروی افقی برابر با ۱۲۰۰۰ کیلوگرم را تحمل کند که این در مقایسه با ماکزیمم نیروی جانبی حالت عادی که برابر با ۷۴۰۰ کیلوگرم بود افزایش ۶۲٪ را نشان می‌دهد که حتی نسبت به حالت ضربه‌داری ۸٪ بیشتر است. در حالتی که سطح خارجی دیوار به طور کامل با الیاف پلیمری پوشش داده شد نتیجه زیر حاصل شد. (شکل ۱۲)



شکل ۱۲- منحنی هیستریزس دیوار مقاومت‌سازی شده با الیاف سراسری

با توجه به منحنی فوق می‌توان گفت در این حالت حداکثر نیروی جانبی که دیوار توانسته طی بارگذاری رفت و برگشتی صورت گرفته تحمل کند حدود ۱۶۰۰۰ کیلوگرم است. به عبارتی در حدود ۱۱۵٪ افزایش مقاومت برشی در سطح پایه دیوار ایجاد شد که با توجه به نتایج به دست آمده در سایر حالات بهترین پاسخ به حساب می‌آید. در جدول ۶ مقایسه‌ای بین سطح پوشش داده شده دیوار توسط الیاف و میزان افزایش مقاومت برشی متناسب با هر یک از حالات مقاوم سازی انجام شده است.

جدول ۶- مقایسه سطح پوشش توسط الیاف و میزان افزایش مقاومت برشی متناسب

حالت مقاوم‌سازی	درصد سطح پوشش داده شده با الیاف FRP	مقاومت برشی پایه دیوار (ton)
عادی	۰	۷/۴
الیاف ضربه‌داری	۲۵	۱۱/۴
الیاف در گوشه‌ها	۳۵	۱۲
پوشش کامل	۱۰۰	۱۶



#### ۴- نتیجه گیری :

در این مقاله سعی شد تا با استفاده از روشهای عددی و اجزا محدود اثر پوشش الیاف های پلیمری با آرایش های گوناگون ، بر روی دیوار بنایی بررسی شود که در اینجا به طور خلاصه به ارائه نتایج پرداخته میشود:

- درحالت بارگذاری استاتیکی افزاینده ، حداکثر نیروی مقاوم دیوار در حالت عادی در حدود ۷۰۰۰ کیلوگرم بود که با پوشش های سه گانه ذکر شده به ترتیب برای پوششهای ضربدری ، قاب مانند و سراسری ۵۵، ۴۷ و ۹۷ درصد افزایش مقاومت ایجاد شد. اما از نظر بهره وری حالت ضربدری و پس از آن قاب مانند بهتر از پوشش کامل عمل کردند زیرا سطح کمتری از آنها با الیاف پوشش داده شده بودند. ترکها بیشتر به شکل قطری و پلکانی در نمونه ها ظاهر شد که ناشی از ضعف کششی ملات بود و فقط بسته به شکل مقاومسازی میزان و محدوده آنها تغییر کرد.

- در حالت بارگذاری سیکلی ، حداکثر مقاومت برشی پای دیوار حدود ۷۴۰۰ کیلوگرم بود و به ترتیب برای پوششهای ضربدری ، قاب مانند و سراسری ۵۴، ۶۲ و ۱۱۵ درصد افزایش مقاومت حاصل شد. ولی برخلاف حالت مونوتونیک پوشش قابی شکل کمی عملکرد مقاومتری بهتری نسبت به حالت ضربدری داشته است.

#### ۵- مراجع:

- [1] Benedetti, D., Carydis, P., and Pezzoli, P. (1998), "Shaking table tests on 24 simple masonry buildings", Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, No. 1, pp. 67-90.
- [2] Corradi M., Tedeschi C., Binda L., Borri A. (2006) "Experimental evaluation of shear and compression strength of masonry wall before and after reinforcement: Deep repointin", Construction and Building Materials
- [3] A. Ghojarah and K. El Mandooh Galal (2004), "Out-of-Plane Strengthening of Unreinforced Masonry Walls with Openings", Journal of Composites for Construction, Vol. 8, No. 4, August 1.
- [4] ] Sathiparan N., Mayorca P., Nesheli K., Ramesh G., and Meguro K. "In-plane and out-of-plane behavior of pp-band retrofitted masonry wallettes", Proc. of the 4th International Symposium on New technologies for urban Safety of Mega Cities in Asia, 18-19 Oct 2005, Nanyang Technological University, Singapore, Page 231-240.
- [5] Yi, T., Moon, F. L., Leon R. T., and Kahn L. F. (2006). "Lateral load tests on a two story unreinforced masonry building." J. Struct. Eng., 132(5), 643-652.
- [6] Oliviera.D, Lourenco.P.B (2003), "Experimental and Numerical Analysis of Block Masonry Structures under Cyclic Loading", Ph.D Thesis , University of Minho, Portugal.