

# بهبود رفتار لرزه ای و مقاوم سازی ساختمانهای با مصالح بنایی

حامد رجب پور<sup>۱</sup>، سپهر ساعدی<sup>۲</sup>، رضا اللهیاری<sup>۳</sup>، رضا سرکن دیزجی<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی مهندسی عمران - عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند،

عضو باشگاه پژوهشگران جوان

۲- عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند (آموزشکده سما)

۳- کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشگاه تبریز

۴- دانشجوی دکترای معماری، دانشگاه معماری و عمران باکو

[hamed.Rajabpour@gmail.com](mailto:hamed.Rajabpour@gmail.com)

## خلاصه

ایران در یکی از ۳ ناحیه زلزله خیز جهان قرار دارد (کمر بند آلپاید «هیمالیا-آپ») و وقوع زلزله های وسیع در بیست سال گذشته که منجر به خسارات مالی شدید و تلفات جانی بیش از ۱۰۰ هزار نفر گردید، به دلیل قرار گرفتن در این موقعیت مکانی می باشد. این در حالی است که اکثر ساختمانهای کشور از نوع بنایی بوده، که بیشترین آمار تلفات جانی و خسارات مالی را به خود اختصاص می دهند. همین مساله بر انتخاب تکنیک ها و روش های خاص به منظور بهبود رفتار زلزله ای و مقاوم سازی ساختمانهای با مصالح بنایی دلالت دارد. در این مقاله با بررسی رفتار لرزه ای این نوع ساختمانها در برابر زلزله، روش های نوین مقاوم سازی و بهبود رفتار زلزله ای این نوع ساختمانها ارائه می شود.

**کلمات کلیدی:** ساختمانهای بنایی، زلزله، تسلیح، مقاوم سازی، FRP

## ۱. مقدمه

ساختمانهایی که با آجر، بلوک سیمانی و یا با سنگ ساخته می شوند، و در آن تمام یا قسمتی از بارهای قائم توسط دیوارهای با مصالح بنایی و قسمتی دیگر توسط عناصر فلزی یا بتنی آرمه تحمل می شود در ردیف ساختمانهای با مصالح بنایی محسوب می شود [۵]. پس از ورود آهن به بازار ایران ساختمانهای خشتی و گلی جای خود را به ساختمانهای بنایی بدون کلان دادند پس از انتشار آیین نامه ۲۸۰۰ ساخت، ساختمانهای بنایی کلاف دار رواج پیدا کرد. مشاهدات بعد از وقوع زلزله ناشی از این است، ساختمانهایی که ساخت آنها منطبق با آیین نامه ۲۸۰۰ زلزله ایران بوده همچنان سرپا برجا هستند و برخی هیچگونه آسیبی ندیده اند.

پابرجائی ساختمانها و عدم ریزش سقفها و دیوارها از این جهت قابل بحث می باشند که باعث ایجاد فرصت فرار و عدم خسارت های جانی در زلزله می شود که ایمنی را با خود به همراه می آورد.

هر چند که در حال حاضر احداث ساختمانهای دارای اسکلت فلزی و بتنی رو به افزایش است، اما هنوز هم اکثریت ساختمانهای موجود در کشور از نوع ساختمانهای بنایی می باشند. از آنجا که راه حل جلوگیری از چنین خسارتهایی، مقاوم سازی ساختمانهای موجود است، لزوم بررسی تحقیق در مورد

<sup>۱</sup> دانشجوی مهندسی عمران - عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند، عضو باشگاه پژوهشگران جوان

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد سازه های هیدرولیکی، دانشگاه تبریز

<sup>۳</sup> عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند (آموزشکده سما)

<sup>۴</sup> دانشجوی دکترای معماری، دانشگاه معماری و عمران باکو

شیره‌های مختلف بهسازی و مقاوم سازی ساختمانهای بنایی موجود به شدت احساس می‌شود. شناخت دقیق انواع آسیب‌های وارده به ساختمان و یافتن روش‌های مناسب مقاوم سازی با تقویت قسمت‌های اصلی و باربر ساختمان و افزودن عناصر باربر اضافی و نوع سازه بنایی می‌تواند راهی برای دسترسی به ایمنی بالاتر در مقابل زلزله باشد.

## ۲. زمین لرزه

آزاد شدن حجم زیادی از انرژی در داخل پوسته و یا بالای گوشته در مدت زمان کوتاه که موجب ایجاد امواج مکانیکی بصورت امواج حجمی، طولی، عرضی و امواج سطحی می‌شود را زمین لرزه می‌گویند [۲].

### ۱.۲ دامنه حرکت زمین در هنگام وقوع زلزله

دامنه حرکت زمین به سه قسمت تقسیم می‌شود:

- ۱- تکان‌های اولیه که عبارت است از لرزه‌های عرضی یکباره افزایش یافته، که پس از لحظاتی حرکت، تقریباً فروکش می‌کند. به عبارتی تکان‌هایی که با شدت کم در مدت زمان کوتاه رخ می‌دهد.
- ۲- تکان‌های اصلی که عبارت است از لرزه‌های با دامنه بزرگتر که بعد از تکان‌های اولیه ایجاد می‌شود.
- ۳- دنباله زلزله که کاهش امواج زلزله را در بر می‌گیرد.

### ۲.۲ علل وقوع زلزله

۱- نظریه تکتونیک صفحه‌ای: معتقد است که کل سطح کره زمین از شش صفحه اصلی و صفحات کوچکتر تشکیل شده که روی سطح مذاب شناورند و دارای فصل مشترکند و این صفحات کنار هم در فصل مشترکشان، سه حرکت می‌توانند داشته باشند که یکی دور شدن است و کوه زایی را سبب می‌شود و دوم اینکه صفحات نسبت به هم و به موازات هم حرکت کنند که اصطکاک جزئی داشته و زلزله خفیف ایجاد می‌کند. حالت سوم این است که دو صفحه به هم فشار وارد کرده و حجم زیادی انرژی بین آنها ایجاد شده و به محض غلبه این نیرو به اصطکاک یا از بین رفتن عامل اصطکاک، حجم زیادی انرژی آزاد شده و دو صفحه بر روی هم بلغزند و زلزله-های شدید ایجاد می‌شود.

۲- نظریه فرو ریختن غارهای زیر زمینی

۳- آتشفشان‌ها

۴- ایجاد مستحذات (تأسیسات) در سطح زمین: به عنوان مثال اگر سدی در روی زمین ساخته شود یا اگر کوهی یا تپه‌ای تخریب شود، وزن زیاد به علت انباشته شدن آب در پشت سد یا کاهش وزن به علت تخریب کوه سبب بر هم خوردن تعادل صفحات زمین می‌شود که این یکی از علل وقوع زلزله می‌شود.

۵- ریزش‌های جوی: نفوذ در لایه‌های خاک و از بین بردن اصطکاک سبب بروز زلزله می‌شود.

۶- جزر و مد: که باز هم با نفوذ در لایه‌های خاک اصطکاک از میان می‌رود.

### ۳.۲ مناطق زلزله خیز جهان

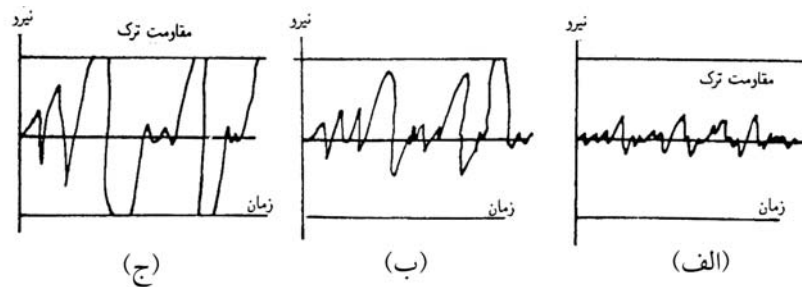
با توجه به نظریه تکتونیک صفحه‌ای اینچنین به نظر می‌رسد که مناطق زلزله خیز باید در سراسر جهان گسترده باشد. اما با این مکانیزم عمدتاً این انتظار می‌رود که زلزله‌ها در محل صفحات تکتونیک اتفاق می‌افتد اما به طور کلی بر اساس اطلاعات آماری مناطق زلزله خیز را به سه دسته می‌توان تقسیم نمود:

۱- نوار محیط اقیانوس آرام: مهم‌ترین نواحی زلزله خیز بوده و از زلاندنو به شمال و سپس از غرب تا مجمع‌الجزایر فیلیپین و از آنجا با جزایر تایوان و ژاپن و به طرف شرق و جنوب شرقی و غرب آمریکای جنوبی را در بر می‌گیرد.

۲- نوار هیمالیا (آلپ): که به آن آلیپاید گویند، از شرق آسیا شروع شده و پس از عبور از اندونزی، برمه، شمال هند، پاکستان، افغانستان، ایران و ترکیه تا دریای مدیترانه و جنوب غرب اروپا ادامه دارد.  
 ۳- نوار وسط اقیانوس اطلس: که از شمال به جنوب کشیده شده است.

### ۳. رفتار ساختمانهای با مصالح بنایی در مقابل زلزله

ضعف اساسی ساختمانهای آجری در مقابل زلزله، کمبود مقاومت نیست، بلکه کمبود نرمی (شکل پذیری) است [ ۲ ]. میزان خسارت سازه‌های نرم تا حدودی تابع بزرگی زلزله است و در زلزله‌ای بسیار مخرب با بزرگی بیش از ۷، در ناحیه مرکزی زلزله بیشترین آسیب مشاهده می‌شود و از مرکز که دور می‌شویم به تدریج از شدت آسیب کاسته می‌شود. در حالی که در مورد ساختمانهای آجری چنین نیست و از منطقه‌ای که ساختمانها کاملاً فرو ریخته است ناگهان به منطقه‌ای با ساختمانهای نسبتاً سرپا می‌رسیم (شکل ۱). رفتار یک ساختمان آجری غیر مسلح را در مقابل زلزله می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:



شکل ۱

الف) شدت زلزله از مقاومت ساختمان کمتر است و در این صورت سازه سختی اولیه خود را حفظ کرده، ضریب بازتاب برابر ۱، و نیروی زلزله برابر جرم ساختمان ضرب در شتاب زلزله است. این نیرو برای ایجاد ترک و در هم شکستن سازه کافی نیست و بنابراین ساختمان از زلزله آسیبی نمی‌بیند.

ب) شدت زلزله در لحظات واپسین آن از حد مقاومت سازه فراتر می‌رود و ترکها و خرد شدگیها آغاز می‌شود؛ سختی کم شده، تناوب زیاد می‌شود و در نتیجه ضریب بازتاب افزایش می‌یابد و سبب بالا رفتن نیروی زلزله می‌شود. اما چون این تحولات در لحظه‌های واپسین اتفاق می‌افتد و زلزله ادامه نمی‌یابد، سازه پایدار می‌ماند و در پایان زلزله فقط مقداری ترک و خرد شدگی ملاحظه خواهد شد.

ج) شدت زلزله در همان لحظه‌های آغازین از حد مقاومت سازه فراتر می‌رود و در نتیجه کاهش سختی و افزایش ضریب بازتاب، سازه در معرض نیروهای بزرگتری قرار می‌گیرد، به گونه‌ای که خیلی زود در هم می‌شکند و با خاک یکسان می‌شود.

مراحل سه گانه فوق از یک سو تابع بزرگی زلزله‌اند و معمولاً در زلزله‌های با بزرگی بیش از ۶، حالت (ج) اتفاق می‌افتد و غالباً در نواحی مرکزی زلزله ساختمانهای آجری غیر مسلح با خاک یکسان می‌شوند. از سوی دیگر با توجه به میرایی امواج زلزله، ساختمانهای آجری برحسب فاصله‌شان از مرکز زلزله می‌توانند مطابق یکی از حالت‌های بالا عمل کنند.

### ۱.۳ شکل‌ها ناحیه آستانه ترک

گفته شد که در زلزله‌های با بزرگی بیش از ۶، ساختمانهای آجری که در ناحیه مرکزی واقع‌اند فرو می‌ریزند و با دور شدن از این ناحیه و کاهش شدت زلزله به ناحیه‌ای می‌رسیم که می‌توان آن را ناحیه آستانه ترک نامید، زیرا در آنجا شدت زلزله به اندازه‌ای کم می‌شود که حالت سازه از (ج) به (ب) تبدیل می‌شود (مطابق تقسیم بندی فوق). ساختمانهایی که در آن سوی این ناحیه واقع‌اند ایستایی خود را حفظ کرده، حداکثر ممکن است ترکهایی را متحمل شوند. درک این پدیده برای ناظرانی که با اصول فوق آشنا نیستند قدری مشکل است، زیرا به ناگاه از منطقه‌ای که ساختمانها همگی بی آسیب یا کم آسیب مانده‌اند به منطقه‌ای می‌رسند که در آن ساختمانها با خاک یکسان شده‌اند. به عنوان مثال در زلزله منجیل آستانه ترک در راستای قزوین به منجیل راه ده کوهین در ۴۸ کیلومتری منجیل یافتیم. در این ناحیه شتاب اوج زمین تقریباً ۰/۳۶ برابر شتاب ثقل برآورد شد و بنابراین ساختمانهای آجری تحت نیرویی افقی به اندازه ۰/۳۶ برابر وزنشان در آستانه ترک قرار گرفتند.

#### ۴. خواص سازه‌ای و دینامیکی ساختمانهای آجری:

پیچیدگی رفتار سازه‌ای آجری مانع از آن بوده است که روشهای جامعی برای تحلیل خواص مکانیکی و سازه‌ای آنها به وجود آید، در حالی که برای تحلیل سازه‌های فولادی در نیمه دوم قرن نوزدهم و بتنی در نیمه اول قرن حاضر نظریه‌ها و روشهای مبسوطی پدید آمده بود. رفتار ناهمسانگرد، ناهمگن، غیرخطی و وجود ترکهای فراوان از یک سو، و صفحه‌ای بودن اجزای سازه‌های آجری از سوی دیگر پیچیدگی خاصی را ایجاد کرده است که غالباً جز با روشهای اجزاء محدود نمی‌توان از وضعیت تنشها اطلاعاتی به دست آورد. از طرفی به دلیل همین پیچیدگیها، نمی‌توان مدلهای کوچک شده ساختمانهای آجری را مورد آزمایش قرار داد، زیرا مصالح مصرفی (آجر و ملات) و مقاومت و سختی آنها را نمی‌توان مدلسازی کرد. خوشبختانه وجود دستگاههای آزمایش مدرن و با ظرفیت بالا نظیر میز لرزان، جکهای دو طرفه و محرکهای دینامیکی در دهه‌های اخیر این امکان را پدید آورده است که بتوان ساختمانهای آجری و اجزای آنها، نظیر دیوارهای برشی با اندازه واقعی آزمایش کرد و مقاومت، سختی، حالت‌های شکست و سایر اطلاعات سازه‌ای را به دست آورد.

#### ۱.۴ توزیع نیروهای زلزله

نیروهای لختی که در نتیجه شتاب پی (ناشی از حرکت زمین به هنگام زلزله) در ساختمان پدید می‌آیند باید به پی و از آنجا به زمین منتقل شوند. دیوارها به دو دسته برشی و عرضی تقسیم می‌شوند. دیوارهایی که موازی جهت حرکت پی هستند برشی، و آنها که عمود بر این جهت‌اند عرضی نامیده می‌شوند. بخشی از نیروهای دیوارهای عرضی به سقف، بخشی به زمین و بقیه به دیوارهای برشی که در دو طرف دیوار عرضی قرار گرفته‌اند وارد می‌شود. سقف نیروهای حاصل از زلزله و دیوارهای عرضی را به دیوارهای برشی منتقل می‌کند.

اصلیترین عنصر لرزه بر هر ساختمان آجری، دیوارهای برشی است که سرانجام باید بار افقی حاصل از کلیه اجزای دیگر را به زمین منتقل کند. علاوه بر این سقف نیز باید از یکپارچگی لازم برای انتقال نیروهای خود و نیز نیروهایی که از بخشهای دیگر دریافت می‌کند، به دیوارهای برشی برخوردار باشد. به عنوان مثال سقفهای تیرچه بلوک و طاق ضربی نسبتاً از صلابت برشی خوبی برخوردارند، در حالی که سقفهای سبک شیروانی چنین نیستند و نمی‌توانند بار دیوارهای عرضی را به دیوارهای برشی منتقل کنند. همچنین دیوارهای عرضی باید بتوانند بار خود را به سقف و پی و دیوارهای متعامد انتقال دهند.



شکل ۲

#### ۵. دلیل بنیادی ناپایداری لرزه‌ای ساختمانهای آجری غیر مسلح در برابر زلزله

تجربه‌های گذشته نشان داده است که ساختمانهای آجری، خشتی و سنگی غیرمسلح به راحتی در زلزله‌های مخرب و نیمه مخرب فرو می‌ریزند، به گونه‌ای که ساختمانهای روستایی حتی در زلزله‌های متوسط یا نسبتاً ضعیف خسارت می‌بینند. تاریخچه زلزله‌های کشور [۱] گواه آن است که در زلزله‌هایی با بزرگی بیش از ۵، احتمال انهدام روستاها وجود دارد. ساختمانهای شهری از مقاومت بیشتری برخوردارند اما بدون شک در زلزله‌هایی با بزرگی بیش از ۷ و در مناطق مرکزی زلزله شاهد انهدام بسیاری از این ساختمانهای آجری خواهیم بود.

تکرار این تجربه تلخ موجب پدید آمدن این گمان شده است که ساختمانهای آجری اصولاً فاقد مقاومت اند. از سوی دیگر پژوهشگران بسیاری بی توجه به دلیل اصلی ناپایداری ساختمانهای آجری، دست به آزمایش عنصرهای مقاوم یعنی دیوارهای برشی زده، با مشاهده مقاومتی نسبتاً زیاد، رابطه‌هایی را برای محاسبه دیوارهای برشی در مقابل نیروهای زلزله به دست می‌دهند [۱]؛ عده‌ای هم به یافتن مدل‌های ریاضی برای مطالعه رفتار دینامیکی ساختمانهای آجری در مقابل زلزله پرداخته‌اند، غافل از اینکه نتایج این بررسیها هر چه باشد نمی‌تواند این واقعیت را که ساختمانهای آجری غیر مسلح آسیب پذیرترین سازه‌ها در مقابل زلزله‌اند تغییر دهد؛ پس معضل ناپایداری را باید چاره‌ای دیگر جست.

به عنوان مثال برای دیوار برشی زیر با ابعاد  $0/35 \times 4 \times 3m$  (ارتفاع  $\times$  طول  $\times$  کلفتی) مقاومت برشی به این ترتیب محاسبه می‌شود.

$$\sigma_c = (3000)/(100 \times 35) = 0/86 \quad \text{kg/cm}^2$$

$$\tau_f = 2 + (0/5)(0/86) = 3/43 \quad \text{kg/cm}^2$$

$$H = (3/43)(400)(35) = 48000 \quad \text{kg}$$

ملاحظه می‌شود که این مقاومت بیش از نیروی زلزله ساختمان یک طبقه با مساحت  $500 \text{ m}^2$  است که از ضوابط قبلی زلزله ایران در آیین نامه ۵۱۹ به دست آمده است. اما این دیوار به هیچ وجه نمی‌تواند جلو انهدام چنین ساختمانی را به هنگام زلزله بگیرد. دلیل اصلی ناپایداری ساختمانهای آجری غیر مسلح را در عدم شکل پذیری آنها باید جست. برای روشن شدن مطلب لازم است به تفاوت بین نیروهای واقعی زلزله و نیروهای حاصل از آیین نامه توجه شود.

## ۶. روشهای تسلیح و بهسازی

### ۱.۶ بهسازی

بهسازی در لغت به مفهوم بهتر کردن، اصلاح یا بهبود بخشیدن به وضعیت یا شرایط است. در صنعت ساختمان، بهسازی بر حسب تعریف، ایجاد قابلیت انجام وظیفه یا وظایفی در ساختمان، سازه یا اجزا و عناصر آن است که در وضع موجود قادر به انجام تمام و کمال آن وظیفه یا وظایف نیستند [۳]. ناتوانایی ساختمان برای انجام وظیفه، که در این تعریف مورد اشاره قرار گرفته ممکن است ناشی از نارسایی طرح، نامناسب بودن اجرا بهره برداری بی ضابطه یا فروپایگی ساختمان، سازه ساختمان یا اجزا و عناصر آن در اثر تغییر در ضوابط آیین‌نامه‌های ناشی از توسعه، مانند اطلاعات مهندسی، از دست رفتن مشخصه‌های مصالح و تجهیزات به دلایل مختلف از جمله اثر فرساینده گذشت زمان، سانحه، حادثه یا عوامل دیگر، یا حاصل تغییر و تحول در شرایط زیست و کار سنگین تر شدن وظایف مورد انتظار ساختمان باشد.

اگر هدف از بهسازی، جبران فروپایگی و برگرداندن ساختمان، سازه یا اجزا و عناصر آن به وضع اولیه، باشد به آن اعاده وضع گفته می‌شود.

اگر بهسازی به منظور پاسخگویی به تغییر و تحول شرایط بهره برداری و سنگین تر شدن وظایف مورد انتظار ساختمان یا تغییر در ضوابط آیین نامه‌ها باشد، اعم از اینکه در سازه ساختمان یا در اجزاء و عناصر آن فروپایگی به وجود آمده باشد یا خیر، ارتقای وضع نام دارد. بهسازی، طیفی گسترده از خدمات مهندسی است و فعالیت‌هایی را در برمیگیرد که ممکن است به منظورهای مختلف فنی، اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی، زیبانشناسی و حتی سیاسی اجرا شوند.

بطور کلی، بهسازی صرف نظر از گستردگی آن مستلزم دخالت در وضع موجود ساختمان است همانطور که بهسازی طیفی گسترده را شامل می‌شود، حد دخالت در وضع موجود ساختمان، اجزا و عناصر آن نیز طیف گسترده از بسیار کم تا بسیار زیاد را پوشش میدهد که از ترمیم آغاز میشود و پس از عبور از تعمیر، تقویت، بازپیرایی، نوکاری تغییر سازگاری، تغییر اساسی و تغییر نوع بهره برداری، به گردشکاری و بازسازی می‌رسد. اگر هیچ یک از این راه حل‌ها نتیجه بخش نباشد، در صورت عدم مزاحمت، ساختمان به صورت متروکه رها میشود و یا تخریب شده و به جای آن بنایی با مشخصه‌های مورد هدف احداث میشود که به این کار، نوسازی میگویند.

همان طور که قبلاً بیان شد دیوارهای برشی عنصرهای اساسی لرزه در ساختمانهای آجری‌اند و حالتهای اصلی شکست آنها عبارت است از شکست خمشی و برشی. لذا برای آنکه از این حالتهای شکست جلوگیری کنیم باید در دیوار میلگردهای افقی و قائم قرار دهیم.

## ۷. مقاوم سازه های بنایی با استفاده از کامپوزیت های FRP

## ۱.۷ معرفی سیستم کامپوزیت FRP

سیستم های FRP چسبیده به صورت خارجی برای مقاوم سازی سازه های بتنی از حدود اواسط سال ۱۹۸۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفته اند. تعداد پروژه هایی که از سیستم های FRP در سراسر جهان استفاده میکنند، به طور چشمگیری از ده سال پیش تاکنون افزایش یافته است. اعضای سازه ای که توسط سیستم های FRP مقاوم سازی میشوند عبارتند از تیرها، دال ها، ستون ها، دیوارها، اتصالات و سازه هایی همانند کوره ها و دودکش ها، طاق ها، گنبدها، تونل ها، سیلواها، لوله ها و خرپاها [۳].

سیستم های FRP همچنین برای تقویت سازه های بنایی، چوبی، فولادی و چدنی مورد استفاده قرار گرفته اند. ایده مقاوم سازی سازه ها به وسیله چسباندن تقویت کننده ها به صورت خارجی، ایده ای جدید نیست. ایده سیستم های FRP با جایگزینی آن به جای تقویت کننده های دیگر مانند صفحات فولادی و پوششهای بتنی، شکل گرفته است.

## ۲.۷ تاریخچه توسعه و شکل گیری

در کشورهای توسعه یافته، سیستم FRP به عنوان یک جانشین برای صفحات فولادی، رشد فراوانی یافته است. به دلیل آنکه صفحات فولادی دچار خوردگی شده و منجر به تخریب چسبندگی بین فولاد و بتن میشوند و همچنین نصب آنها بسیار مشکل است و احتیاج به تجهیزات سنگینی دارند، محققان FRP را به عنوان جایگزینی برای فولاد در نظر گرفتند. کار آزمایشگاهی انجام شده بر روی مواد FRP که جهت تقویت سازه های بتنی استفاده شدند، برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ در آلمان گزارش شد. تحقیق انجام شده در سوئیس، به اولین کاربرد سیستم های FRP در پلهای بتن آرمه برای مقاوم سازی خمشی منجر شد.

سیستم های FRP برای اولین بار به منظور اعمال محدودیت و محصور کردن ستون های بتن آرمه در ژاپن در سال ۱۹۸۰ مورد استفاده قرار گرفت. وقوع حادثه ناشی از زلزله در سال ۱۹۹۵، سبب افزایش استفاده از FRP در ژاپن شد.

ایالات متحده آمریکا نیز تحقیقات مداومی درباره استفاده از تقویت کننده های بر پایه الیاف، به منظور مقاوم سازی سازه های بتنی انجام داده است که سابقه اش به سال ۱۹۳۰ باز میگردد. با وجود این، رشد و توسعه حقیقی و انجام تحقیقات در استفاده از این مواد برای تقویت سازه های بتنی در سال ۱۹۸۰ از طریق سازمان های FHWA و NSF در آمریکا آغاز شد. فعالیتهای تحقیقاتی به تقویت تعداد زیادی از پروژه ها در این کشور انجامید که در دامنه وسیعی از شرایط محیطی گوناگون اجرا شده اند.

توسعه آیین نامه ها و استانداردها برای سیستم های FRP در اروپا، ژاپن، کانادا و ایالات متحده آمریکا در حال رشد است. از حدود ۱۰ سال قبل تا به امروز، انجمن مهندسين عمران ژاپن (JCS) نیز راهنماهایی را در زمینه استفاده از مواد FRP در سازه های بتنی منتشر کرده اند.

## ۳.۷ مزایا کامپوزیت های FRP

مزیت اصلی مصالح FRP، نسبت زیاد مقاومت به وزن و مقاومت زیاد آن در مقابل خوردگی است. مقاومت زیاد آنها در عین حال که وزن کمی دارند سبب میشود که جابه جایی و حمل و نقل آنها راحت تر باشد و هزینه استفاده از آنها و نیروی کار، کاهش یابد. همچنین مقاوم بودن آنها در مورد خوردگی، سبب دوام و پایا بودن عملکرد آنهاست. مقاومت صفحات FRP دست کم دو برابر مقاومت صفحات است که این مقدار ممکن است تا ۱۰ برابر نیز افزایش یابد، در حالی که وزن آنها فقط ۲۰ درصد وزن فولاد است. مواد مرکب (کامپوزیت) FRP در موارد دیگری هم مورد استفاده قرار گرفته اند. برای نمونه، در صنایع هوایی از سالها پیش مواد کامپوزیت مورد استفاده قرار میگرفت [۳].

محدودیت استفاده و کاربرد آنها در مهندسی ساختمان به دلیل قیمت زیاد آنهاست. البته هزینه و قیمت آنها رو به کاهش است و به این ترتیب استفاده از آنها بیشتر و بیشتر خواهد شد. استفاده از آنها در زمینه مقاوم سازی سازه ها، هر چند هزینه زیادی دارد، اما با توجه به هزینه اجرای کم و نیز سایر مزایای FRP، در کل به عنوان یکی از موثرترین راههای مقاوم سازی سازه ها، به شمار میرود.

## ۸. تقویت سازه های بنایی با استفاده از میلگردهای FRP

این روش شامل جایگذاری میلگردهای کامپوزیتی در ملات متصل کننده از رویه ای خاص پیروی میکند که بندکشی مجدد سازه ای نامیده میشود این سیستم میتواند با لایه های FRP زمانی که سیستم هیبرید لازم باشد ترکیب شود. عنوان معمول برای این تکنیک، بندکشی مجدد سازه ای است که

شامل بکارگیری میلگردهای کوتاه FRP در برابر ترک های ناشی از خزش سازه بنایی سطوح بار مرده در دراز مدت میباشد این میلگردها با تزریق ملات سیمان مهار میشوند. در ادامه به بررسی مدل سازه های انجام شده بر روی دیوارهای غیر مسلح بنایی می پردازیم [۶].

$$\delta = \frac{ph}{1.2AG} + \frac{ph^3}{12EI} \quad (1) \quad G = \frac{e}{2.6} \quad (2) \quad I = \frac{tl^3}{12} = \frac{AL^2}{12} \quad (3) \quad K = \frac{P}{\delta} = \frac{EA}{h \left[ \left( \frac{h}{l} \right)^2 + 2.16 \right]} \quad (4)$$

در فرمول (۴) سختی دیوار آجری است.

## ۹. میزان سهم ورقه های ERP در تقویت دیوار بنایی

مدل Traintafillou

$$F = F_m + F_{FRP} \quad (5) \quad F_{FRP} = \rho_h E_{FRP} \varepsilon_{eff} tl \quad (6)$$

$$F_m = \text{مقاومت جانبی دیوار بنایی} \quad (7) \quad F_{frp} = \text{سهم FRP در مقاومت جانبی دیوار} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{eff} = 0.119 - 0.205(\rho_h E_{FRP}) + 0.0104 \left( \rho_h E_{frp} \right)^2 \quad (9) \quad F = \frac{N}{2(h+r)} \left( L - \frac{N}{f_{kt}} \right) \quad (10)$$

در رابطه فوق، F مقاومت جانبی اسمی دیوار، N بار محوری، L طول دیوار، h ارتفاع دیوار، t ضخامت دیوار، fk مقاومت فشاری مصالح بنایی، X طول نقطه فشار، a عمق بلوک تنش و r فاصله مابین محل نیروی جانبی تا قاب بنایی است. در رابطه C تنش فشاری میانگین به دلیل بار عمودی و در رابطه N تنش فشاری میانگین به دلیل بار عمودی است.

$$\tau_u = C + \mu\sigma \quad (11) \quad \sigma = \frac{N}{Lt} \quad (12) \quad (Ec699)Eurcod \quad F = \tau_u xt \quad (13)$$

$$\tau_u = \min \left\{ \begin{array}{l} c + 0.4\sigma \\ 0.030\sigma f_b + 0.126\sigma \end{array} \right. \quad (14) \quad \sigma = \frac{N}{Lt} \quad (15) \quad F = \tau_u lt \quad (16)$$

در فرمولهای بالا X طول منطقه فشار، t ضخامت دیواره و f<sub>b</sub> مقاومت فشاری واحد آجری است.

برای M<sub>r</sub> تا M<sub>q</sub> خواهیم داشت: c=0,2Mpa

مدل calvi و magnes

$$\tau_u = \min \left\{ \begin{array}{l} 1.5c + \mu\sigma \\ 1 + 3c \left( \frac{\alpha_v}{\sigma} \right) \\ \frac{c + \mu\sigma}{1 + \alpha_v} \end{array} \right. \quad (17) \quad \frac{M}{FL} = \frac{h+r}{L} \quad (18)$$

$$M = F(h+r) \quad (19) \quad V_n = V_m + V_f \quad (20)$$

در رابطه فوق α<sub>v</sub> ضریب برشی میباشد.

$$rA_m \left( \frac{f_{vk}}{\gamma_M} \right) + A_m K \sum \left( \frac{\rho_i f_{uj}}{\gamma_{FRPj}} \right) \quad (21) \quad d = \frac{A_{frp}}{A_{face}} \quad (22)$$

در رابطه بالا، r ضریب کاهش به علت توزیع نامنظم اصطکاک ناشی از لنگر خمشی، A سطح مقطع دیوار بنایی، f<sub>VK</sub> ظرفیت برشی دیوار بنایی،

γ<sub>m</sub> ظرفیت اطمینان مصالح بنایی، ρ<sub>i</sub> مقدار تسلیح FER افقی یا عمودی، ff<sub>u</sub> تنش شکست FRP و d ضریب توزیع میباشد که از رابطه زیر محاسبه میشود. دو طرف مسلح گردد ۰,۱۵d+۰,۰۷، در حالتی که یک طرف مسلح گردد ۰,۱۱+۰,۱۱k، با شرط ۰,۶۶۷ < d در حالتی که یک طرف مسلح گردد. ( k = 0.31d + 0.39 با شرط d > 0.667 )

## ۱۰. میزان سهم میلگردهای FRP

روش بند کشی مجدد (استفاده از میلگردهای FRP در بندهای دیوار بنایی)

$$V_{fv} = \rho_{frp} E_{frp} \left( r \frac{\varepsilon_{frp}}{r_{frp}} \right) b \times 0.9 \quad (23) \quad dV_n = V_m + V_f \quad (24)$$

$$V_f = V_{f1} + V_{f2} \quad (25) \quad n \sum A_f f_f = nb\tau L \quad (26)$$

در رابطه بالا  $L$  عبارت است از مجموع طول میلگردهایی که ترک را قطع میکنند.

$$r = \frac{L}{S} \quad (27) \quad V_{f2} = V_b + V_t \quad (28)$$

$$V_t = nrA_f f_{fu} f_{fu} \quad (29) \quad V_b = nb\tau L \quad (30)$$

دیوار غیر مسلح گیردار در پایین و بالا که تحت بارهای خارج از صفحه قرار میگیرد گرایش به ترک در منطقه تمرکز تنش کششی دارد. این ترکها در نواحی وسط ارتفاع دیوار در سطح مقابل بار و از نزدیکی دو انتها ایجاد میگردد. این پدیده مکانیسم قوسی نامیده میشود [۷،۶،۴].

## ۱۱. نتیجه گیری

با وجود اطلاعات فراوان متخصصین کشور در مورد مقاوم سازی، متأسفانه این اطلاعات در عمل جایگاه مناسبی پیدا نکرده است. بدون شک بالا بردن کیفیت مصالح و نحوه ساخت، یکپارچگی سقف و سبک کردن آن و نیز تعبیه عناصری که انعطاف پذیری ساختمان را افزایش دهد، (مانند کلافهای افقی) می تواند سبب افزایش مقاومت ساختمان شود اما هیچک از این تمهیدات به معنای تضمین پایداری قطعی سازه در مقابل زلزله های مخرب نیست ولی عاملی برای حفظ جان ساکنین خواهد بود.

## ۱۲. مراجع

۱. Hendry, w. H. , ۱۹۸۱ Structural brickwork, MacMillan Press.
۲. مقدم ، حسین ، طرح لرزه ای ساختمانهای آجری.
۳. دریابگی، حصاری ، رضایی فر، تقویت و بهسازی سازه های بتنی با مصالح FRP؛ مفاهیم و کاربرد.
۴. آئین نامه طرح ساختمانها در برابر زلزله- استاندارد ۲۸۰۰ - ویرایش سوم ، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن وزارت مسکن و شهرسازی، تهران ۱۳۸۶.
۵. آئین نامه طرح ساختمانها در برابر زلزله- استاندارد ۲۸۰۰ - ویرایش دوم ، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن وزارت مسکن و شهرسازی، تهران ۱۳۷۸.
۶. هوشمند زاده ، ۱۳۸۴ ، مقاوم سازی ساختمانهای بتنی به وسیله کامپوزیت های FRP دوازدهمین کنفرانس سراسری دانشجویان مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران.
۷. درب هنزی ، عباس؛ فرخنده ، سعید ؛ ۱۳۸۵ ، آنالیز روشهای بهبود رفتار زلزله ای سازه های بتنی با رویکرد روشهای نوین، کنفرانس ملی مقاوم سازی و بهسازی ایران، یادبود زلزله بم، تهران.