مقاوم سازی ساختمان‌های بنایی با استفاده از کامپوزیت‌های(FRP)

سعید علیزاده تقی‌آباد[۱]، محمد جواد فدائی[۲]، روح الله محمدی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، بخش عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۲- استادیار بخش عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، بخش عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

خلاصه

وقوع زمین لرزه‌های متعدد در منطقه و تحقیقات زمین‌شناسی انجام گرفته درباره گسل‌های موجود همگی بر این مطلب صحه می‌گذارند که ایران در منطقه‌ای لرزه خیز قرار دارد. با توجه به زلزله‌های رویداده در چند سال اخیر، بیشترین آمار تلفات و خسارات مربوط به ساختمان‌های بنایی است. لذا ضرورت توجه به امر مقاوم‌سازی این ساختمان‌ها نمود بیشتری پیدا می‌کند.

این تحقیق به بررسی سطح عملکرد انواع ساختمان‌های بنایی و نحوه مقاوم‌سازی و روش‌های مقاوم‌سازی از جمله استفاده از کامپوزیت‌های FRP می‌پردازد. همچنین بررسی عملکرد این کامپوزیت‌ها جهت استحکام بخشی سازه‌های بنایی غیر مسلح انجام شده است. نتایج حاصل از این تحقیقات نشان می‌دهد که کامپوزیت‌های FRP باعث افزایش استحکام کششی و برشی سازه‌های بنایی غیرمسلح می‌گردد.

کلمات کلیدی: مقاوم سازی، ساختمان‌های بنایی، کامپوزیت FRP

۱. مقدمه

از آنجا که کشور ایران به عنوان یکی از مناطق زلزله خیز جهان در مسیر کمربند زلزله آلپ- هیمالیا قرار دارد و وجود گسل‌های فراوان و رخداد زلزله-های شدید در گذشته‌های دور و دهه‌های اخیر در راستای گسل‌های شناخته شده و همچنین نقشه پهنه‌بندی موجود خطر زلزله نشانگر این واقعیت است که اکثر مناطق کشور در معرض وقوع زلزله‌های شدید یا نسبتا شدید قرار دارند.

در حال حاضر ساختمان‌های ساخته شده با مصالح بنایی (بخصوص ساختمان‌های آجری)، درصد بالایی از ساختمان‌های موجود یا در حال احداث در کشور ما را تشکیل می‌دهند مهم‌ترین عامل مقبولیت ساختمان‌های بنایی در ایران، بویژه در شهرستان‌ها در دسترس بودن مصالح، ساده بودن تکنولوژی تولید آجر و بلوک بنایی، آشنایی سازندگان با نحوه ساخت و ساز با مصالح بنایی و سرانجام ارزان‌تر بودن قیمت تمام شده این قبیل ساختمان‌ها نسبت به ساختمان‌های با اسکلت فولادی و بتن مسلح می‌باشد. [۱]

علی‌رغم تعداد و وسعت ساختمان‌های بنایی در کشور و علم به این مساله که بیشترین خسارات در زلزله‌های متوسط و نسبتا شدید مربوط به این ساختمان‌ها می‌باشد، اما متاسفانه در کشور کارهای تحقیقاتی زیادی در این زمینه انجام نشده است و از طرف دیگر مسئولین امر نیز تاکنون به طور جدی پیگیر این مساله یعنی مقاوم سازی ساختمان‌های بنایی نبوده‌اند. یکی از موانع موجود کمبود منابع مناسب و کارهای تحقیقاتی در زمینه مقاوم سازی ساختمان‌های بنایی می‌باشد، در واقع در داخل کشور علی رغم درصد بالای این ساختمان‌ها و خطرپذیری بالای آن‌ها کارهای زیادی انجام نشده است. در این تحقیق با استفاده از نتایج و تحقیقات تئوری و آزمایشگاهی سعی شده برای مقاوم سازی این ساختمان‌ها از کامپوزیت‌های FRP استفاده گردد.

---

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد سازه

[۲] استادیار بخش عمران

[۲] دانشجوی کارشناسی ارشد سازه

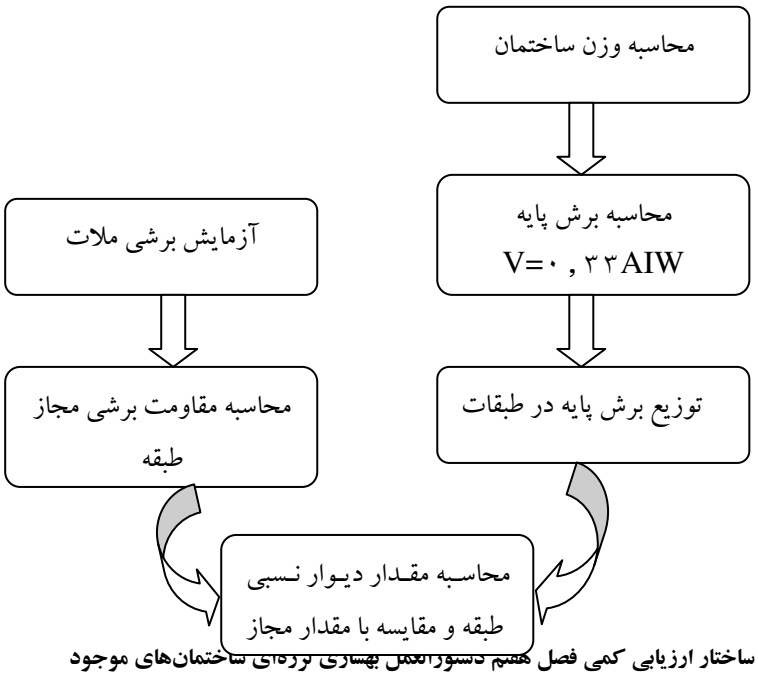
۲. انواع ساختمان‌های مصالح بنایی

۱. ساختمان‌های مصالح بنایی سنتی: ساختمان‌هایی هستند که بدون انجام محاسبات مهندسی ساخته شده‌اند و عناصر مقاوم لرزه‌ای خاصی نداشته و عموما به واسطه شکل نامناسب سازه‌ای، ضعف مصالح و نحوه اجرای نامناسب در برابر زلزله ضعیف عمل می‌کنند.

۲. ساختمان‌های مصالح بنایی کلاف‌دار: این ساختمان‌ها نیز بدون انجام محاسبات مهندسی ساخته می‌شوند ولی در اجرای آن‌ها برخی اصول طراحی مقاوم لرزه‌ای رعایت می‌شود در نتیجه رفتار آن‌ها در برابر زلزله از ساختمان‌های مصالح بنایی سنتی بهتر است. مبنای اجرای آن‌ها ضوابط آیین نامه ۲۸۰۰ می‌باشد. [۱]

۳. روش ارزیابی دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای برای ساختمان‌های بنایی غیر مسلح

این فصل از دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ایران که به ساختمان‌های بنایی غیر مسلح اختصاص دارد با روندی متفاوت از سایر فصول دستورالعمل که براساس طراحی بر پایه عملکرد می‌باشند، به کنترل ضوابط تجربی و اجرایی پیوست آیین نامه ۲۸۰۰ پرداخته است و تنها در مورد محاسبه مقاومت برشی ساختمان ارزیابی کمی به صورت کنترل دیوار نسبی مطابق نمودار شکل زیر انجام می‌شود. در این ارزیابی نیروی زلزله به صورت استاتیکی و با استفاده از رابطه ارائه شده برای سازه‌های بنایی محاسبه شده و براساس آن بدون توزیع بین عناصر سازه‌ای (دیوارها) مقدار برش در هر طبقه به دست می‌آید که مقدار آن باید از ظرفیت برشی طبقه کمتر باشد. لازم به ذکر است که این برآورد نیاز و ظرفیت منحصرا برای ساختمان‌های تا حداکثر سه طبقه و سطح عملکرد ایمنی جانی می‌باشد. [۲]



شکل ۱- ساختار ارزیابی کمی فصل هفتم دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود

۴. توزیع نیروی زلزله در ساختمان‌های بنایی

نیروهای لختی که در نتیجه شتاب پی (ناشی از حرکت زمین به هنگام زلزله) در ساختمان پدید می‌آید باید به پی و از آن‌جا به زمین منتقل شوند. دیوارهای ساختمان‌های بنایی به دو دسته تقسیم می شوند:

۱. دیوارهایی که عمودبر جهت حرکت پی هستند (دیوارهای عرضی) که نیروهای آن‌ها بخشی به سقفی و بخشی به زمین منتقل می‌شود.

۲. دیوارهایی که در جهت حرکت پی هستند (دیوارهای برشی) که بقیه نیروها تحمل می کنند و سقف‌ها نیروهای حاصل از زلزله و دیوارها عرضی را به دیوارهای برشی منتقل می‌کنند.

اصلی‌ترین عنصر لرزه‌بر هر ساختمان آجری دیوارهای برشی هستند که باید بار افقی حاصل از کلیه اجزاء دیگر را به زمین منتقل کنند. علاوه بر این سقف باید از یکپارچگی لازم برای انتقال نیروهای خود و نیز نیروهایی که از بخش‌های دیگر دریافت می‌کند، به دیوارهای برشی برخوردار باشد. [۳]

۵. انواع خرابی (ترک‌ها) در سازه‌های بنایی

خرابی‌ها در ساختمان‌های بنایی بیشتر به صورت ترک رخ می‌دهد که در زیر به بعضی از این موارد اشاره می شود:

۱. ترک‌های ناشی از نشست طبیعی زمین
۲. ترک ناشی از خشک شدن لایه‌های بنا در زمان احداث و عوامل جوی در طول زمان
۳. ترک ناشی از جابجایی ناگهانی لایه‌های زمین
۴. ترک بر اثر کاهش یا افزایش بارهای وارده بر پی‌ها
۵. ترک بر اثر وارد آمدن نیروهای رانشی به بنا
۶. ترک ناشی از لرزشهای پیرامون بنا مانند ترافیک، انفجار، حفاری و غیره
۷. ترک بر اثر تغییر فشار آبهای زیرزمینی و تغییر میزان رطوبت در بخش زیر پی‌ها
۸. ترک بر اثر تعبیه و فعالیت تأسیسات مدرن در داخل بناهای تاریخی
۹. ترک ناشی از کاهش تدریجی مقاومت و چسبندگی مصالح و ملاتها به علت فرسودگی در طول زمان
۱۰. ترک بر اثر ساخت و ساز جدید (الحاقات) بدون توجه به پیوستگی و همبستگی سازه‌ای بناهای قدیمی
۱۱. ترک بر اثر فشارهای وارده مانند تاق‌ها و فشار ناشی از زمین
۱۲. ترک در دیوار منحنی
۱۳. ترک در نقاط اتصال دیوارها
۱۴. ترک در جداره‌ها و دیوارهای پر بازشو (درها و پنجره‌ها)

با توجه به اینکه در ایجاد ترک‌ها کشش و برش عامل اصلی خرابی است، از این رو می‌توان گفت با توجه به اینکه کامپوزیت‌ها در افزایش مقاومت کششی و برشی موثر می‌باشند برای مقاوم سازی ساختمان‌های مصالح بنایی مناسب می‌باشند.

۶. ساختار کامپوزیت‌های FRP

کامپوزیت‌های FRP از دو جزء اساسی تشکیل می‌شوند؛ الیاف (فایبر) و رزین (ماده چسباننده). الیاف که اصولا الاستیک، ترد و بسیار مقاوم هستند، جزء اصلی باربر در کامپوزیت‌های FRP محسوب می‌شوند. بسته به نوع الیاف، قطر آن در محدوده ۵ تا ۲۵ میکرون می‌باشد. رزین اصولا به عنوان یک محیط چسباننده عمل می‌کند، که فایبرها را در کنار یکدیگر نگاه می‌دارد.

الیاف ممکن است از شیشه، کربن، آرامید و یا وینیلون باشد که در این صورت محصولات کامپوزیت مربوطه به ترتیب به نام‌های GFRP، CFRP، AFRP و VFRP شناخته می‌شود. [۴]

۷. استفاده از مواد FRP به عنوان مسلح کننده خارجی در سازه‌ها

به دنبال فرسوده شدن سازه‌های زیربنایی و نیاز به تقویت سازه‌ها برای برآورده کردن شرایط سخت‌گیرانه طراحی، طی دو دهه اخیر تاکید فراوانی بر روی تعمیر و مقاوم سازی سازه‌ها در سراسر جهان، صورت گرفته است. از طرفی، بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها به‌خصوص در مناطق زلزله خیز، اهمیت فراوانی یافته است. در این میان تکنیک‌های استفاده از کامپوزیت‌های FRP به‌عنوان مسلح کننده خارجی به دلیل خصوصیات منحصر به فرد آن از جمله مقاومت بالا، سبکی، مقاومت شیمیایی و سهولت اجرا، در مقاوم سازی و احیاء سازه‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده‌اند. از طرف دیگر، این تکنیک‌ها به دلیل اجرای سریع و هزینه‌های کم جذابیت ویژه‌ای یافته‌اند.

کامپوزیت‌های FRP در ابتدا به‌عنوان مواد مقاوم کننده خمشی برای پل‌های بتن‌آرمه و همچنین به عنوان محصور کننده در ستون‌های بتن آرمه مورد استفاده قرار می‌گرفتند؛ اما به دنبال تلاش‌های تحقیقاتی اولیه، از اواسط دهه ۱۹۸۰ توسعه بسیار زیادی در زمینه استفاده از مواد FRP در مقاوم سازی سازه‌های مختلف مشاهده می‌شود؛ بطوری‌که دامنه کاربردهای آن به سازه‌هایی با مصالح بنایی، چوبی و حتی فلزی نیز گسترش یافته است. تعداد موارد کاربرد مواد FRP در مقاوم سازی، تعمیر و یا بهسازی سازه‌ها از چند مورد در ۱۰ سال پیش، به هزاران مورد در حال حاضر رسیده است. اجزاء سازه‌ای مختلفی شامل تیرها، دال‌ها، ستون‌ها، دیوارهای برشی، اتصالات، دودکش‌ها، طاق‌ها، گنبدها و خرپاها تاکنون توسط مواد FRP مقاوم شده‌اند. [۴]

۸. مشخصات کامپوزیت‌های FRP

۸.۱. رفتار کششی

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

خصوصیات مصالح FRP در برخی موارد براساس سطح مقطع خالص الیاف و در برخی موارد براساس سطح مقطع ناخالص الیاف محاسبه می‌شود. سطح مقطع ناخالص سیستم FRP براساس سطح مقطع کامل لایه عمل آوری شامل الیاف و رزین محاسبه می‌گردد. سطح مقطع ناخالص معمولا برای ارائه خصوصیات لایه پیش عمل آوری شده با ضخامت ثابت به‌کار می‌رود مشروط بر آنکه نسبت اختلاط الیاف و رزین کنترل شده باشند. سطح مقطع خالص سیستم FRP براساس سطح مقطع معلوم الیاف ، صرفنظر از عرض و ضخامت کلی سیستم عمل آوری شده محاسبه می‌شود، لذا رزین حذف می‌گردد. این سطح مقطع خالص عموما برای بیان مشخصات سیستم‌های چسباندن تر استفاده می شود . در فرآیند اجرای روش چسباندن تر مقدار الیاف تحت کنترل بوده لیکن مقدار رزین متغیر می‌باشد.

در محاسبه خصوصیات سیستم FRP براساس محاسبه سطح مقطع ناخالص، ضخامت نسبی بیشتر و مقاومت و مدول الاستیسیته نسبی کمتری حاصل می‌شود. درحال یکه خصوصیات سیستم FRP براساس محاسبه سطح مقطع خالص، ضخامت نسبی کمتر، مقاومت و مدول الاستیسیته نسبی بیشتر منجر می‌گردد . بطور کلی صرفنظر از دو روش محاسبه براساس سطح مقطع خالص و سطح مقطع ناخالص، میزان باربری (ffu . Af) و سختی (Af. Ef) ثابت باقی می‌مانند. خواص محاسبه شده براساس سطح مقطع خالص به تنهایی نشانگر خصوصیات الیاف نیستند. خصوصیات یک سیستم FRP باید براساس خواص یک ترکیب محاسبه شود. به عبارت دیگر نه تنها خواص الیاف بلکه کارایی ترکیب سیستم الیاف - رزین، آرایش الیاف بافته شده و روش ساخت سیستم FRP در بیان خصوصیات سیستم FRP موثر است. خصوصیات مکانیکی تمام سیستم‌های FRP ، صرفنظر از شکل، باید براساس آزمایش بر روی صفحات لایه‌ای با درصد معین الیاف مشخص گردد.

لازم است از تولید کنندگان، مقاومت نهایی کششی براساس متوسط مقاومت کششی با رواداری ۳ برابر انحراف از معیار آن و به صورت مشابه حد کرنش نهایی شکست استعلام گردد.

$$f_{fu}^{*} = f_{fu}^{-} - 3\sigma \qquad (۱)$$

$$\varepsilon_{fu}^{*} = \varepsilon_{fu}^{-} - 3\sigma \qquad (۲)$$

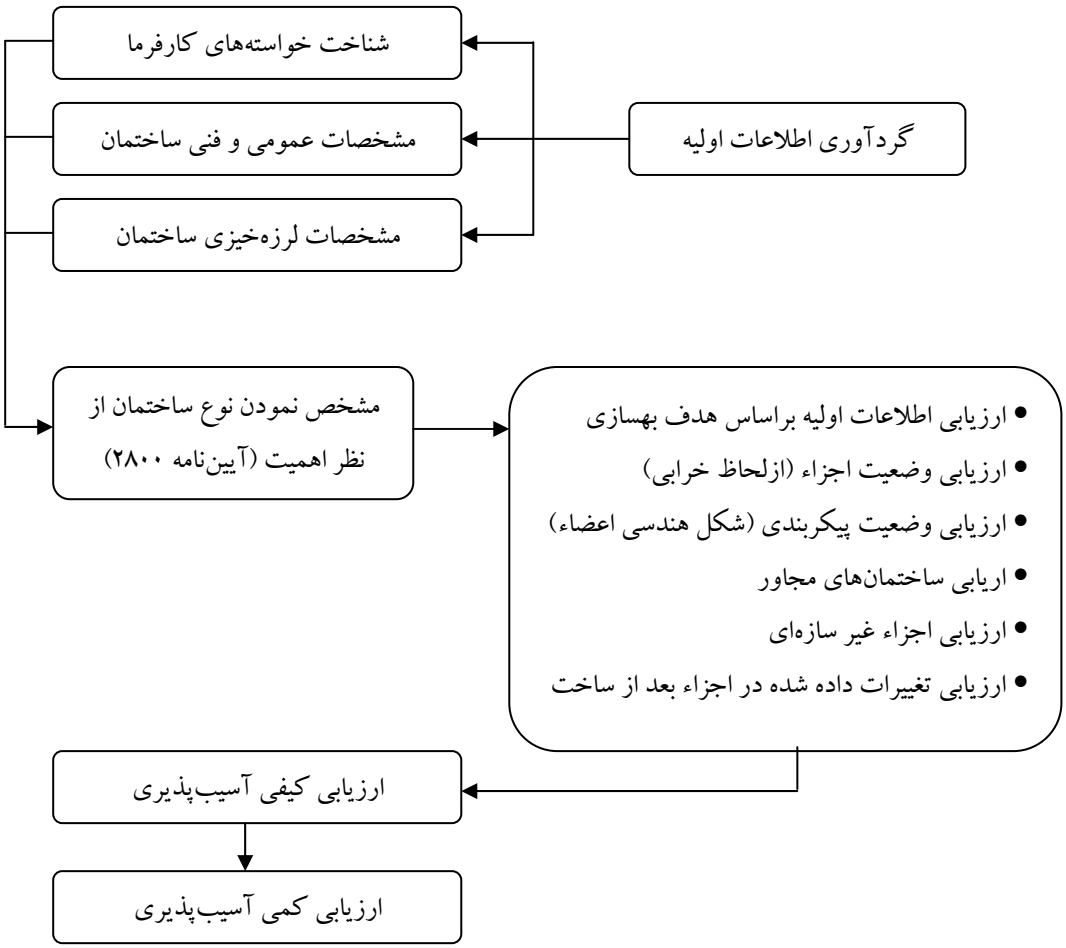
۸.۲. رفتار فشاری

سیستم‌های تقویت FRP که به صورت پوشش بیرونی عمل می‌کنند ، نباید به عنوان تقویت کننده فشاری مورد استفاده قرار گیرند. حالت گسیختگی لایه‌های FRP می‌تواند شامل گسیختگی کششی عرضی، کمانش موضعی الیاف یا شکست برشی باشد. این نوع گسیختگی بستگی به نوع الیاف، درصد آن و نوع رزین مصرفی دارد. مقاومت فشاری سیستم FRP با الیاف شیشه، کربن و ، آرامید به ترتیب حدود ۵۵، ۷۸ و ۲۰ درصد مقاومت کششی آنها می‌باشد. به طور کلی هر چه مقاومت کششی بالاتر باشد مقاومت فشاری آن نیز بالاتر است بجز در مورد آرامید که در آن الیاف در تراز پایین تنش فشاری، رفتار غیرخطی دارند.

مدول الاستیسیته فشاری FRP معمولا کمتر از مدول الاستیسیته کششی آن می‌باشد. به عنوان نمونه مدول الاستیسیته فشاری سیستم‌های FRP، با الیاف شیشه، کربن و آرامید به ترتیب حدود ۸۰، ۸۵ و ۱۰۰ درصد مدول الاستیسیته کششی آنها می‌باشد. [۵]

۹. مراحل ارزیابی آسیب‌پذیری

از آنجا که ارزیابی آسیب‌پذیری اولین گام در انجام مطالعات بهسازی است در این مرحله نواقص ساختمان مشخص می‌گردد و سپس با استفاده از روش‌های بهسازی این نواقص برطرف می‌گردد در شکل ۲ مراحل مختلف ارزیابی آسیب‌پذیری از دستورالعمل مذکور آورده شده است. [۶]



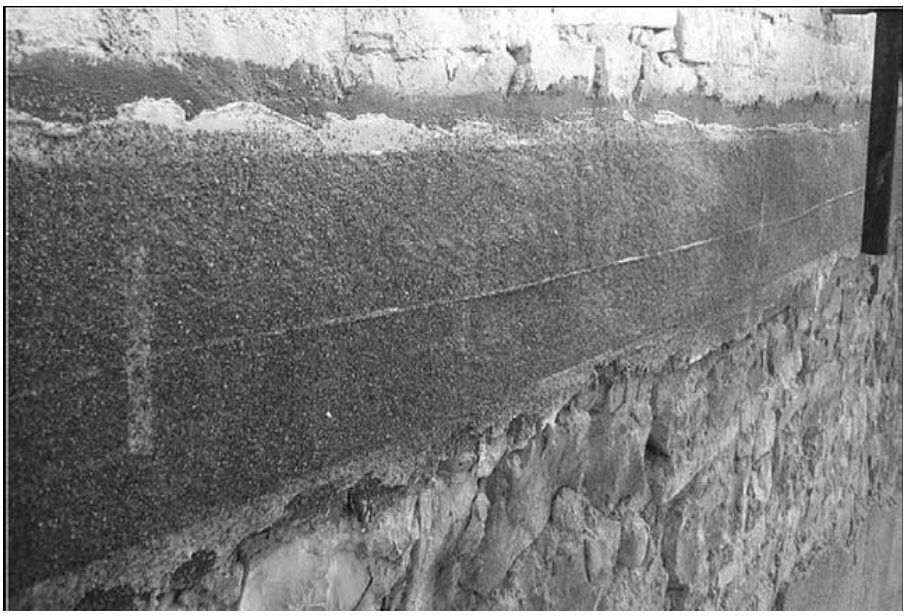
شکل ۲ - مراحل مختلف ارزیابی آسیب‌پذیری

۱۰. نمونه کارهای انجام شده

۱۰.۱. نمونه اجرایی مقاوم سازی ساختمان‌های بنایی بوسیله FRP

در ساختمان تاریخی پالازو المی در فولیجو ایتالیا که مر بوط به قرن ۱۶ می‌باشد، با توجه به آسیب‌های وارده در زلزله سال ۱۹۹۷ که صدمات شدیدی به ساختمان‌های این شهر وارد کرد، مسئولان بر آن شدند تا به مقاوم سازی این ساختمان که از مصالح بنایی ساخته شده بپردازند.

برای مقاوم سازی این ساختمان تکنیک مسلح کردن سازه بوسیله مسلح کننده خارجی پیشنهاد شد، که پس از بررسی‌های انجام شده استفاده از کامپوزیت‌های FRP به عنوان بهترین راهکار پذیرفته شد (شکل ۳). برای اطمینان از عملکرد کامپوزیت‌های FRP آزمایشات دینامیکی و استاتیکی بر روی آن انجام گرفت و عملکرد آن بوسیله سنسورهایی که بر روی سازه قرار داده شده بود بررسی شد، که نتایج قابل قبولی ارائه شد. [۷]



شکل ۳ – دیوار مقاوم‌سازی شده با صفحات FRP در ایتالیا

۱۰. ۲. نمونه آزمایشگاهی مقاوم سازی ساختمان‌های بنایی بوسیله FRP

در یکی از تحقیقات آزمایشگاهی در حال پیشرفت در دانشگاه آدلاید در آمریکا بر روی رفتار خمشی خارج از صفحه دیوارهای بنایی ۸ دیوار با مقیاس کامل (همراه با بازشو) تحت بارهای متناوب مورد آزمایش قرار گرفتند (شکل ۴).

در این تحقیق مقادیر مقاومت دیوارها ابتدا بدون مقاوم سازی و سپس با اضافه کردن نوارهای عمودی FRP به دیوار، اندازه‌گیری شدند، که با توجه به نتایج بدست آمده مشخص شد که با اضافه کردن نوارهای FRP مقاومت دیوار به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. [۸]

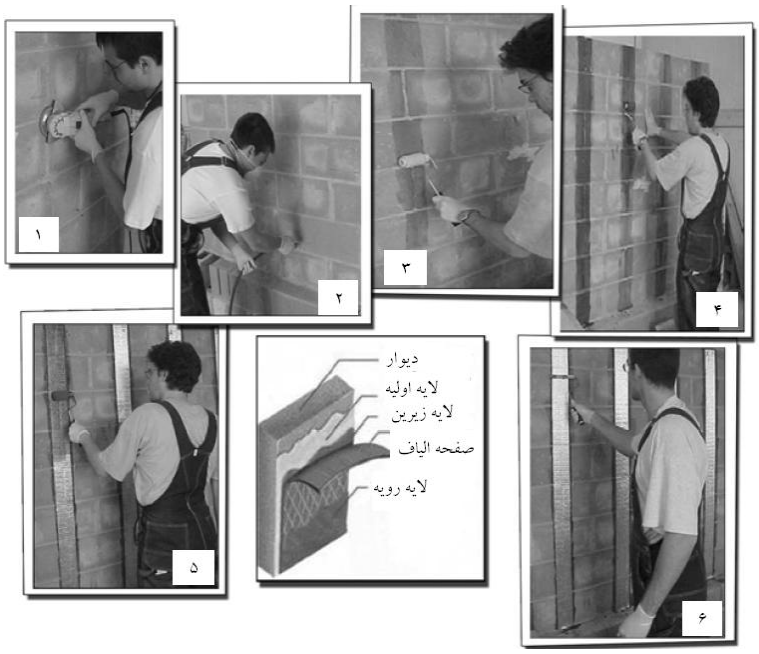
شکل ٤ – دیوار بنایی مقاوم‌سازی شده با نوارهای FRP در آمریکا

۱۱. اجرای مقاوم سازی و بهسازی توسط FRP

پس از طراحی و محاسبه ابعاد ورقه‌های FRP و همچنین فاصله این ورقه‌ها، مراحل اجرا و نصب به صورت زیر می‌باشد:

۱. صاف کردن سطح دیوار
۲. تمیز کردن سطح دیوار از گرد و خاک
۳. بتونه کردن دیوار
۴. آغشته کردن سطح مورد نظر با اپوکسی
۵. چسباندن ورق های FRP در محل های مشخص شده.
۶. پوشاندن ورق های FRP توسط لایه ای از چسب اپوکسی

البته FRP به صورت صفحات مشبک و همچنین رشته های در هم تابیده نیز جهت مقاوم سازی استفاده می‌شود که شکل کلی آن در تصاویر زیر آمده است. [۹]



شکل ۵ - مراحل نصب لایه FRP

۱۲. نتیجه‌گیری

بنا به آنچه که گفته شد و با توجه به خصوصیات و مزایای FRP، استفاده از ورق‌هایFRP گزینه مناسبی جهت بهسازی و مقاوم سازی دیوار بنایی می-باشد. سهولت استفاده، عدم نیاز به نیروی کار ماهر، سبکی و ضخامت کم آن را راهکار مناسبی جهت مقاوم سازی بدون برهم زدن عملکرد عادی فضا ساخته و به همین منظور مورد توجه معماران به ویژه در ترمیم و بهسازی بناهای قدیمی قرار گرفته است. با توجه به نتایج آزمایش‌ها رفتار دیوار در برابر بارهای درون صفحه‌ای و برون صفحه‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است.

۱۳. مراجع

۱. دکترعباسعلی تسنیمی (۱۳۸۰)، *"رفتار دیوار های آجری در استاندارد ۲۸۰۰"* ، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن.

۲. سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (۱۳۸۵)، *"دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود نشریه شماره ۳۶۰"*.

۳. آرگ مگردچیان (۱۳۸۵)، *"دینامیک سازه‌ها و مهندسی زلزله"* ، روزبهان،

۴. N. Galati (۲۰۰۵), *"Design Guidline for the Strengthening of Masonary Structure using FRP System"*, University of Missori-Rolla (UMR).

۵. سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور (۱۳۸۵)، *"راهنمای طراحی و ضوابط اجرایی بهسازی ساختمان‌های بتنی موجود با استفاده از مصالح تقویتی FRP"*.

۶. مرتضی گودرزی دهریزی (۱۳۸۶)، *"مقاوم سازی ساختمان‌های بنایی، روش‌های موجود و کاربرد آن (پایان‌نامه کارشناسی ارشد)"*.

۷. F. Bastianini, M. Corradi, A. Borri, A. Tommaso (۲۰۰۵), *"Retrofit and monitoring of an historical building using ''Smart'' CFRP with embedded fiber optic"*, Italy, Construction and Building Materials

۸. C.R. Willis, Q. Yang, R. Seracino, M.C. Griffith (۲۰۰۷), *"Damaged masonry walls in two-way bending retrofitted with vertical FRP strips"*, USA, Construction and Building Materials.

۹. Nanni (۲۰۰۵), *"Masonry Strengthening"*, USA, University of Missouri-Rolla (UMR).