

# بررسی آزمایشگاهی رفتار دیوارهای مصالح بنایی از بلوک‌های AAC تسلیح شده با میلگرد و الیاف بسیاری GFRP

اصغر وطنی اسکویی\* (دانشیار)

محمد مهدی ملاولی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

مهندسی عمران شریف، (پهار ۱۳۹۵)  
دوری ۲ - ۳۲، شماره ۱/۱، ص. ۳۳-۲۵

در این پژوهش رفتار دیوارهای تقویت شده از بلوک‌های بتن سبک اتوکلاوشده (AAC) با استفاده از آزمایش قطری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بر روی ۶ نمونه‌ی مقاومت برشی ملات ویژه، بیانگر بالاتر بودن مقاومت برشی ملات در مقایسه با رده‌ی AAC مورد استفاده بوده است و در آزمایش بارگذاری قطری، ۹ نمونه با ابعاد  $1200 \times 1200 \times 120$  میلی‌متر که شامل ۳ نمونه‌ی دیوار شاهد و ۳ نمونه‌ی تقویت شده با الیاف بسیاری و مقاوم سازی شده به صورت ضربدری و با عرض‌های مختلف  $100$  و  $200$  میلی‌متر بوده‌اند، موجب افزایش جذب انرژی به ترتیب  $12/9$  و  $21$  برابر شده‌اند؛ و ۳ نمونه‌ی دیگر نیز دیوارهای تسلیح شده با میلگرد بوده‌اند که مقاومت کشش قطری آن‌ها  $22\%$  و مقدار جذب انرژی شان  $28/2$  برابر افزایش یافته است.

واژگان کلیدی: AAC، آزمایش کشش قطری، ساختمان مصالح بنایی، دیوارهای تسلیح شده، FRP، مقاومت برشی ملات.

asvatani@gmail.com  
mmm.mollavali@gmail.com

## ۱. مقدمه

بتن سبک هوادار (AAC) محصولی است که از ترکیب ماسه‌ی کوارتزی، سیمان، آهک، و آب و پودر آلومینیوم که باعث ازدیاد حجم می‌شود، تشکیل شده است. از بلوک‌های بتن سبک هوادار (AAC) به عنوان سیستم سازه‌ی برای ساختمان‌های کوتاه‌مرتبه با این ویژگی‌ها استفاده می‌شود: [۱-۴]

-- چگالی خیلی کم در حدود  $450$  الی  $600$  کیلوگرم در هر مترمکعب، در رابطه با بتن معمولی که وزن مخصوصی معادل  $2500$  کیلوگرم در هر مترمکعب دارد، می‌تواند باعث حمل و نقل آسان و همچنین کاهش نیروی ناشی از زلزله در ساختمان‌هایی که از این محصول استفاده می‌کنند، شود.

-- وجود  $3$  الی  $90$  درصد حجم آن را حفره در بر می‌گیرد که در کنار کاهش وزن این محصول می‌تواند عایق صوتی و حرارتی مناسبی در مقایسه با بتن معمولی شود.

-- کارکردن با آن خیلی ساده است، به طوری که می‌توان با اهری معمولی و ابزار نجاری ساده آن را به شکل‌های مورد نظر بریده و در آورد، همچنین سوراخ‌کاری در آن نیز آسان است.

-- هرگونه ضایعاتی که در طول فرایند تولید این نوع بتن رخ دهد، مجدداً به خط تولید بر می‌گردد. هیچ‌گونه آلودگی در آب و هوا نیز رخ نخواهد داد. همچنین به علت

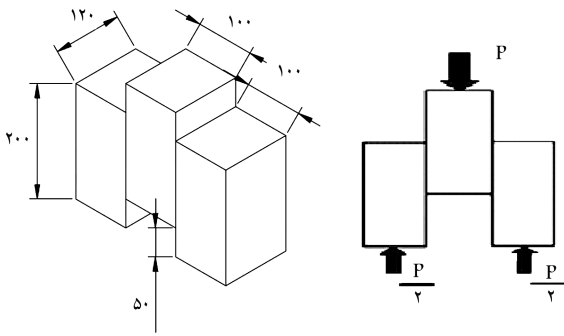
\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۷/۲۳، اصلاحیه ۱۳۹۲/۱۲/۲۴، پذیرش ۱۳۹۳/۳/۲۷.

نبود نخاله‌ی ساختمانی در پایان کار از این بلوک‌ها می‌توان به عنوان محصولی که با طبیعت سازگار است، را نام برد.

-- انرژی برای تولید اولیه‌ی این محصول خیلی کم است.

به دلیل ویژگی‌های بیان شده، امروزه بتن سبک هوادار اتوکلاوشده (AAC)<sup>۱</sup> به یکی از مصالح مناسب برای میانقاب‌های غیرسازه‌ی و دیوارهای باربر در ساختمان‌های با مصالح بنایی کوتاه مرتبه تبدیل شده است.<sup>[۵]</sup> با توجه به اینکه سبک‌سازی ساختمان و تقلیل بار مرده‌ی ناشی از وزن عناصر موجب کاهش نیروی ناشی از زلزله خواهد شد، دلیلی دیگر بر استفاده از محصولات بتن‌های سبک هوادار اتوکلاوشده (بلوک - پانل) در مناطق لرزه خیز شده است. جهت افزایش ظرفیت یک پارچگی دیوار روش‌های مختلفی از جمله استفاده از پانل‌های مسلح، که در کارخانه با استفاده از مش‌های فولادی تسلیح شده است،<sup>[۶-۱۱]</sup> را می‌توان شمرد. این مورد یک حالتی از دیوار با مصالح بنایی مسلح به حساب می‌آید. در این حالت علاوه بر خوردگی میلگردهای درون بتن با توجه به تفاوت ضریب کشسانی و مقاومت فولاد و بتن سبک هوادار، ممکن است ضعیفی در عملکرد سیستم از جمله لهدیگی در فصل مشترک بتن با میلگرد ایجاد و باعث لقی میلگردها شود. روش دیگری که رایج‌تر و نسبتاً ساده است، استفاده از کلاف‌های افقی و قائم بتن مسلح است.<sup>[۱۲، ۱۳]</sup> در این حالت باید سطح بلوک‌های بتن سبک هوادار کاملاً اشباع شود تا با مکش آب کلاف، باعث تضعیف مقاومت بتن کلاف نشود. در غیر این صورت



شکل ۱. ابعاد و نحوه بارگذاری در آزمایش مقاومت برشی ملات.

جدول ۲. مقاومت برشی به دست آمده برای ملات.

شماره نمونه	بار نهایی وارده (kg)	مقاومت برشی ملات (MPa)
میانگین ۳ نمونه	۲۷۴۰	۰٫۷۴۲

شکل ۱ ارائه شده است. آزمایش‌ها بر روی ۳ نمونه انجام و میانگین نتایج حاصل از آزمایش بر روی ۳ نمونه ملات مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

### ۲.۳. آزمایش کشش قطری دیوار مصالح بنایی AAC

پس از انجام آزمایش مقاومت برشی بر روی ملات، آزمایش مقاومت کشش قطری دیوارهای مصالح بنایی AAC مورد بررسی قرار گرفته است. در این آزمایش مقاومت برشی یا کشش قطری یک قطعه  $1200 \times 1200 \times 250$  میلی‌متر توسط اعمال بار فشاری در طول قطر المان تعیین شده است.<sup>[۲۳،۲۴]</sup>

مدول برشی دیوار مصالح بنایی براساس ASTM E ۵۱۹<sup>[۲۴]</sup> از روابط ۲ و ۳ قابل محاسبه است:

$$S_s = 0.707P/A_n \quad (2)$$

$$A_n = ((W + h)/2)t \quad (3)$$

که در آن،  $S_s$  تنش برشی در سطح خالص (MPa)،  $P$  بار اعمالی (N)،  $A_n$  سطح مقطع دیوار ( $\text{mm}^2$ )،  $W$  عرض نمونه (mm)،  $h$  ارتفاع نمونه (mm)،  $t$  ضخامت نمونه (mm)،  $n$  درصدی از سطح واحد مصالح توپر است و کرنش برشی از رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$\gamma = (\Delta V + \Delta H)/g \quad (4)$$

که در آن،  $\gamma$  کرنش برشی (mm/mm)،  $\Delta V$  کاهش طول قطر قائم (mm)،  $\Delta H$  افزایش طول قطر افقی (mm)،  $g$  و نیز طول گیج قائم (mm) است. مدول برشی نیز از رابطه ۵ به دست می‌آید:

$$G = S_s/\gamma \quad (5)$$

که در آن،  $G$  مدول برشی است.<sup>[۲۴،۲۵]</sup> شکل ۲، نحوه انجام آزمایش کشش قطری را نشان می‌دهد، که در آن دیوارها با ضخامت  $t = 250$  mm طوری انتخاب شده‌اند که مقدار مذکور برای ضخامت با مقدار پیشنهادی شرکت hebel برای دیوار  $2750$  میلی‌متری همخوانی داشته باشد.<sup>[۲]</sup> بلوک‌های مورد استفاده به ابعاد  $600 \times 250 \times 200$  میلی‌متر بوده‌اند. ملات بندها ۲ تا ۳ میلی‌متر ضخامت

نایبوستگی در فصل مشترک بلوک با کلاف ایجاد می‌شود. در سال‌های اخیر، استفاده از الیاف در داخل بلوک‌ها می‌تواند ظرفیت باربری و تغییرشکل نمونه‌ها را افزایش دهد.<sup>[۱۵،۱۴]</sup> گرچه استفاده از الیاف می‌تواند هنگامی که بلوک‌ها بریده و به قطعات تقسیم می‌شوند، را با مشکل روبرو سازد و همچنین خاصیت عایق بودن حرارتی و صوتی بلوک‌ها را کاهش دهد، استفاده از الیاف بسیاری همچون CFRP و GFRP می‌تواند ظرفیت باربری سیستم‌های متشکل از بلوک‌های بتن سبک هوادار را افزایش دهد.<sup>[۱۹-۱۶]</sup> در بیشتر موارد با استفاده از الیاف به تقویت خمشی تیرهای ساخته شده از بلوک‌های بتن‌های سبک هوادار پرداخته شده و تاکنون تقویت دیوار توسط الیاف بسیاری در مراجع جهانی مشاهده نشده است. مورد دیگر، استفاده از میلگرد برای تقویت دیوارهای بتنی است، که در محل اجرای ساختمان طبق معیارهای مبحث هشتم مقررات ملی<sup>[۲۰]</sup> با ایجاد حفره در بلوک‌های بتنی سبک هوادار<sup>[۲۱]</sup> سعی در تقویت ساختمان‌های با مصالحی بنایی ساخته شده از این نوع بتن‌ها می‌شود. گرچه با تعبیه‌ی شیار و نصب میلگرد در محل درزها و یا تغییر در نوع پیوند در بند دیوارها<sup>[۲۲]</sup> می‌تواند در عملکرد دیوارها مؤثر باشد.

## ۲. طراحی ساختمان مصالح بنایی AAC

در طراحی دیوارهای مصالح بنایی، بعضی از تولیدکنندگان AAC به منظور ساده‌تر کردن طراحی، توصیه‌هایی از قبیل اینکه: ارتفاع ساختمان‌ها باید کمتر از ۲۰ متر و بار زنده کمتر از  $5 \text{ kN/m}^2$  باشد؛ بیشینه دهانه‌ی مؤثر دال‌ها باید ۶ متر باشد؛ همچنین کمینه ضخامت دیوارهای باربر با ارتفاع بیش از  $2750 \text{ mm}$  باید بزرگ‌تر از  $250 \text{ mm}$  باشد؛ و تنش فشاری مجاز  $\sigma_{perm}$  در دیوارها بیشینه مقدار به دست آمده در رابطه ۱ باشد، ارائه کرده‌اند:<sup>[۲]</sup>

$$\sigma_{perm} = k\sigma_0 \quad (1)$$

که در آن،  $\sigma_0$  مقدار تنش پایه‌ی مجاز و  $k$  ضریب کاهشدهنده است.<sup>[۲]</sup> بلوک‌های AAC براساس ASTM در ۳ رده مطابق جدول ۱ تقسیم می‌شوند،<sup>[۲۳]</sup> که مقدار  $\sigma_0$  نیز برای هر رده متفاوت است. مقدار  $k$  نیز وابسته به این سه عامل است: ۱. دیوار یا جرز پایه‌ی بودن؛ ۲. لاغری دیوار (طول و ضخامت کمناش)؛ ۳. لنگر خمشی حاصل از طول دهانه‌ی سقف است.<sup>[۲]</sup>

## ۳. جزئیات و برپایی انجام آزمایش

### ۳.۱. آزمایش مقاومت برشی ملات

در این پژوهش، آزمایش مقاومت برشی ملات با بندهای نازک براساس روند پیشنهادی Tanner و ACI 523<sup>[۲۶]</sup> با چسباندن ۳ قطعه بلوک ساخته شده با ملات به ضخامت ۲ الی ۳ میلی‌متر انجام شده است، که روند بارگذاری و ابعاد نمونه‌ی آزمایش شده در

جدول ۱. مقدار پایه‌ی تنش پایه‌ی مجاز  $\sigma_0$ .<sup>[۲۳،۲۴]</sup>

رده‌ی مقاومتی	میانگین مقاومت فشاری (MPa)	$\sigma_0$ (MPa)
AAC-G2	۲٫۵	۰٫۶
AAC-G4	۵	۱٫۱
AAC-G6	۷٫۵	۱٫۵

### ۳.۳. آزمایش کشش قطری دیوارهای تسلیح شده

پس از بررسی‌ها و تطابق‌های شرایط بلوک‌های AAC و ضخامت در حد ۲ الی ۳ میلی‌متر بندهای ملات، باید شرایطی مشابه با میجث هشتم مقررات ملی ایجاد کرد. لذا ۳ نمونه دیوار تسلیح شده با ویژگی‌های یکسان برای آزمایش ساخته شده است. به همین منظور ۳ رشته مفتول به قطر ۳ میلی‌متر جهت پیوند دادن میلگردها، معادل با میلگردهای نمره ۶ در میجث هشتم مقررات ملی ساختمان ایران،<sup>[۲۵]</sup> در کلیه‌ی بندهای افقی با فاصله‌ی ۲۰۰ mm از یکدیگر قرار داده شده است، به طوری که از نظر سطح مقطع تقریباً معادل میلگرد نمره ۶ با فاصله‌ی ۲۵۰ mm در ساختمان آجری بوده‌اند. از طرفی ضخامت بندها، محدودیت ۲ تا ۳ میلی‌متری داشته‌اند، به همین دلیل از ۳ رشته مفتول نمره ۳ استفاده شده است، به طوری که طول مفتول‌ها ۱٫۵ متر تا دست‌کم ۲۰۰ میلی‌متر در درون سوراخ‌ها کاملاً با گروت درگیر شود، اما چون بهتر است که مشخصات مکانیکی میلگرد و مفتول با هم معادل باشد، لذا در حفره‌های هم‌مرکز، یک عدد میلگرد نمره ۱۰ آج دار استفاده و در پایان گروت‌ریزی شده است. در شکل ۳، مشخصات دیوار تسلیح شده با روش مذکور و در شکل ۴، نحوه‌ی اجرای آن نشان داده شده است.

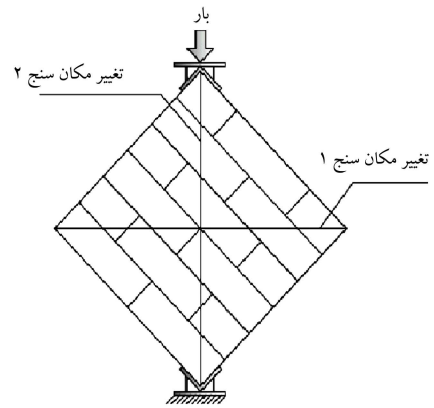
مشخصات مصالح مورد استفاده در ساخت این دیوارها شامل مقاومت فشاری بلوک، ملات، و گروت، و همچنین مقاومت کششی تسلیم میلگرد و مقاومت نهایی مفتول مورد استفاده در آزمایش‌ها در جدول ۳ ارائه شده است. ابعاد نمونه‌های بتن در این آزمایش‌ها براساس ASTM C۱۳۸۶،<sup>[۲۳]</sup> و ملات و گروت براساس ASTM C۱۰۹.<sup>[۲۶]</sup> انجام شده و میانگین مقاومت، براساس آزمایش بر روی ۳ نمونه بوده است.

### ۴.۳. آزمایش دیوارهای مقاوم‌سازی شده با FRP

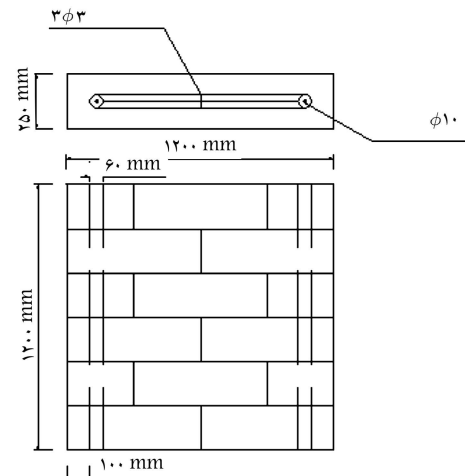
نمونه‌های انتخاب شده جهت آزمایش مقاومت کشش قطری شامل دو نمونه‌ی مقاوم‌سازی شده با FRP از الیاف شیشه (GFRP) با پهنای ۱۰۰ mm و با پهنای ۲۰۰ mm، که به صورت ضرب‌دری مطابق شکل‌های ۵ و ۶ بر روی دیوار

جدول ۳. مشخصات مصالح مورد استفاده در نمونه‌ی دیوارها.

مقدار	مشخصه
۳٫۲ MPa	مقاومت فشاری بتن بلوک AAC
۱۲ MPa	مقاومت فشاری ملات
۴۸ MPa	مقاومت فشاری گروت
۳۴۰ MPa	مقاومت تسلیم کششی میلگرد $f_y$
۳۶۰ MPa	مقاومت کششی نهایی مفتول
۲۳ GPa	مدول کشسانی الیاف شیشه
۰٫۲۳ mm	ضخامت



شکل ۲. نحوه‌ی انجام آزمایش کشش قطری.



شکل ۳. مشخصات و موقعیت حفره‌ها در دیوارهای تسلیح شده.

داشته و کلیه‌ی بندهای قائم و افقی پُر و با بندکش ۲ میلی‌متری بندکشی شده‌اند. وسایل اندازه‌گیری مورد استفاده در آزمایش شامل دو عدد تغییرمکان‌سنج (LVDT) در راستای دو قطر قائم و افقی؛ دو عدد کرنش‌سنج<sup>۲</sup> در نقطه‌ی تلاقی دو قطر (به عنوان نقطه‌ی با بیشترین تنش)؛ و یک عدد نیروسنج<sup>۳</sup> قرارگرفته در راستای بارگذاری موردنظر بوده است. مقاومت برشی دیوارها از رابطه‌ی ۶ تعیین شده است:<sup>[۷]</sup>

$$F_{vAAC} = 0.15F'_{AAC} \quad (6)$$

که در آن،  $F_{vAAC}$  MPa مقاومت برشی دیوار ساخته شده از AAC و MPa  $F'_{AAC}$  مقاومت فشاری AAC است.



شکل ۴. نحوه‌ی تسلیح عمودی و افقی دیوارها.

جدول ۴. مقاومت برشی دیوارها از رده‌های مختلف AAC.

میانگین مقاومت برشی (MPa)	میانگین مقاومت فشاری (MPa)	رده‌ی مقاومتی
۰٫۳۷۵	۲٫۵	AAC-G۲
۰٫۷۵	۵	AAC-G۴
۱٫۱۲۵	۷٫۵	AAC-G۶

رده‌ی AAC-G۲ فرض کرد:

$$V = F \cos 45 \quad (۸)$$

$$F_v = V/A \quad (۹)$$

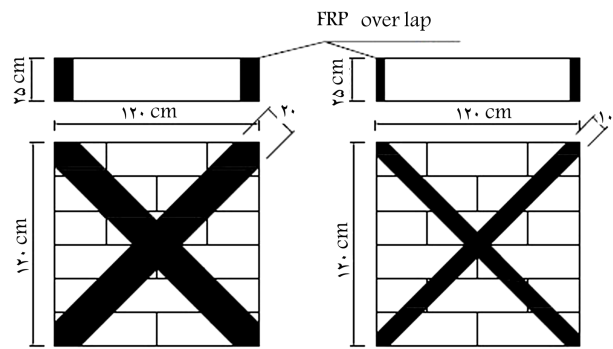
که در آن،  $F_r$  (MPa) بیشترین مقاومت برشی قابل تحمل دیوار و  $A$  mm<sup>۲</sup> سطح مقطع دیوار است.<sup>[۲۶]</sup> با توجه به اینکه ملات طبق آزمایش‌های انجام‌شده (جدول ۴)، مقاومت برشی بیشتری نسبت به دیوارهای ساخته‌شده از بتن سبک هوادار AAC با مقاومت فشاری رده‌ی ۲٫۵ MPa درج‌شده در جدول ۴ دارد، در نتیجه رفتار دیوار توسط نیرو کنترل‌شده و مدهای شکست کشش قطری و فشاری در پنجه حاکم است، و بیشترین تنش‌های به‌وجودآمده در پژوهش‌های این آزمایش بر روی دیوار مصالح بنایی صورت گرفته است.<sup>[۲۲]</sup> یا در نقطه‌ی تلاقی دو قطر تنش‌ها بیشینه است و یا در پنجه‌ها بیشترین مقدار را دارد. بنابراین لغزشی در درز ملات و حرکت گهواره‌یی کنترل‌شونده توسط تغییرشکل رخ نمی‌دهد.<sup>[۲۰]</sup>

ابتدا ۳ نمونه‌ی دیوارهای شاهد مورد آزمایش کشش قطری قرار گرفتند و به صورت WALL۱، WALL۲ و WALL۳ نام‌گذاری شدند. مکانیزم رخداد آسیب به صورت کشش قطری بوده است، که در شکل ۷ نمایش داده شده است.

مکانیزم شکست در دیوارهای شاهد شامل این موارد است: ۱. پیدایش ترک در راستای اعمال نیرو؛ ۲. ایجاد ترک‌های ریز در نزدیکی تکیه‌گاه (فشار در پنجه) و داشتن تلاقی با ترک حاصل در راستای اعمال نیرو؛ ۳. شکست آبی همراه با تخریب دیوار و برش در امتداد نیرو و به طور قابل ملاحظه‌یی هم‌زمان با شکست در پنجه در نمونه‌ی تقویتی با الیاف بسیاری ۲۰۰ mm و یکی از نمونه‌های ۱۰۰ میلی‌متری بوده است؛ ۴. خرابی‌ها به صورت یکسان در هر دو طرف نمونه‌های دیوارهای تسلیح‌شده با میلگرد با نام‌گذاری‌های W-R-۱، W-R-۲ و W-R-۳ صورت گرفته است.

شکل ۸. شکست نمونه‌های دیوارهای تسلیح‌شده را تحت بارگذاری کشش قطری نشان می‌دهد. موارد قابل مشاهده در شکست دیوارهای تسلیح‌شده شامل این موارد است: ۱. پیدایش ترک‌هایی در راستای موازی با اعمال نیرو و ترک به صورت منحنی؛ ۲. شکست آبی و آغاز ترک از بالا به پایین و رسیدن به شکست نهایی در نمونه و امکان ادامه‌ی بارگذاری و شکل‌پذیری در حد گسیختگی مفتول‌ها در کلیه‌ی بندها، رسیدن به فروریزش تغییرشکل گسیختگی و ادامه‌ی خاصیت شکل‌پذیری؛ ۳. گسیختگی مفتول‌ها در نقاطی از بندهای میانی به دلیل رخداد تنش بیشینه در محل تلاقی قطرها دیوارهای ساخته‌شده از بتن سبک هوادار؛ ۴. رسیدن میلگردها به حد گسیختگی به دلیل به‌وجود نیامدن ترک و شکست قابل توجه در گروت و عدم لغزش میلگرد در آن.

نمونه‌های مقاوم سازی شده با FRP به عرض ۱۰۰ میلی‌متر با نام‌های W-F-۱۰-۱ و W-F-۱۰-۲ و نمونه با FRP به عرض ۲۰۰ میلی‌متر با نام W-F-۲۰ مورد بارگذاری قرار گرفته‌اند. به‌طور کلی موارد قابل مشاهده در شکست دیوارهای مقاوم‌سازی شده با FRP شامل این موارد است (شکل ۹): ۱. کنده شدن



شکل ۵. ابعاد و نحوه‌ی استقرار FRP.



شکل ۶. نمونه‌ی دیوارهای مقاوم‌سازی شده با الیاف پلیمری.

قرار گرفته بودند، بوده است. انتخاب ابعاد مذکور نمونه‌های FRP به دلیل استفاده از روابط ۸ و ۹ و با فرض بار بیشینه‌ی ظرفیت دیوار و با در نظر گرفتن ضریب رفتار ۱٫۵ برای سازه‌های مذکور بوده است.<sup>[۲۷]</sup> گرچه ضریب رفتار سیستم پس از تقویت، حدود ۲ به دست آمده است. چسباندن این نمونه‌ها به کمک چسب اپوکسی صورت گرفته است و نوارهای GFRP از دو طرف به دیوار چسبانده شده‌اند، به طوری که کمینه‌ی ۱۰۰ میلی‌متر هم‌پوشانی داشته باشند. کرنش مؤثر GFRP برابر ۰٫۰۰۲ است.<sup>[۲۷]</sup> که با توجه به استفاده از کرنش سنج در نقطه‌ی تلاقی دو قطر قابل ثبت است. با توجه به میانگین آزمایش‌های صورت‌گرفته، نیروی جانبی دیوار تقویت شده با الیاف پلیمری برابر با ۱۳۹٫۳ kN است. مقدار مقاومت برشی ( $V$ ) دیوار از رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شود:<sup>[۲۸]</sup>

$$V = V_m + V_{FRP} \quad (۷)$$

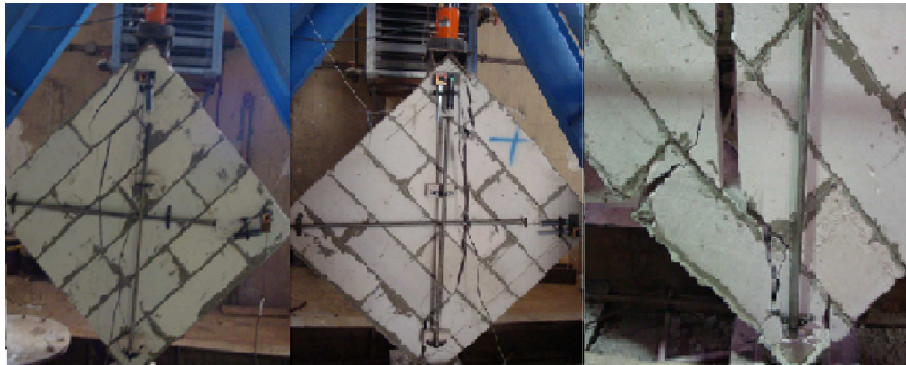
که در آن،  $V_m$  مقاومت برشی دیوار و  $V_{FRP}$  مقاومت برشی FRP مورد نظر است.

#### ۴. بررسی نتایج آزمایش‌ها

نتایج حاصل از رابطه‌ی ۷ بر روی رده‌های مختلف مقاومتی دیوارهای ساخته‌شده از بلوک‌های AAC در جدول ۴ ارائه شده است. با استفاده از روابط ۸ و ۹ تنش‌ی برشی برابر با ۰٫۴۶۴ MPa به دست آمده است، که با در نظر گرفتن معیار مقاومتی ارائه‌شده در جدول ۴ می‌توان آن‌ها را در



شکل ۷. نحوه‌ی شکست در نمونه‌ی دیوارهای مورد آزمایش کشش قطری.



شکل ۸. نحوه‌ی شکست نمونه‌های با تسلیح‌شده تحت بارگذاری قطری.



شکل ۹. نحوه‌ی شکست نمونه‌های تقویت‌شده با FRP.

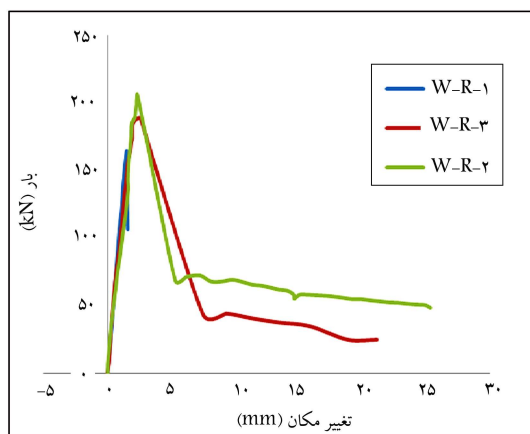
رده‌های مقاومت برشی ملات، احتمال تمام مودهای شکست وجود داشته باشد. منحنی‌های نیرو - تغییرمکان افقی و قائم مربوط به دیوارهای تسلیح‌شده در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ و منحنی‌های نیرو - تغییرمکان افقی و قائم مربوط به دیوارهای مقاوم‌سازی‌شده با FRP در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده است. به دلیل مشابه بودن کرنش در نقطه‌ی تلاقی قطره‌های افقی و قائم دیوارها، معمولاً به دلیل ثابت بودن مقاومت مجاز مصالح، سعی در ارائه‌ی نمودار بارکرنش در تلاقی دو قطر در راستای قائم و افقی دیوارهای شاهد و نیز ورق FRP به عرض ۱۰۰ میلی‌متر در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ شده است.

با توجه به عملکرد دیوارهای شاهد می‌توان مشاهده کرد که محدوده‌ی شکل‌پذیری این دیوارها بسیار کم است و دیوارهای تسلیح‌شده و مقاوم‌سازی‌شده با FRP به عرض‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی‌متری شکل‌پذیری مناسبی از خود نشان داده‌اند؛ اما در دیوارهای تسلیح‌شده و مقاوم‌سازی‌شده با FRP به عرض ۱۰۰ میلی‌متر، این افزایش شکل‌پذیری به دلیل کم‌بودن عرض آن تغییر چندانی در مقاومت حاصل

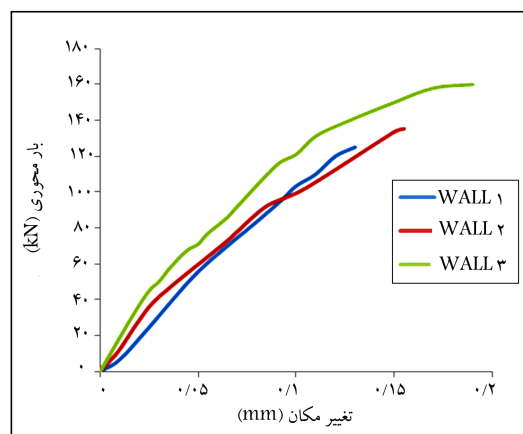
و گمانه‌کردن FRP در قطر فشاری؛ ۲. کنده‌شدن FRP قطرکششی همراه با ایجاد ترک در راستای مورب و حدود ۴۵ درجه با راستای اعمال نیرو و ترک به شکل منحنی در بعضی قسمت‌ها؛ ۳. نرسیدن به شکست نهایی در نمونه و شکل‌پذیری در آن و کنده‌نشدن FRP از انتهای گوشه‌ها.

منحنی نیرو-تغییرمکان افقی و قائم مربوط به دیوارهای شاهد در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود. در دیوارهای شاهد، منحنی بار-تغییرمکان سیستم فاقد محدوده‌ی شکل‌پذیری قابل توجه است، که این امر به دلیل تردی مصالح و کم‌بودن خاصیت شکل‌پذیری در AAC است. با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده بر روی دیوارهای شاهد مشاهده می‌شود که ضریب شکل‌پذیری تغییرمکانی دیوارهای شاهد بسیار کم و در حد ۱ است و گسیختگی کامل این دیوارها در لحظه‌ی رسیدن به آخرین حد ارتجاعی و نمودار بار - تغییرمکان آنها عدم وجود شکل‌پذیری قابل ملاحظه در این دیوارها را تأیید می‌کند. پیش‌بینی می‌شود در صورتی که دیوار ساخته‌شده از AAC با رده‌های مقاومتی بالاتر باشند، به دلیل نزدیک بودن مقاومت برشی دیوار به آن

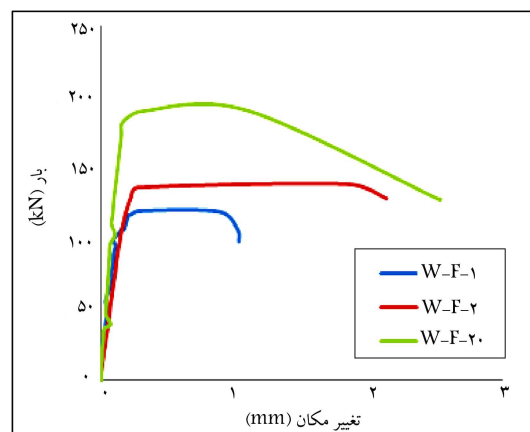




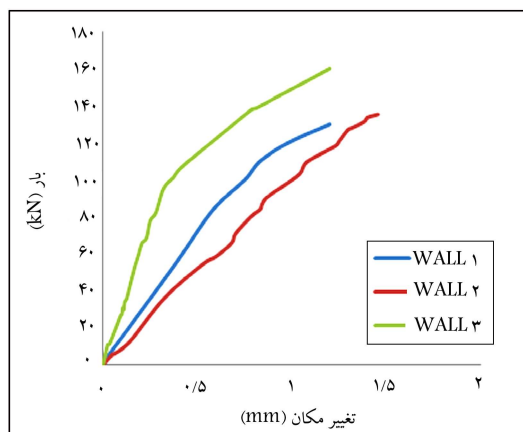
شکل ۱۳. نمودار نیرو - تغییر مکان قائم دیوارهای تسلیح شده.



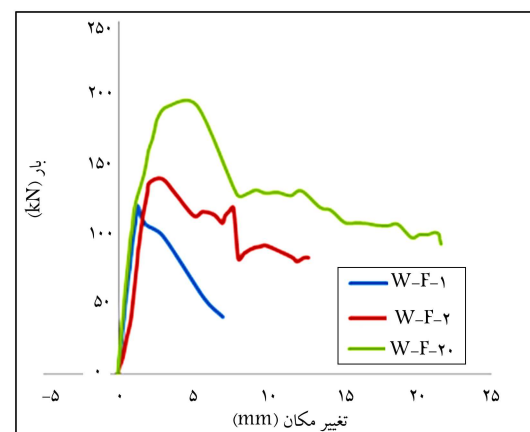
شکل ۱۰. نمودار نیرو - تغییر مکان افقی دیوارهای شاهد.



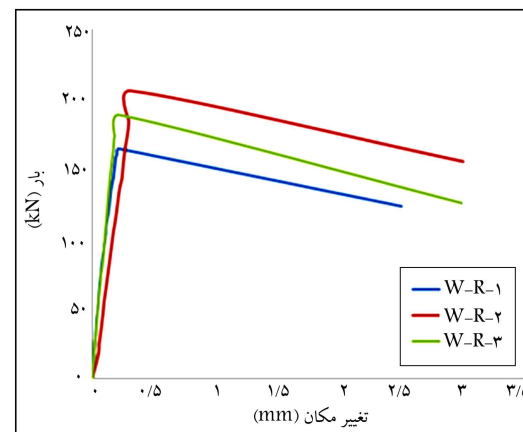
شکل ۱۴. نمودار نیرو - تغییر مکان افقی دیوار مقاوم سازی شده با FRP.



شکل ۱۱. نمودار نیرو - تغییر مکان قائم دیوارهای شاهد.



شکل ۱۵. نمودار نیرو - تغییر مکان قائم دیوار مقاوم سازی شده با FRP.

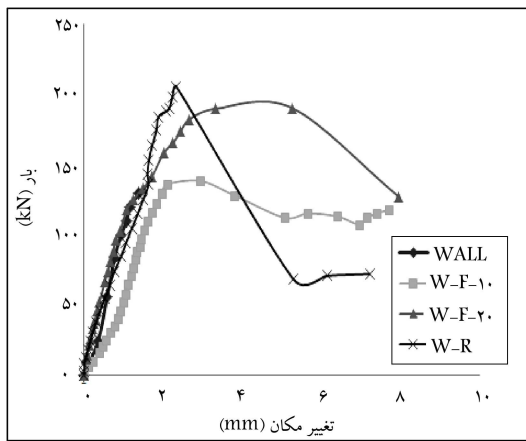


شکل ۱۲. نمودار نیرو - تغییر مکان افقی دیوارهای تسلیح شده.

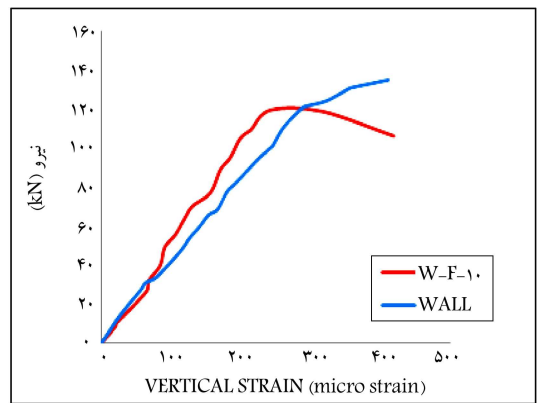
جدول ۵. مقادیر میانگین نسبت‌ها برای نتایج آزمایش دیوارها.

نمونه	$\Delta h / \Delta h_y$	$\Delta v / \Delta v_y$
WALL <sub>۱,۲,۳</sub> (avg)	۵٫۸	۳٫۷۶
W-f-۱° (avg)	۳۳	۱۷٫۲
W-f-۲°	۵۷٫۵	۴۵
W-R (avg)	۵۳	۴۱٫۵

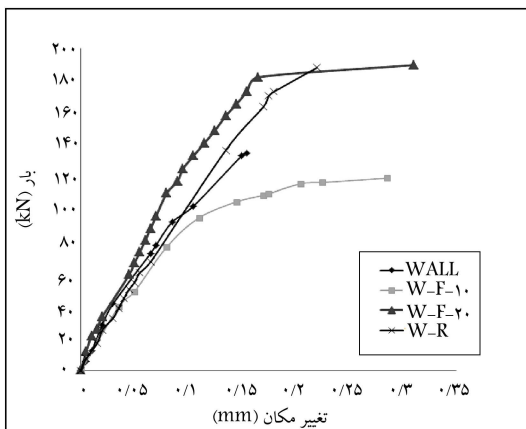
نکرده است، به طوری که می‌توان گفت این مقدار FRP برای افزایش مقاومت کافی نیست، ولی در جذب انرژی بارهای وارده می‌تواند مؤثر باشد. برای بررسی بیشتر موضوع شکل پذیری، در جدول ۵ مقایسه‌یی از نسبت تغییر شکل‌های نهایی به تغییر شکل‌های معادل ۳۰٪ مقاومت نهایی، که می‌تواند معیاری برای شکل پذیری باشد، ارائه شده است؛ که در آن،  $\Delta h$  تغییر مکان راستای افقی براساس عرض ترک و تغییر طول قطر،  $\Delta h_y$  تغییر مکان معادل ۳۰٪ مقاومت نهایی معادل تغییر مکان تسلیم راستای افقی است.  $\Delta v$  تغییر مکان راستای قائم براساس عرض ترک و



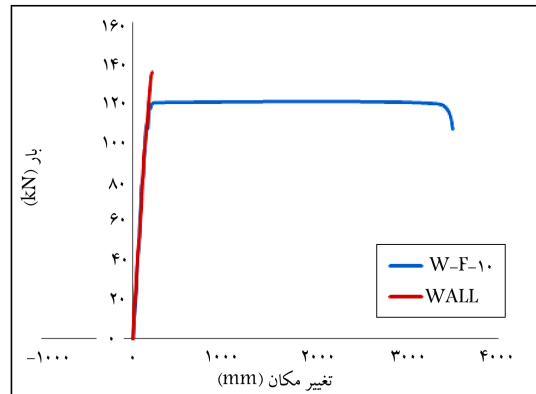
شکل ۱۸. نمودار مقایسه‌ی سختی و مقاومت در قطر افقی دیوارها.



شکل ۱۶. نمودار نیرو- کرنش قائم در تلاقی دو قطر دیوارهای شاهد و FRP به عرض ۱۰ میلی‌متر.



شکل ۱۹. نمودار مقایسه‌ی سختی و مقاومت در قطر قائم دیوارها.



شکل ۱۷. نمودار نیرو- کرنش افقی در تلاقی دو قطر دیوارهای شاهد و FRP به عرض ۱۰ میلی‌متر.

W-F-۲۰ نمودار دیوار با FRP به عرض ۲۰ میلی‌متر و W-R نمودار دیوار تسلیح شده است.

در مقایسه‌ی آزمایش کشش قطری دیوارهای شاهد و تسلیح شده ملاحظه می‌شود که مقدار مقاومت با توجه به مقادیر میانگین مقاومتی دیوارهای تسلیح شده، ۱۸۶ kN است، که معادل ۳۳/۵ درصد افزایش مقاومت از خود نشان داده‌اند، و سختی اولیه به میزان ۹ و ۱۳ درصد در قطرهای قائم و افقی کاهش و مدول برشی دیوار نیز کاهش یافته است. در بررسی شکل پذیری نیز با توجه به رابطه‌ی ۹، که در آن کمینه‌ی نسبت تغییرمکان قبل از فروریزش به تغییرمکان در راستای قطر فشاری برابر ۱۲ یعنی به حدود ۱۲ برابر دیوارهای شاهد و در راستای قطر کششی به مقدار بسیار قابل ملاحظه‌ی افزایش یافته است، تا جایی که عرض ترک به ۲۲ mm و بیشتر قابل افزایش است. البته اگر این تغییرمکان را به عنوان معیار و ضریبی برای شکل پذیری در نظر بگیریم، مقدار شکل پذیری به میزان بسیار زیادی افزایش یافته است. میزان جذب انرژی که با توجه به سطح زیر منحنی به مقدار  $2877/8 \text{ N.m}$  رسیده است، حدود ۲۸ برابر افزایش داشته است. بیشترین کرنش در راستای قائم در تلاقی دو قطر دیوارهای شاهد در لحظه‌ی گسیختگی  $41 \times 10^{-5}$  و در راستای افقی در تلاقی دو قطر  $21 \times 10^{-5}$  است.

در مقایسه‌ی آزمایش کشش قطری دیوارهای شاهد و مقاوم‌سازی شده با FRP ملاحظه می‌شود که مقدار مقاومت با توجه به مقادیر میانگین مقاومتی دیوارهای تسلیح شده در دیوارهای مقاوم‌سازی شده با FRP به عرض ۱۰ میلی‌متر تغییر

تغییر طول قطر،  $\Delta_{vy}$  تغییرمکان معادل ۳٪ مقاومت نهایی معادل تغییرمکان تسلیم راستای قائم است، که برای  $WALL_{1,2,3} (avg)$  یعنی میانگین ۳ نمونه‌ی دیوار شاهد و  $W-f-10 (avg)$  یعنی میانگین ۲ نمونه‌ی دیوار مقاوم‌سازی شده با FRP به عرض ۱۰ میلی‌متر و  $W-f-20$  نمونه‌ی دیوار مقاوم‌سازی شده با FRP به عرض ۲۰ میلی‌متری و  $W-R (avg)$  میانگین ۳ نمونه‌ی دیوار تسلیح شده است.

به علت زود کنده شدن FRP در قسمت هم‌پوشانی گوشه‌ها در نمونه‌ی W-F-۱۰-۱، که باعث کاهش جذب انرژی آن نمونه شده است، به نظر می‌رسد که در صورت افزایش طول هم‌پوشانی نتایج به هم نزدیک می‌شود.

مقادیر جدول ۶، برای مقاومت و سختی و سایر مشخصات به دست آمده در راستای قطرهای دیوارهاست، که بخش عمده‌ی نتایج آزمایش‌ها را شامل می‌شود. جدول ۷، میانگین نتایج حاصل دیوارها را نشان می‌دهد، که خلاصه‌ی نتایج حاصل از آزمایش‌هاست، که در آنها  $F_v$  بار وارده‌ی نهایی وارد بر نمونه‌ها،  $G$  مدول برشی حاصل از آزمایش،  $Q$  مجموع جذب انرژی در قطرها،  $k_{IC}$  سختی اولیه در قطر فشاری،  $k_{IE}$  سختی اولیه در قطر کششی،  $\Delta_{IE}$  تغییرمکان راستای قائم براساس عرض ترک و تغییر طول قطر،  $\Delta_{vy}$  تغییرمکان راستای افقی است.

در شکل‌های ۱۸ و ۱۹، مقایسه‌ی نتایج سختی و مقاومت دیوارها به ترتیب در راستای قطرهای افقی و قائم به طور کلی نشان داده شده است، که در آن‌ها WALL نمودار دیوار شاهد و W-F-۱۰ نمودار دیوار با FRP به عرض ۱۰ میلی‌متر و

جدول ۶. مقادیر نتایج به دست آمده برای دیوارها.

نمونه	$F_v$ (kN)	$G$ (Mpa)	$Q$ (N.m)	$k_C$ (kN/mm)	$k_t$ (kN/mm)	$\Delta_h$ (mm)	$\Delta_v$ (mm)
WALL <sub>1</sub>	۱۲۳	۴۶۳/۵۶	۱۰۲/۵	۹۷/۸۸	۱۱۷۸	۰/۱۳	۱/۲
WALL <sub>2</sub>	۱۳۵	۳۱۸/۸۵	۱۰۱	۱۱۴	۱۲۴۲	۰/۱۵	۱/۴
WALL <sub>3</sub>	۱۶۰	۵۰۴/۳۲	۱۱۲	۱۴۸	۱۳۲۹	۰/۱۷۵	۱/۴۶
W-f-۱۰-۱	۱۱۸/۹	۲۸۰	۶۴۲/۸	۱۰۱/۵	۱۱۳۱	۱/۰۳	۷
W-f-۱۰-۲	۱۳۸/۵	۲۲۰	۱۹۶۴	۴۹/۶۲	۷۰۶	۲/۱۳۵	۱۲/۷۲
W-f-۲۰	۱۹۰/۲	۲۴۰	۳۱۶۱/۷	۱۲۶/۸	۱۳۲۴	۲/۵۳	۲۱/۵۸
W-R-۱	۱۶۴/۲	۳۶۴/۶	۱۷۴۱	۱۰۸	۱۱۱۵/۵	۱۵	۱/۵۸
W-R-۲	۱۸۸/۲	۲۵۴/۹	۳۲۳۲	۱۰۶	۱۰۹۸	۲۲	۲۵/۳
W-R-۳	۲۰۵/۵	۲۹۵/۳	۳۶۶۰	۱۱۶	۱۱۰۷/۲	۱۷	۲۱/۱۱

جدول ۷. مقادیر میانگین برای نتایج آزمایش دیوارها.

نمونه	$F_v$ (kN)	$G$ (Mpa)	$Q$ (N.m)	$k_C$ (kN/mm)	$k_t$ (kN/mm)	$\Delta_h$ (mm)	$\Delta_v$ (mm)
WALL <sub>1,2,3</sub> (avg)	۱۳۹/۳۳	۴۲۸/۹۱	۱۰۵/۱	۱۱۹/۹۶	۱۲۴۹/۶۶	۰/۱۵۱	۱/۳۵
W-f-۱۰ (avg)	۱۲۸/۷	۲۵۰	۱۳۰۳	۷۵/۵۶	۹۱۸/۵	۱/۵۸	۹/۸۶
W-f-۲۰	۱۹۰/۲	۲۴۰	۳۱۶۱/۷	۱۲۶/۸	۱۳۲۴	۲/۴۳	۲۱/۵۸
W-R (avg)	۱۸۶	۳۰۴/۹۳	۲۸۷۷/۸	۱۱۰	۱۱۰۷	۱۸	۱۶

و میزان کرنش در قطر افقی نسبت به دیوار شاهد، افزایش داشته است. شکست در نمونه‌ها از نوع ترد است و منحنی بار - تغییرمکان محدوده‌ی شکل‌پذیری کمی دارد، البته شکل‌پذیری در این سازه‌ها در صورت عدم تسلیح مطابق ACI 530 در طراحی‌ها، به میزان بیشینه‌ی تا ۱/۵ مجاز است،<sup>[۲۹]</sup> که در صورت تسلیح و مقاوم‌سازی این ضریب نیاز به اصلاح دارد.

## ۵. نتیجه‌گیری

- با توجه به نمودار بار - تغییرمکان حاصل مشخص است که شکست دیوارها ترد و محدوده‌ی شکل‌پذیر آن کم است.
- در روش دیوارهای تسلیح‌شده میزان مقاومت کشش قطری دیوار ۴۴ درصد افزایش و نسبت تغییرمکان قبل از فروریزش به تغییرمکان تسلیم آن دست‌کم ۱۲ برابر افزایش و میزان جذب انرژی با توجه به سطح زیر منحنی به مقدار ۲۸ برابر افزایش داشته است. در روش مذکور ضمن انسجام سازه در زلزله، علاوه بر اینکه دیوار در تغییرمکان‌های زیاد کاملاً فرو نمی‌ریزد، بلکه بعضی از مفتول‌ها در بندهایی که بار به حد بحرانی می‌رسد، گسیخته می‌شوند.
- ظرفیت دیوار در دیوارهای مقاوم‌سازی‌شده با FRP به عرض ۱۰۰ میلی‌متر تغییر چندانی نداشته است، اما در دیوارهای مقاوم‌سازی‌شده با FRP به عرض ۲۰۰ میلی‌متر، ۳۶ درصد افزایش مقاومت داشته است. همچنین نسبت تغییرمکان

چندانی نداشته است، اما در دیوارهای مقاوم‌سازی‌شده با FRP به عرض ۲۰۰ میلی‌متر، به مقدار ۱۹۰/۲ kN معادل ۳۶٪، افزایش مقاومت از خود نشان داده است. سختی اولیه در قطرهای کششی و فشاری در دیوارهای با FRP به عرض ۱۰۰ میلی‌متر به ترتیب ۳۷ و ۲۶ درصد کاهش داشته و در قطرهای کششی و فشاری در دیوارهای با FRP به عرض ۲۰۰ میلی‌متر به ترتیب ۶ و ۶ درصد افزایش داشته است. در ضمن کاهش مدول برشی دیوار، کمینه‌ی نسبت تغییرمکان قبل از فروریزش به تغییرمکان کشسان دیوارهای مقاوم‌سازی‌شده با FRP به عرض ۱۰۰ میلی‌متر در راستای قطر فشاری به حدود ۵/۷۶ برابر دیوارهای شاهد و در راستای قطر کششی دست‌کم به مقدار ۵/۷۵ برابر افزایش یافته است، و کمینه‌ی نسبت تغییرمکان قبل از فروریزش به تغییرمکان کشسان دیوارهای مقاوم‌سازی‌شده با FRP به عرض ۲۰۰ میلی‌متر در راستای قطر فشاری در حدود ۸ برابر دیوارهای شاهد و در راستای قطر کششی دست‌کم به مقدار ۸/۱۶ برابر افزایش یافته است. میزان جذب انرژی دیوارهای مقاوم‌سازی‌شده با FRP به عرض ۱۰۰ میلی‌متر با توجه به سطح زیر منحنی به مقدار ۱۳۰۳ N.m رسیده است، که به مقدار ۱۲ برابر افزایش داشته و میزان جذب انرژی دیوارهای مقاوم‌سازی‌شده با FRP به عرض ۲۰۰ میلی‌متر با توجه به سطح زیر منحنی به مقدار ۳۱۶۱/۷ N.m رسیده است، که به مقدار ۳۱ برابر افزایش داشته است. از منحنی‌های کرنشی نیز نتیجه می‌گیریم که کرنش در FRP با عرض ۱۰۰ میلی‌متر در بار ۱۲۰ kN به حد تسلیم رسیده و بیشترین کرنش در قطر قائم به  $41.7 \times 10^{-5}$  و در قطر افقی به  $33.4 \times 10^{-4}$  رسیده است، که این مقادیر بیانگر رسیدن کرنش FRP به مقدار مؤثر ۲/۰۰ است



۱۵ برابر دیوارهای شاهد در حین برابری کرنش قائم و برابر  $10^{-4} \times 33/4$  بوده است، که به ۱/۵ برابر کرنش مؤثر FRP به مقدار  $0/7 \times 10^{-2}$  رسیده است.

### تقدیر و تشکر

بدین وسیله از شرکت سیلیس آرا به منظور در اختیار قرار دادن بلوک‌های بتن سبک هوادار و ملات سیلیس و از معاونت پژوهشی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی جهت حمایت‌های مادی و کارکنان آزمایشگاه سازه و زلزله‌ی این دانشگاه در انجام آزمایش‌ها کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

قبل از فروریزش به تغییر مکان کشسان دیوارهای مقاوم‌سازی شده با FRP به عرض  $100$  میلی‌متر دست‌کم به مقدار  $5/75$  برابر افزایش یافته و در دیوارهای مقاوم‌سازی شده با FRP به عرض  $200$  میلی‌متر در راستای قطر فشاری، دست‌کم حدود  $8$  برابر دیوارهای شاهد افزایش یافته است. و میزان جذب انرژی دیوارهای مقاوم‌سازی شده با FRP به عرض  $100$  میلی‌متر با توجه به سطح زیر منحنی  $12/8$  برابر و میزان جذب انرژی دیوارهای مقاوم‌سازی شده با FRP به عرض  $200$  میلی‌متر با توجه به سطح زیر منحنی،  $21$  برابر افزایش داشته‌اند.

-- مقدار بیشترین کرنش در راستای قائم در تلاقی دو قطر یعنی ناحیه‌ی بحرانی دیوارهای FRP به عرض  $100$  میلی‌متر در لحظه‌ی گسیختگی در قطر افقی،

### پانوشتها

1. autoclaved aerated concrete
2. strain gauge
3. load cell

### منابع (References)

1. Memari, A.M., Grossenbacher, S.V. and Iulo, L.D. "Comparative evaluation of structural and water penetration performance of three different masonry wall types for residential construction", *JCES*, **1**(1), pp. 2-9 (2012).
2. Al-Khaled, G. "Hebel design analysis program", A Thesis Presented to the Faculty of the School of Architecture, University of South California (2000).
3. David, Z., Yankelevsky, U. and Itzhak, A. "Autoclaved aerated concrete behavior under explosive action", *Construction and Building Materials*, **12**(6-7), pp. 359-364 (1998).
4. Holta, E. and Raiviob, P. "Use of gasification residues in aerated autoclaved concrete", *Cement and Concrete Research*, **35**(4), pp. 796-802 (2005).
5. Gams, M. and Tomažević, M. "Experimental study of seismic behavior of confined AAC masonry buildings", Slovenian National Building and Civil Engineering Institute, 14ECEE (2010).
6. Tanner, J.E. "Design provisions for autoclaved aerated concrete (AAC) structural systems", Ph.D Thesis, The University of Texas at Austin (May 2003).
7. ACI523.4 R, *Guide for Design and Construction with Autoclaved Aerated Concrete Panels* (2009).
8. Varela, J.L. "Development of R and Cd factors for the seismic design of AAC structures", Ph.D. Thesis, The University of Texas at Austin (May 2003).
9. Varela, J.L., Tanner, J.E. and Klingner, R.E. "Development of seismic force reduction and displacement amplification factors for autoclaved aerated concrete structures", *Earthquake Spectra*, **22**(1), pp. 267-286 (February 2006).
10. Tanner, J.E., Varela, J.L., Klingner, R.E., Brightman, M.J. and Cancino, U. "Seismic testing of autoclaved aerated concrete shearwalls", *A Comprehensive Review, ACI, Structural Journal*, **102**(3), pp. 374-382 (May-June 2005).
11. Argudo, J.F. "Evaluation and synthesis of experimental data for autoclaved aerated concrete", Master Thesis, The University of Texas at Austin (August 2003).
12. Tomažević, M. and Gams, M., *Seismic Behaviour of Ytong Houses: Model Shaking Table Tests*, Report P891/08-650-2, Ljubljana, 464 p. (January, 2010).
13. Colunga, T., Angeles, J. and Vallejo, S. "Cyclic behavior of combined and confined masonry walls", *Engineering Structures*, **31**(1), pp. 240-259 (2009).
14. Laukaitis, A., Keriene, J., Mikulskis, D., Sinica, M. and Sezemanas, G. "Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products", *Construction and Building Materials*, **23**(9), pp. 3034-3042 (2009).
15. Laukaitis, A., Keriene, J., Kligys, M., Mikulskis, D. and Unaite, L.L. "Influence of mechanically treated carbon fibre additives on structure formation and properties of autoclaved aerated concrete", *Construction and Building Materials*, **26**(1), pp. 362-371 (May-June 2005).
16. Mousa, M.A. and Uddin, N. "Experimental and analytical study of carbon fiber-reinforced polymer (FRP)/autoclaved aerated concrete (AAC) sandwich panels", *Engineering Structures*, **31**(10), pp. 2337-2344 (2009).
17. Uddin, N., Fouad, F.H., Vaidya, U.K., Khotpal, A.K. and Serrano-Perez, J.C. "Structural behavior of fiber-reinforced polymer-autoclaved aerated concrete panels", *ACI Structural Journal*, **104**(6), pp. 722-730 (November-December 2007).
18. Vatani Oskouei, A. and Rasouli, S. "The study of FRP sheet effectiveness on structural behavioral of AAC blocks", APFIS 2012, *The Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures*, Japan (2-4 February 2012).
19. Memari, A.M., Lepage, A. and Setthachayanon, J. "An experimental study of autoclaved aerated concrete lintels strengthened with externally bonded glass FRP",

- Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **29**(22), pp. 3322-3337 (November 2010).
20. Islamic Republic of Iran Management and Planning Organization, *Instruction for Seismic Rehabilitation of Existing Unreinforced Masonry Buildings*, Code. NO.376 (2007).
  21. Hebel Aerated Concrete, *Hebel Masonry Components*, Technical Sheet and Installation Guide (2009).
  22. Kamanli, M., Donduren, S.M., Tollga, C.M. and Altin, M. "Experimental study of some masonry-wall coursework material types under horizontal loads and their comparison", *Prejem Rokopisa*, ISSN 1580-2949 MTAEC9, **45**(1), pp. 3-11 (2011).
  23. ASTM, Standard, American Society for Testing and Materials, *Standard Specification for Precast Autoclaved Aerated Concrete (PAAC) Wall Construction Units*, ASTM C1386 (1998).
  24. ASTM, Standard American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*, ASTM E519 (1999).
  25. Iranian National Building Code, *Design and Construction of Masonry Buildings*, Part 8 (2006).
  26. ASTM, Standard, American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*, ASTM C109 (1999).
  27. Islamic Republic of Iran Management and Planning Organization, *The Guideline for Design Specification of Strengthening RC Buildings Using Fiber Reinforced Polymers (FRP)*, Code. NO.345 (2006).
  28. Prota, A., Manfredi, G. and Nardone, F. "Assessment of design formulas for In-Plane FRP strengthening of masonry walls", *J. Compos. Constr.*, (ASCE), **12**(6), pp. 643-649 (2008).
  29. ACI 530-05, *Building Code Requirements for Masonry Structures*, ASCE 5-05/TMS 402-05, Reported by the Masonry Standards Joint Committee (MSJC) (2004).