تاریخ دریافت: ۹۴/۰۴/۰۳
تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۸/۲۶

بررسی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای پرکننده از مصالح رایج بر اساس نتایج آزمایش‌های لرزه‌ای

آزاده نوری‌فرد (نویسنده مسئول)، دانشجوی دکتری معماری دانشگاه علم و صنعت ایران، *anoorifard@iust.ac.ir*
محمدرضا تابش‌پور، استادیار دانشکده مکانیک دانشگاه صنعتی شریف
فاطمه مهدی‌زاده سراج، دانشیار دانشکده معماری و شهرسازی دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده: *تجارب زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد دیوارها از جمله عناصری هستند که در زلزله‌های خفیف و متوسط نیز دچار آسیب می‌شوند. این عناصر غیر سازه‌ای می‌توانند موجب پابرجا ماندن ساختمان‌های فاقد سیستم لرزه‌بر گردیده و یا برعکس باعث فروپاشی ساختمان‌های مهندسی‌ساز گردند. پژوهش حاضر بر پایه‌ی نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی دیوارهای ساخته شده از مصالح مختلف توسط محققین قبلی استوار گردیده است. در این تحقیق پس از مطالعه‌ی میدانی وضعیت ساخت‌وساز در شهر تهران، ۱۲ مجموعه آزمایش لرزه‌ای مورد تحلیل قرار گرفته و بر این اساس اصولی برای بهبود رفتار لرزه‌ای دیوارها استخراج گردیده است. اصول استخراج‌شده در قالب چک‌لیستی به‌عنوان نتیجه پژوهش حاضر ارائه گردیده است. این چک‌لیست به‌صورت ابزاری در اختیار مهندسین سازه و معماری قرار خواهد گرفت تا ضمن آگاهی از عملکرد لرزه‌ای مصالح انتخابی و میزان کارایی تمهیدات قابل اجرا، مناسب‌ترین راه‌کار جهت ارتقای عملکرد لرزه‌ای را بر اساس شرایط پروژه برگزینند. به‌عنوان یکی دیگر از نتایج می‌توان ادعا نمود علی‌رغم ساختار یکپارچه‌تر پانل‌ها، با پیش‌بینی تمهیدات ویژه بر اساس نوع مصالح می‌توان عملکرد لرزه‌ای سایر مصالح را نیز ارتقا بخشید. بدیهی است هر چه ویژگی‌های ذاتی مصالح مطلوب‌تر باشد، تمهیدات مورد نیاز کمتر و اطمینان از رفتار لرزه‌ای دیوار بیشتر خواهد بود.*

کلمات کلیدی: *دیوار، بلوک‌ها، پانل‌ها، اجرای ساختمان، آزمایش لرزه‌ای*

۱– مقدمه

دیوارها از جمله عناصر غیرسازه‌ای هستند که حتی در زلزله‌های خفیف و متوسط گذشته دچار آسیب شده‌اند. در برخی از زلزله‌ها، دیوارهای غیرسازه‌ای به سازه ساختمان کمک کرده و موجب پابرجا ماندن ساختمان‌های فاقد سیستم‌های مقاوم در برابر زلزله گردیده‌اند و در برخی دیگر موجب آسیب دیدن سازه یا فروپاشی ساختمان گردیده‌اند. علی‌رغم تحقیقات گسترده‌ای که با رویکرد تجربی از طریق راهبرد آزمایشگاهی و عددی بر روی یک نوع مصالح با جزئیات دقیق انجام شده است، متأسفانه نتایج این تحقیقات توسط هیچ‌یک از مهندسین در رشته‌های سازه و معماری در سطح کشور به کار نرفته و کیفیت ساخت دیوارها بسیار پایین است. در واقع علی‌رغم پیشرفت‌های قابل‌توجه در زمینه‌ی طراحی و اجرای سازه‌ی ساختمان‌ها، همچنان خطاهایی که در زلزله-های گذشته در ارتباط با دیوارها رخ داده است و موجب تلفات جانی و مالی بسیاری گردیده است، دوباره تکرار می‌شود. در این تحقیق سعی شده با استفاده از روش استدلال منطقی،

نظمی منطقی در مطالب پراکنده‌ی تحقیقات قبلی ایجاد شود. در واقع استدلال منطقی تلاش می‌کند یک مورد به‌طور کامل تعریف شده را به‌گونه‌ای که توان تشریح یا سودمندسازی تمام نمونه‌های آن مورد را داشته باشد، در چارچوبی سامان یافته تدوین نماید. اغلب مطالعه‌های انجام شده با راهبرد استدلال منطقی، به سلسله‌ای از دانسته‌های پراکنده‌ی موجود گرایش داشته و آنها را در چارچوب‌هایی واحد که واجد توان تبیینی چشمگیر و گاه بدیع‌اند، به انسجام می‌رسانند. در پژوهش حاضر نیز سعی شده با بررسی نتایج تحقیقات آزمایشگاهی و عددی قبلی به‌صورت کیفی، اصولی استخراج شده و سپس این اصول با رویکرد به‌طور کامل کاربردی در قالب چک‌لیستی جامع تدوین گردد. این چک‌لیست مجموعه‌ای از ضوابط آزموده شده را در زمان طراحی و اجرا، در اختیار مهندسین قرار داده تا با آگاهی از نقاط قوت و ضعف مصالح انتخابی نسبت به پیش‌بینی تمهیدات لازم با هدف ارتقای رفتار لرزه‌ای دیوارها اقدام نمایند.

با توجه به اهمیت عملکرد لرزه‌ای دیوارها در ساختمان و تنوع مصالح، در این تحقیق نخست ویژگی‌های انواع مصالح رایج در ساخت دیوارها در ساختمان‌های متداول در دو گروه اصلی بلوک‌ها و پانل‌ها مورد بررسی قرار گرفته و سپس جهت بررسی وضعیت موجود ساخت‌وساز دیوارها، در یک بررسی میدانی در سطح شهر تهران، از ۳۰۰ پروژه در حال ساخت بازدید به عمل آمده است. در ادامه، ۱۲ مجموعه آزمایش که با استفاده از جک‌های هیدرولیکی و یا میزهای لرزان در خصوص رفتار لرزه‌ای دیوارها انجام گردیده مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و به شناسایی نقاط ضعف و قوت دیوارها تحت نیروهای جانبی پرداخته شده است.

۲- انواع مصالح متداول در ساخت دیوارها

در این بخش ویژگی‌های اصلی مصالح رایج در ساخت‌وسازهای متداول شهری در قالب دو گروه اصلی بلوک‌ها و پانل‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این بخش سعی شده تمام عوامل مؤثر در انتخاب مصالح مطابق با جدول (۱) مرور گردد و با توجه به موضوع مقاله تأکید اصلی بر مواردی همچون مقاومت لرزه‌ای، وزن، یکپارچگی و اتصال دیوار به سازه باشد.

بلوک مصالحی است که در قطعات کوچک تولید شده و با استفاده از مواد چسباننده که بیشتر ملات ماسه سیمان می‌باشد، در اجرای انواع دیوارهای باربر و غیر باربر به کار می‌رود. سرعت اجرای این‌گونه دیوارها کم بوده و اجرای آن نیاز به نیروی متخصص ندارد. در این‌گونه از دیوارها کیفیت ملات و تأمین چسبندگی کافی بین قطعات در دستیابی به مقاومت مورد نیاز در برابر انواع نیروها از اهمیت بالایی برخوردار است. از انواع بلوک‌ها به مواردی همچون آجر فشاری[۱]، آجر سفال[۲]، بلوک سفال[۳]، بلوک سیمانی، بلوک با دانه‌های سبک[۴] لیکا، بلوک بتنی سبک[۵] می‌توان اشاره کرد. در جدول (۲) ضمن معرفی هر یک از بلوک‌ها به ویژگی‌های اصلی هر یک پرداخته شده است.

جدول (۱): *عوامل مؤثر در انتخاب مصالح دیوارها [۱].*

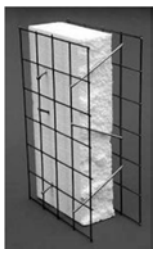
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰
مقاومت در برابر زلزله	سبک بودن	نسبت مقاومت به وزن	تأمین قفل و بست بین قطعات	سهولت اتصال به سازه	کاهش احتمال ایجاد آوار در زلزله	قیمت مصالح و اجرا	سرعت اجرا	عایق حرارتی	عایق صوتی	مقاومت در برابر حریق	مقاومت در برابر رطوبت	افزایش فضای مفید معماری	قابلیت اجرای فرم‌های متنوع	انعطاف‌پذیری و قابلیت تغییر فضاها	میخ پذیری	سهولت اجرای تأسیسات	سهولت و کاهش نازک‌کاری	سادگی نصب در و پنجره	کاهش نخاله

جدول (۲): *معرفی و ویژگی‌های انواع بلوک‌ها.*

مصالح	معرفی	ویژگی‌ها
آجر فشاری	- از قدیمی‌ترین مصالح ساختمانی شناخته‌شده - تولید از طریق پخت خشت خشک شده	- جزو سنگین‌ترین مصالح دیوارها - تأثیرات قابل‌ملاحظه بر رفتار لرزه‌ای سازه در حالت میانقاب [۲] - نامناسب برای دیوار طبقات - در دسترس بودن در اکثر مناطق - قابلیت جذب آب در کاشی‌کاری و سنگ‌کاری و ایجاد چسبندگی مطلوب با ملات ماسه سیمان - امکان اجرای پیچ و رول‌پلاک و شیارزنی - افزایش مصالح نازک‌کاری به دلیل یکدست نبودن ابعاد آجرها
آجر سفال	- آجرهای سوراخ‌دار معمولاً با ۱۰ سوراخ	- جزو جداکننده‌های سنگین - یکپارچگی مطلوب‌تر دیوار در مقایسه با آجر فشاری به دلیل وجود سوراخ‌ها و پر شدن آن با ملات - عملکرد لرزه‌ای مشابه رفتار آجرهای فشاری [۲]
بلوک سفال	- در دو نوع با سوراخ‌های افقی برای ساخت دیوارهای غیر سازه‌ای و با سوراخ‌های قائم برای ساخت انواع دیوارهای سازه‌ای و غیر سازه‌ای - وجود شیارها و فرورفتگی‌هایی در سطح هر دو نوع برای بهبود چسبندگی اندود	- وزن کمتر نسبت به آجر فشاری - شکست برشی ستون در صورت عدم ملاحظه‌ی نیروهای ناشی از برهم‌کنش دیوار و سازه علی‌رغم جداره‌های نازک [۳] - ابعاد بزرگ‌تر نسبت به آجر فشاری و در نتیجه سرعت اجرای بیشتر - مناسب برای تیغه‌ی طبقات و نامناسب برای محل‌هایی که در معرض نیروی جانبی خاک و باد هستند. - ایجاد دور ریز زیاد در دیوارچینی گوشه‌ها و در زمان حمل‌ونقل - نامناسب برای سوراخ‌کاری و ایجاد شیار - عدم جذب آب کافی برای کاشی‌کاری و سنگ‌کاری با ملات - عایق نامناسب صوت
بلوک سیمانی	- حاصل ترکیب سیمان پرتلند، آب، سنگ‌دانه‌های معدنی و صنعتی به‌صورت طبیعی و یا شکسته	- جزء سنگین‌ترین دیوارها [۲] - ابعاد بزرگ‌تر در مقایسه با آجر و بلوک سفالی و در نتیجه سرعت اجرای بیشتر - نامناسب برای ساخت جداکننده‌ها [۲]
بلوک لیکا	- کاهش وزن بلوک‌های سیمانی، با استفاده از دانه‌های سبک لیکا به‌جای شن و ماسه معمولی - تولید دانه‌های لیکا از انبساط خاک رس در کوره‌های گردان با حرارتی در حدود C° ۱۲۰۰ [۴-۵]	- ابعاد بزرگ‌تر نسبت به آجر فشاری و در نتیجه سرعت اجرای بیشتر - وزن کمتر نسبت به آجر فشاری - عایق مناسب حرارت و صوت - عدم افت و خزش [۴] - کارپذیری فیزیکی شامل برش، میخ‌کوبی، سوراخ‌کاری، شیار زنی [۴-۵] - مقاومت در برابر یخزدگی [۵] - دارای زبانه برای قفل و بست
بلوک بتنی سبک	- کاهش وزن بلوک‌های سیمانی یا بتنی از طریق ایجاد حباب‌های هوا در آن - حاصل ترکیب سیمان، آهک، آب، ماسه و پودر آلومینیوم جهت تولید حباب‌های هیدروژن و انبساط به میزان ۵ برابر [۴، ۶، ۷] - قرار دادن بلوک‌ها در اتوکلاو پس از منبسط شدن مخلوط و برش زدن [۴، ۶، ۷]	- وزن کم - مقاومت فشاری قابل‌توجه علی‌رغم چگالی کم - نسبت مقاومت به وزن بالا [۷] - ابعاد بزرگ‌تر نسبت به آجر فشاری و در نتیجه سرعت اجرای بیشتر - عایق مناسب حرارت و صوت - کاهش مصرف ملات [۴] - کارپذیری فیزیکی مناسب مانند قابلیت اره شدن، میخ‌کاری و شیار زنی [۴، ۷] - چسبندگی مناسب به ملات گچ‌وخاک و عدم چسبندگی مناسب به ملات ماسه سیمان [۴] - عدم نیاز به اندود گچ‌وخاک در صورت دقت در تیغه‌چینی [۴]

پانل‌ها مصالحی هستند که در قطعات بزرگ، اغلب به ارتفاع کف تا سقف ساختمان تولید شده و در اجرای دیوارها به کار می‌روند. اغلب، وزن پانل‌ها در مقایسه با بلوک‌ها سبک‌تر بوده و در اجرای آنها از اتصالات مطلوب‌تری بین قطعات دیوار و همچنین بین دیوار و سازه ساختمان استفاده می‌شود. سرعت اجرای این‌گونه دیوارها بسیار زیاد بوده و اجرای آن نیاز به نیروی متخصص و آموزش‌دیده دارد. بسته به نوع پانل‌ها امکان استفاده از آنها هم به‌عنوان دیوار باربر و هم به‌عنوان دیوار غیر باربر وجود دارد. از انواع پانل‌ها به مواردی همچون پانل‌های سه‌بعدی[۶]، دیوار خشک[۷] و پانل کامپوزیت معدنی فوق سبک[۸] می‌توان اشاره کرد. در جدول (۳) ضمن معرفی هر یک از بلوک‌ها به ویژگی‌های اصلی هر یک پرداخته شده است.

***جدول (۳):** معرفی و ویژگی‌های انواع پانل‌ها.*

مصالح	معرفی	ویژگی‌ها
پانل‌های سه‌بعدی 	- هم به‌صورت یک سیستم کامل ساختمانی و هم به‌صورت سیستم دیوارهای غیر باربر - متشکل از یک لایه عایق پلی‌استایرن منبسط شده در وسط و دو شبکه فلزی متصل به هم در طرفین و بتن پاشی روی شبکه‌های فلزی پس از نصب [۲، ۸، ۹]	- پس از اجرا جزء دیوارهای نیمه سنگین به دلیل وزن بتن طرفین [۲] - سرعت و سهولت در اجرا - کاهش وزن دیوار نسبت به دیوارهای معمول - ساختار یکپارچه با اتصالات یکپارچه - کاهش تمرکز تنش - دارای مقاومت زیاد و شکل‌پذیری پایین [۳] - مهار ساده‌تر برای شکست خارج از صفحه در مقایسه با دیوار آجری [۳] - قابلیت تحمل فشار و کشش به علت مسلح بودن [۳] - سهولت در شکل‌دهی و انطباق با طرح‌های متنوع - عایق صوتی و حرارتی مناسب - کاهش احتمال ایجاد آوار در بارگذاری لرزه‌ای به دلیل گستردگی شبکه فولادی در تمام سطح - کاهش ضخامت دیوار و در نتیجه افزایش سطح اشغال در مقایسه با دیوارهای رایج عایق‌بندی شده - حذف قالب‌بندی - حذف گچ و خاک - حذف نعل درگاه - حمل‌ونقل آسان - حذف عملیات تخریب جهت اجرای تأسیسات و استفاده از فضای بین شبکه‌ی فلزی طرفین به این منظور
دیوار خشک	- متشکل از قاب فولادی سبک به‌عنوان تکیه‌گاه و پانل‌هایی در طرفین آن - نخست اجرای اعضای افقی با یک عایق واسط، سپس اجرای اعضای قائم بین آنها بدون پیچ و در نهایت پیچ شدن پانل‌های گچی به اعضای قائم [۴، ۱۰] - پوشش دیوارهای داخلی اغلب از گچ برگ به‌صورت ورق‌های نازکی از گچ متبلور با روکش محافظ از جنس کاغذ مقاوم [۸] - پوشش نمای خارجی از انواع روش‌های رایج از جمله چوب، سیمان، سنگ و حتی آجر [۸] - استفاده از بتن سبک، فوم پلی‌استایرن [۸]، عایق پشم‌شیشه یا پشم سنگ در فضای میانی جهت عایق‌بندی حرارتی و صوتی	- افزایش سرعت و سهولت اجرا - سبکی و کاهش وزن ساختمان - عدم تأثیر قابل‌توجه بر عملکرد لرزه‌ای ساختمان به دلیل سختی درون‌صفحه‌ای اندک [۲] - مقاومت برون‌صفحه‌ای مناسب - کاهش احتمال ایجاد آوار در بارگذاری لرزه‌ای - عایق حرارتی و صوتی - قابلیت اجرا بر روی تمامی سازه‌ها - انعطاف‌پذیری و قابلیت تغییر فضاها - صرفه‌جویی در مصرف مصالح - عدم احتیاج به گچ‌وخاک و گچ کشته - امکان دسترسی سریع به تأسیسات - امکان باز شدن و نصب مجدد

ادامه جدول (۳)

مصالح	معرفی	ویژگی‌ها
پانل کامپوزیت معدنی فوق سبک	- ماده‌ی اصلی از گچ و افزایش مقاومت کششی و فشاری با استفاده از توری مقاوم از جنس پلی‌پروپیلن و الیاف پودری به‌عنوان مواد کامپوزیت [۱۱] - مقطع به ابعاد ۱۲× ۴۶ سانتی‌متر دارای ۳ حفره سرتاسری و ارتفاع بر اساس نیاز از ۳۶۰-۲۷۰ سانتی‌متر [۱۱] - نخست اجرای نقشه با استفاده از نبشی پرسی گالوانیزه در کف و سقف، سپس نصب اولین پانل و اجرای پانل‌های بعدی با استفاده از چسب مخصوص و در نهایت اجرای نبشی‌های جلوبند و درزگیری درز بین پانل‌ها با چسب مخصوص و تیپ میان‌بند درزگیری شده [۱۱]	- سرعت و سهولت اجرا - سبکی و کاهش وزن ساختمان - نسبت مقاومت به وزن بسیار بالا - شکل‌پذیری بسیار بالا - عایق حرارتی و صوتی - قابلیت اجرا بر روی تمامی سازه‌ها - قابلیت میخ‌پذیری - صرفه‌جویی در مصرف مصالح و کاهش نخاله‌های ساختمانی - عدم احتیاج به گچ‌وخاک و گچ کشته - عبور لوله‌های تأسیسات از حفره‌های داخل پانل و اجرای سریع و آسان تأسیسات

۳- بررسی وضعیت موجود ساخت‌وساز

در یک بررسی میدانی در سطح شهر تهران، از ۳۰۰ پروژه در حال ساخت بازدید به عمل آمد. تمام نمونه‌های برداشت‌شده از نظر مصالح مورد استفاده در اجرای دیوارها در چهار گروه اصلی شامل بلوک سفال، بلوک لیکا، ترکیب بلوک سفال و لیکا به‌صورت بلوک لیکا برای دیوارهای پیرامونی جهت تأمین مقاومت حرارتی و بلوک سفال برای دیوارهای داخلی و در نهایت بلوک‌های بتن سبک هبلکس قابل تقسیم‌بندی می‌باشد. فراوانی نمونه‌های برداشت شده به‌صورت نمودار درصدی در شکل (۱) و تصاویر نمونه‌ها در شکل (۲) ارائه شده است.

شکل (۱): *نمودار درصدی مصالح مورد استفاده در دیوارهای ۳۰۰ پروژه در حال اجرا در سطح شهر تهران.*

(الف) بلوک سفال

(ب) بلوک لیکا

شکل (۲): *مصالح رایج در اجرای دیوارها در ساخت‌وسازهای رایج تهران.*

(پ) ترکیب بلوک لیکا در دیوارهای پیرامونی و بلوک سفال در دیوارهای داخلی

(ت) بلوک بتن سبک هبلکس

ادامه شکل (۲)

در شرایط موجود ساخت‌وساز که اغلب ساختمان‌ها از نوع اسکلت فلزی و اسکلت بتنی هستند، دیوارها پس از اجرای سازه به‌صورت دیوار تک‌جداره و به‌عنوان عناصر غیر سازه‌ای اجرا می‌شوند. در اجرای دیوارها تنها بندهای افقی اجرا شده و اتصال دیوار به قاب به‌ویژه به تیر فوقانی بسیار ضعیف بوده و حتی درز این بخش‌ها هم به‌طور کامل با ملات پر نمی‌شود. در اکثر پروژه‌ها هیچ‌گونه تمهیدی جهت اتصال دیوارهای خارجی به سازه پیش‌بینی نشده است، حتی در خصوص ساختمان‌هایی که به سمت خیابان کنسول شده و نمای ساختمان از قاب‌های سازه‌ای فاصله گرفته است همچنان هیچ‌گونه تمهیدی برای تأمین مقاومت برون‌صفحه‌ای دیوارها پیش‌بینی نشده و بعضاً دیوارهای طویلی به طول کل زمین بدون هیچ‌گونه مهار اجرا شده‌اند. وضعیت دیوارهای داخلی اغلب نامطلوب‌تر است، زیرا جهت حداکثر استفاده از متراژ طبقات، اغلب دیوارهای داخلی با ضخامت کم، حتی کمتر از ۱۰ سانتی‌متر به ارتفاع کل طبقه اجرا شده و علاوه بر این هیچ‌گونه مهار جانبی ندارد. گاهی در بخش فوقانی حتی با دال سقف و یا تیرچه‌های فرعی نیز در تماس نبوده و تنها اتصال این دیوارها با بلوک‌های یونولیتی سقف می‌باشد (شکل ۳). در نمونه‌گیری به‌عمل‌آمده تنها در سه درصد از پروژه‌ها تمهیداتی جهت مهار دیوارها در برابر نیروهای جانبی زلزله پیش‌بینی شده که به‌طور عمده این پروژه‌ها جزو پروژه‌های بزرگ بوده‌اند (شکل ۴).

شکل (۳): *نمونه‌ای از اجرای نامناسب دیوارهای داخلی؛ نسبت کم ضخامت به ارتفاع، عدم استفاده از پروفیل‌های مهاری، اتصال نامناسب دیوار به بلوک‌های یونولیتی سقف.*

شکل (۴): *نمونه‌ای از اجرای پروفیل‌های مهاری در اتصال دیوارهای پیرامونی به سازه.*

۴- نتایج آزمایش‌های لرزه‌ای

در این قسمت نتایج حاصل از ۱۲ مجموعه آزمایش که بر روی انواع بلوک‌ها و پانل‌ها با جزئیات اجرایی مختلف انجام گردیده، ارائه شده است. نمونه‌های مورد آزمایش در مقیاس‌های مختلف از یک‌به‌یک تا یک‌به‌سه تحت نیروهای درون‌صفحه‌ای و برون‌صفحه‌ای قرار گرفته‌اند. نیروها به‌صورت پوش‌آور یا رفت و برگشتی با استفاده از جک‌های هیدرولیکی و یا با استفاده از میز لرزان وارد شده است. همانند بخش قبلی بررسی‌ها با هدف ارتقای کیفیت ساخت و طراحی در دو گروه اصلی بلوک‌ها و پانل‌ها صورت گرفته و از ارائه‌ی جزئیات نمونه‌ها، میزان نیروهای وارده و نتایج عددی صرف‌نظر شده است.

۴-۱- آزمایش‌های لرزه‌ای بلوک‌ها

با توجه به این که عمده آزمایش‌های انجام شده در ارتباط با بلوک‌ها به‌صورت مقایسه‌ای بر روی انواع مختلف بلوک‌ها انجام شده است، لذا نتایج حاصله در دو بخش ارائه شده است. در بخش نخست نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی آجر فشاری، آجر سفال، بلوک سفال، بلوک با دانه‌های سبک ارائه شده و در بخش دوم به نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی بلوک بتن سبک پرداخته شده است.

۴-۱-۱- نتایج آزمایش‌های لرزه‌ای دیوار با آجر فشاری، آجر سفال، بلوک سفال، بلوک با دانه‌های سبک

- هرگونه اقدامی جهت افزایش ویژگی‌های کششی دیوارهای پرکننده، مشارکت دیوار در عملکرد لرزه‌ای قاب بتن مسلح را افزایش خواهد داد [۱۲].
- نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط چهار محقق نشان می‌دهد نازک‌کاری دیوارهای میانقاب ضمن حفظ انسجام و یکپارچگی دیوار [۱۲-۱۴]، باعث افزایش مقاومت و سختی [۱۲، ۱۳، ۱۵] و افزایش ظرفیت جذب انرژی قاب پر شده می‌شود [۱۵] (شکل ۵).

(الف) بدون نازک‌کاری

(ب) با نازک‌کاری

شکل (۵): *بررسی تأثیر نازک‌کاری در مقاومت و سختی دیوار [۱۴].*

آزمایش شماره یک: نتایج آزمایش‌های انجام‌شده توسط شاه‌نظری [۱۳]، بر روی قاب یک طبقه، یک دهانه فولادی با دیوار پرکننده از انواع بلوک‌ها شامل آجر فشاری، آجر سفال، بلوک سفالی، بلوک با دانه‌های سبک در دو حالت با و بدون نازک‌کاری تحت نیروهای درون‌صفحه‌ای با استفاده از جک هیدرولیکی نشان می‌دهد:

۱. اگرچه افزایش مقاومت فشاری واحدهای بنایی در حالت کلی باعث افزایش مقاومت قاب میان‌پر خواهد شد، اما در برخی موارد رفتار ترد و یا شکل‌پذیر مصالح می‌تواند این رابطه را برهم زند.
۲. قاب میان‌پر با آجر سفال سوراخ‌دار دارای بیشترین درصد افزایش مقاومت نسبت به قاب خالی به ازای تغییر مکان مجاز می‌باشد.

۳. بلوک‌های سیمانی سبک با پوکه صنعتی، رفتار بسیار خوبی از خود نشان داده و علی‌رغم مقاومت فشاری پایین در زمان بارگذاری قاب پرشده، ضمن تحمل تغییر شکل‌ها، حتی در حالت نازک‌کاری نشده نیز خرد نشده و تنها ترک‌های قطری در آنها ملاحظه گردید.

۴. علی‌رغم مقاومت بالاتر بلوک سفالی در مقایسه با بلوک سیمانی سبک، بلوک‌های سفالی در دیوارهای نازک‌کاری نشده رفتار خوبی از خود نشان نداده و در مراحل اولیه‌ی بارگذاری و تغییر شکل قاب به دلیل تردی و شکنندگی خرد شده و بر همین اساس مقاومت قاب دربرگیرنده‌ی این نوع میانقاب نسبت به قاب خالی افزایش قابل‌توجهی ندارد.

۵. پر کردن درز بین قاب و میانقاب پس از چیدن دیوار و هم‌زمان با اجرای نازک‌کاری موجب شده تا فاصله‌ای که در اثر افت ملات بین قاب و دیوار ایجاد گردیده پر شده و چسبندگی کافی بین قاب و دیوار به وجود آید و امکان بهره‌گیری از میانقاب‌ها فراهم شود.

آزمایش شماره دو: نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط مقدم و همکاران [۱۶]، بر روی قاب یک طبقه، یک دهانه فولادی پر شده با آجر رسی با جزئیات مختلف و میانقاب‌های چند لایه متشکل از لایه‌های آجر و بتن تحت نیروهای درون‌صفحه‌ای با استفاده از جک هیدرولیکی نشان می‌دهد:

۱. مقاومت ترک‌خوردگی میانقاب با مقدار چسبندگی بین آجر و ملات رابطه مستقیم دارد.

۲. استفاده از آرماتور در ملات بین رج‌های دیوار، باعث افزایش مقاومت درون‌صفحه‌ای[۹] میانقاب می‌گردد.

۳. مقاومت ترک‌خوردگی بیشتر از آن که به مقدار آرماتور بستگی داشته باشد، به مقاومت ملات مصرفی وابسته است.

۴. استفاده از تیر کمرکش باعث افزایش مقاومت درون‌صفحه‌ای میانقاب می‌گردد.

۵. دیوار تک‌لایه آجری هرچند که قابلیت تحمل تغییر مکان‌های زیادی را دارد ولی مقاومت اندکی دارد. از طرف دیگر میانقاب بتنی که مقاومت به‌نسبت خوبی دارد قابلیت زیادی برای تحمل تغییر مکان جانبی ندارد. در عوض نمونه‌های سه لایه هم‌زمان دارای مقاومت و قابلیت تغییر مکان قابل‌توجهی هستند.

۶. نحوه‌ی چیدمان لایه‌ها در مقطع میانقاب مرکب حائز اهمیت است به‌نحوی‌که میانقاب دارای پوشش بتنی دارای مقاومت نهایی بیشتر نسبت به میانقاب‌های دارای هسته بتنی با ضخامت لایه‌های برابر است. به نظر می‌رسد دلیل این امر به وجود آمدن محصورشدگی ناشی از وجود دو پوشش بتنی طرفین دیوار آجری و افزایش مقاومت فشاری بتن پوشش بر اثر جذب مقداری از آب توسط آجرها و تبخیر بخشی دیگر از آن باشد.

۷. یکی از عواملی که باعث افزایش مقاومت ترک‌خوردگی میانقاب‌ها می‌شود، مقدار محصورشدگی مصالح در گوشه‌های میانقاب است. هرچه مقدار محصورشدگی این قسمت و گستره‌ی آن بیشتر باشد، مقاومت میانقاب نیز بیشتر می‌شود. استفاده از الیاف در بتن گوشه‌های دیوار، استفاده از مش فولادی در طرفین و اتصال آنها با آرماتورهای عرضی از روش‌هایی است که موجب افزایش محصورشدگی گوشه‌ها می‌شود.

آزمایش شماره سه: نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط پارسا و سروقد مقدم [۱۷]، بر روی سه قاب بتن مسلح یک طبقه، یک دهانه به‌صورت خالی، با میانقاب آجر فشاری و میانقاب بلوک سفالی تحت نیروهای رفت و برگشتی شبه‌استاتیکی با استفاده از جک هیدرولیکی در مقیاس ۱ به ۲ نشان می‌دهد:

۱. میانقاب آجری با افزایش سختی اولیه، حداکثر مقاومت و استهلاک انرژی موجب بهبود رفتار قاب می‌شود ولی میانقاب سفالی علی‌رغم افزایش نسبی پارامترهای ذکر شده، به دلیل تخریب سریع، رفتار چندان مطلوبی را ایجاد نمی‌کند.

۲. وجود میانقاب آجر فشاری یا بلوک سفالی موجب افزایش

سختی اولیه به میزان ۷ برابر و سختی مؤثر به میزان ۴ برابر گردید.

۳. حداکثر مقاومت افقی قاب‌های دارای میانقاب برای میانقاب سفالی ۲/۷ و برای میانقاب آجری ۳/۷ برابر قاب بدون میانقاب می‌باشد.

۴. در جابه‌جایی نسبی ۲/۵ درصد، استهلاک انرژی قاب دارای میانقاب سفالی ۱/۵ برابر قاب خالی و قاب دارای میانقاب آجر فشاری ۲ برابر قاب خالی می‌باشد.

۵. در مراحل اولیه‌ی بارگذاری میانقاب آجری، ترک‌های مرزی در محل اتصال قاب و میانقاب تشکیل و در نهایت میانقاب با مود شکست قطری دچار گسیختگی گردید ولی در میانقاب سفالی، اولین ترک‌ها در مرکز میانقاب به‌وجود آمد و سپس ترک‌های قطری شکل گرفت (شکل ۶).

۶. وجود میانقاب‌های ساخته شده از آجر فشاری باعث توزیع یکنواخت‌تر لنگر خمشی شده و از تمرکز خسارت در مقاطع فوقانی ستون‌ها جلوگیری می‌کند، اما در مورد میانقاب‌های سفالی چنین حالتی دیده نمی‌شود و مشابه با قاب خالی خسارت در بالا و پایین ستون‌ها تمرکز دارد.

آزمایش شماره چهار: از انجام آزمایش بر روی چهار نمونه دیوار از بلوک سفالی به‌صورت: ۱- دیوار غیرمسلح، ۲- دیوار غیرمسلح با اندود، ۳- دیوار مسلح با شبکه‌ی مش خارجی و ۴- دیوار مسلح با آرماتور بین بندها در قاب بتن مسلح تحت نیروهای درون و برون‌صفحه‌ای با استفاده از جک‌های هیدرولیکی در دو جهت در مقیاس ۱ به ۱/۵ توسط پائولو و همکاران [۱۴]، نتایج زیر حاصل گردید:

۱. نمونه با شبکه مش خارجی، بالاترین مقاومت فشاری را داشت.

۲. نمونه با شبکه مش خارجی، بالاترین مقاومت خمشی را داشته و شکل‌پذیری بالایی نیز حاصل گردید، زیرا مش خارجی اصولاً مانع از جدا شدن اجزا در زلزله می‌گردد.

۳. نمونه با آرماتور بین بندها در تست مقاومت خمشی موازی بندها، نتیجه‌ای مشابه نمونه‌ی غیرمسلح با اندود را داشت چراکه آرماتورها به‌طور مستقیم در بار این جهت عمل نمی‌کنند.

۴. نمونه با شبکه‌ی مش خارجی، بالاترین مقاومت برشی را داشت و دوباره شکل‌پذیری بالایی حاصل گردید.

۵. نمونه با آرماتور بین بندها در تست مقاومت برشی موازی بندها، نتیجه‌ای مشابه نمونه غیرمسلح با اندود را داشت چراکه آرماتورها به‌طور مستقیم در بار این جهت عمل نمی‌کنند.

۶. در هر دو حالت دیوار مسلح، سختی دیوار افزایش چهار برابری داشت.

۷. نمونه‌های مسلح در مقایسه با نمونه‌های غیرمسلح از مقاومت برون‌صفحه‌ای[۱۰] بالاتری برخوردارند.

(الف) میانقاب آجر فشاری

(ب) میانقاب بلوک سفالی

***شکل (۶):** الگوی ترک‌خوردگی قاب دارای میانقاب [۱۷].*

۸. در تست مقاومت برون‌صفحه‌ای، لازم است توجه شود که خسارات درون‌صفحه‌ای قبلی، حالات شکست دیوار را به دلیل تغییر شرایط تکیه‌گاهی دیوار تغییر می‌دهد. به همین دلیل قسمت‌های واسط فوقانی در دیوار غیرمسلح و دیوار مسلح با آرماتور بین رگ‌ها وجود نداشته و حالت شکست به‌صورت سازه طره‌ای ایجاد می‌شود. در خصوص دیوار با مش زیر اندود، حالت شکست به‌صورت دال ایجاد می‌شود.

آزمایش شماره پنج: نتایج آزمایش در برابر نیروهای برون‌صفحه‌ای بر روی چهار نمونه ساخته شده با آجر رسی و قاب بتن مسلح شامل قاب خالی، دیوار محصور تک‌جداره، دیوار محصور دو جداره و دیوار پرکننده که توسط تو و همکاران [۱۸] انجام گردیده به شرح زیر است. لازم به ذکر است دیوار محصور شامل دیوار غیرمسلحی است که توسط قاب پیرامونی بتن مسلح که در محل ریخته می‌شود، احاطه شده و لبه‌های دیوار و ستون‌های قاب به‌عنوان برشگیر به‌صورت دندانه است:

۱. دیوار محصور با قیدهای محیطی قوی، مقاومت برون‌صفحه‌ای قابل‌توجهی از طریق مکانیسم قوسی دارند.

۲. دیوار پرکننده نیز در زلزله‌ی خفیف، مکانیسم قوسی[11] نشان داده ولی در زلزله‌ی شدیدتر از قاب پیرامونی جدا شده و تحت نیروهای اینرسی ناشی از وزن خود فروریخت.

۳. لاغری دیوار، تأثیر به‌سزایی در مقاومت و سختی برون‌صفحه‌ای دارد.

۴. ظرفیت تغییر شکل دیوار محصور، متناسب با ضخامت آن است.

۵. علی‌رغم ضخامت‌های متفاوت دیوارهای محصور، هر دو رفتار مشابهی داشته و تا پایان آزمایش متصل به قاب باقی ماندند.

۶. بیشتر ترک‌های افقی در دیوار محصور، در امتداد ترک‌های ستون بوده و هیچ ترک قائمی در مرز دیوار و سازه رخ نداد.

۷. الگوی ترک‌ها در نمونه‌های محصور نشان می‌دهد قاب و دیوار به‌صورت یک عضو I شکل یکپارچه عمل کرده و دارای رفتار خمشی دوطرفه است و در هیچ‌یک از نمونه‌ها در میانه‌ی ارتفاع دیوار در اثر نیروی اینرسی وزن دیوار ترک مشاهده نگردید.

۸. در نمونه دیوار پرکننده، تمام پیرامون دیوار در امتداد افق و قائم در آغاز آزمایش ترک خورده و اتصالی بین ترک‌های دیوار و ستون وجود نداشت. در سه سیکل اول رفتار این نمونه مشابه دیوارهای محصور بود ولی پس از خسارت دیدن مرزها و جدا شدن دیوار، ترک‌هایی به عرض کل دیوار در ۷۰٪ ارتفاع رخ داد (شکل ۷).

(الف) دیوار محصور

(ب) دیوار پرکننده

شکل (۷): *وضعیت نهایی نمونه‌های مورد آزمایش [۱۸].*

۹. علی‌رغم وجود درز بین دیوار پرکننده و تیر فوقانی، محصوریت ایجاد شده از طریق ملات موجود در درز نیز مؤثر بود. به‌نحوی‌که می‌توان گفت مکانیسم قوسی حتی از طریق درزی که بخش‌هایی از آن پر شده است هم ایجاد می‌شود.
۱۰. دیوار محصور رفتار باثبات‌تری را در مقایسه با دیوار پرکننده نشان داد و ظرفیت تغییر شکل آن بیش از مقدار آزمایش بود ولی دیوار پرکننده دچار تغییر شکل طره‌ای گردیده و از قاب جدا شد.
۱۱. با توجه به ضخامت یکسان دیوار محصور با دیوار پرکننده، می‌توان نتیجه گرفت که ظرفیت تغییر شکل دیوارها ناشی از شرایط مهارهای پیرامونی است.
۱۲. در نمونه‌های دیوار محصور، دیوار دوجداره مقاومت و سختی بیشتری را در مقایسه با دیوار تک‌جداره نشان داد ولی این رابطه یک رابطه‌ی خطی به نسبت ضخامت دیوار نیست.
۱۳. ظرفیت تغییر شکل و مقاومت خارج از صفحه‌ی دیوار در ارتباط با ضخامت یا ضریب لاغری دیوار و اتصالات پیرامونی دیوار می‌باشد.

آزمایش شماره شش: این آزمایش توسط مینگ و همکاران [۱۹]، بر روی نمونه‌های ساخته شده با بلوک‌های بتنی در قاب یک دهانه‌ی دو طبقه با ستون بتنی و تیر فلزی در مقیاس یک‌به‌سه تحت نیروهای خارج از صفحه‌ای بر روی میز لرزه انجام شده است. در این آزمایش از اتصالات متفاوتی بین دیوار و تیر استفاده شده است، یک نمونه با اتصال آجر مورب و یک نمونه با اتصال از طریق آرماتور و پر کردن درز با پلی‌اورتان اجرا شده است، در هر دو نمونه اتصال دیوار به ستون از طریق میلگرد می‌باشد. نتایج حاصل شده به شرح زیر است:

۱. شتاب نمونه با اتصال فوقانی آجر مورب بیش از نمونه با اتصال میلگرد می‌باشد.
۲. از مقایسه‌ی دو نمونه با اتصال مشابه دیوار به قاب، در انتهای آزمایش نمونه‌ی واقع در طبقه‌ی پایین سالم باقی مانده، درحالی‌که نمونه‌ی واقع در طبقه‌ی فوقانی فروریخت. لذا ارتفاع ساختمان از عوامل تأثیرگذار در مقاومت خارج از صفحه به شمار می‌رود.
۳. تغییر مکان هر دو نمونه در طبقه‌ی فوقانی کم‌وبیش مشابه بوده ولی اندکی تغییر مکان نمونه با اتصال آجر مورب بیشتر بود و این نمونه دچار آسیب گردید.
۴. عملکرد کلی دیوار پرکننده با اتصال میلگرد تحت نیروهای جانبی بهتر از دیوار با اتصال آجر مورب بدون درز بوده و مشارکت آن در ظرفیت برون‌صفحه‌ای دیوار بیشتر است.

آزمایش شماره هفت: آزمایش‌های انجام شده توسط کاکالتسیس و کارایانیس [۲۰]، بر روی دو نوع آجر رسی با مقاومت بالا و مقاومت کم در قاب بتن مسلح یک طبقه یک دهانه تحت نیروهای جانبی با استفاده از جک‌های هیدرولیکی در مقیاس یک‌به‌سه نشان می‌دهد:

۱. قاب پرشده از آجر با مقاومت بالا، در مقایسه با آجر با مقاومت کم، عملکرد مطلوب‌تری از لحاظ مقاومت، سختی، شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی دارد.
۲. میزان کاهش مقاومت و کاهش ظرفیت جذب انرژی در قاب پرشده از آجر با مقاومت بالا، کمتر از آجر با مقاومت کم می‌باشد.
۳. حد بهره‌برداری قاب با دیوار پرکننده از آجر با مقاومت بالا مشابه قاب با دیوار پرکننده از آجر با مقاومت کم می‌باشد ولی حد نهایی نمونه با مقاومت بالا بیش از نمونه ضعیف می‌باشد.

آزمایش شماره هشت: آزمایش‌های انجام شده توسط ماهری و همکاران [۲۱]، بر روی دیوار آجری با دو کیفیت ساخت استاندارد (آجر اشباع جهت جلوگیری از جذب آب ملات و نگهداری از ملات) و کیفیت ساخت غیر استاندارد (آجر خشک و عدم نگهداری از ملات) و هر یک در دو حالت با و بدون بند قائم در قاب یک طبقه یک دهانه تحت

نیروهای جانبی درون‌صفحه‌ای و برون‌صفحه‌ای پوش‌آور با استفاده از جک‌های هیدرولیکی در مقیاس یک‌به‌دو نشان می‌دهد:

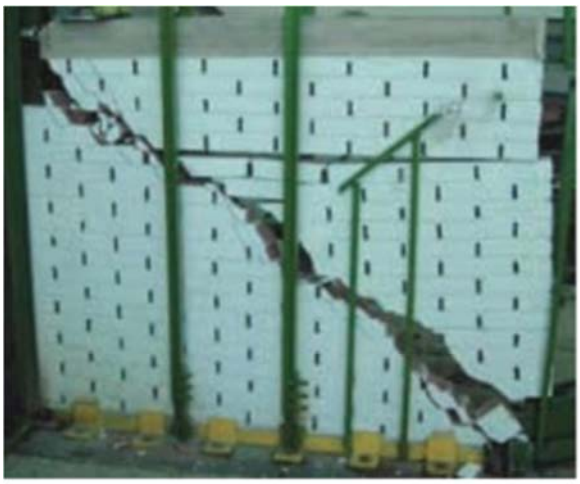
۱. در نمونه‌های با کیفیت ساخت استاندارد، سختی دیوار بدون بند قائم، ۱۵٪ کمتر از دیوار با بند قائم است.

۲. در نمونه‌های با کیفیت ساخت استاندارد، بند قائم به میزان ۳۵٪ در ظرفیت برش درون‌صفحه‌ای دیوار مشارکت دارد ولی در نمونه‌های با کیفیت ساخت غیراستاندارد، این میزان مشارکت بیشتر و به میزان ۴۸٪ می‌باشد.

۳. در نمونه‌های با کیفیت ساخت استاندارد تحت نیروهای درون‌صفحه‌ای، شکست به‌صورت انفجاری بوده و ترک قطر فشاری از میان هر دو مصالح آجر و ملات عبور کرد ولی در نمونه‌های با کیفیت ساخت غیراستاندارد، شکست به‌صورت انفجاری نبوده و ترک در امتداد قطر فشاری از داخل ملات به‌صورت ترکیبی از ترک‌های افقی و پله‌ای عبور کرد (شکل ۸).

۴. نمونه با کیفیت ساخت استاندارد بدون بند قائم، پنج برابر قوی‌تر از نمونه‌ی مشابه با کیفیت ساخت غیراستاندارد بود و نمونه‌ی با کیفیت ساخت استاندارد با بند قائم، ۴/۵ برابر قوی‌تر از نمونه‌ی مشابه با کیفیت ساخت غیراستاندارد بود. این امر نشان‌دهنده‌ی اهمیت استفاده از آجرهای اشباع‌شده، آب‌دهی به ملات و مراقبت پس از ساخت می‌باشد.

(الف) نمونه با کیفیت ساخت استاندارد با بند قائم



(ب) نمونه با کیفیت ساخت استاندارد بدون بند قائم

(پ) نمونه با کیفیت ساخت غیراستاندارد با بند قائم

(ت) نمونه با کیفیت ساخت غیراستاندارد بدون بند قائم

شکل (۸): مود شکست نمونه‌ها [۲۱].

۵. در نمونه‌های با کیفیت ساخت استاندارد تحت نیروهای برون‌صفحه‌ای، اولین ترک به‌صورت عمودی رخ داد که این امر گویای رفتار اورتوتروپیک دیوار می‌باشد. در ادامه در اثر کاهش سختی دیوار در جهت افقی، دیوار به‌صورت ایزوتروپیک رفتار کرده که این تغییر رفتار در بار نهایی به‌صورت ترک‌های قطری نمود پیدا کرد. پس از وقوع ترک‌های قطری، دیوار با بند قائم، دیگر در برابر نیروهای اضافی پایدار نبوده ولی دیوار بدون بند قائم، بار بیشتری را با تغییر مکان بیشتر تحمل کرد که نشان‌دهنده‌ی رفتار انعطاف‌پذیر دیوار بدون بند قائم است.

۶. در نمونه‌های با کیفیت ساخت غیر استاندارد تحت نیروهای برون‌صفحه‌ای، اولین ترک به‌صورت قطری رخ داد که این امر گویای رفتار ایزوتروپیک دیوار می‌باشد، این ترک در مرز بین آجر و ملات رخ داد که نشان از ضعف کیفیت ملات می‌باشد.

۷. حذف بند قائم در نمونه‌ها موجب کاهش مقاومت و سختی برون‌صفحه‌ای دیوار به میزان ۳۰٪ گردید.

۸. حذف بند قائم، موجب تغییر رفتار خمش دوطرفه‌ی دیوار از رفتار نسبتاً ترد به رفتار با شکل‌پذیری بالا می‌شود.

۴-۱-۲- نتایج آزمایش لرزه‌ای دیوار با بلوک بتنی سبک

آزمایش شماره نه: از آزمایش‌های انجام شده توسط پنا و همکاران [۷]، با استفاده از جک هیدرولیکی بر روی قاب بتن مسلح یک دهانه یک طبقه که با دیوار بلوک بتنی سبک پر شده است، در حالت‌های؛ دیوار غیرمسلح، دیوار مسلح با خرپای مسطح بین ملات، دیوار مسلح با آرماتورهای افقی در بلوک‌های شیاردار، دیوار با کلاف افقی بتن مسلح در میانه ارتفاع و دیوار با بازشو واقع در وسط دهانه و خرپاهای افقی مسطح بین ملات نتایج زیر حاصل گردید (شکل ۹):

۱. مقاومت نمونه‌ها در مقایسه با قاب خالی بیش از دو برابر می‌باشد.

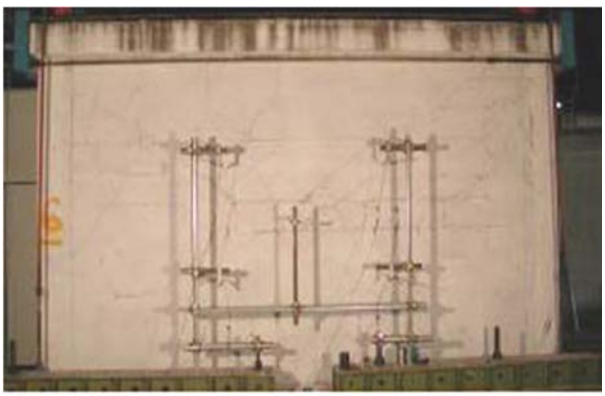
۲. مقاومت و سختی بدون کاهش ظرفیت تغییر مکان قاب، افزایش می‌یابد.

۳. بلوک‌های بتنی سبک به دلیل قابلیت تغییر شکل بالا، می‌توانند تا حد نهایی فروپاشی قاب پر شده مشارکت نمایند.

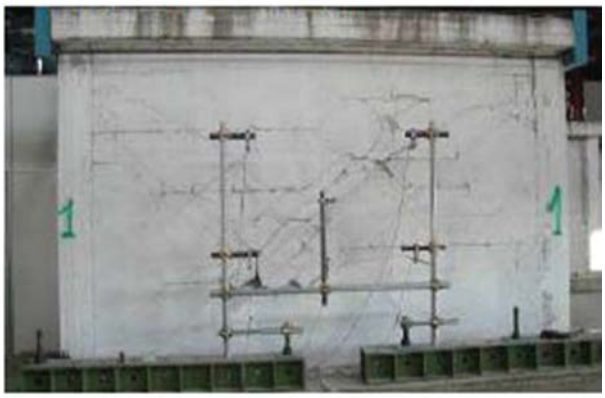
۴. سختی اولیه تمام نمونه‌ها کم‌وبیش یکسان بوده، لذا مسلح یا غیرمسلح بودن دیوار پرکننده تأثیر چندانی بر سختی قاب پر شده ندارد.

۵. مسلح نمودن دیوار پرکننده موجب افزایش ظرفیت تغییر مکان و شکل‌پذیری می‌گردد.

۶. صرف‌نظر از نمونه با کلاف افقی در میانه‌ی ارتفاع دیوار، مسلح نمودن دیوار پرکننده، در کاهش خسارات لرزه‌ای قاب و دیوار مؤثر است.



(الف) نمونه غیرمسلح



(ب) دیوار مسلح با آرماتورهای افقی

شکل (۹): *الگوی ترک‌خوردگی نهایی میانقاب با بلوک بتنی سبک [۷].*

۴-۲- آزمایش‌های لرزه‌ای پانل‌ها

در این بخش نتایج آزمایش‌های انجام شده بر روی

پانل‌های سه‌بعدی، دیوار خشک و پانل کامپوزیت معدنی فوق سبک مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۲-۱- نتایج آزمایش لرزه‌ای پانل‌های سه‌بعدی

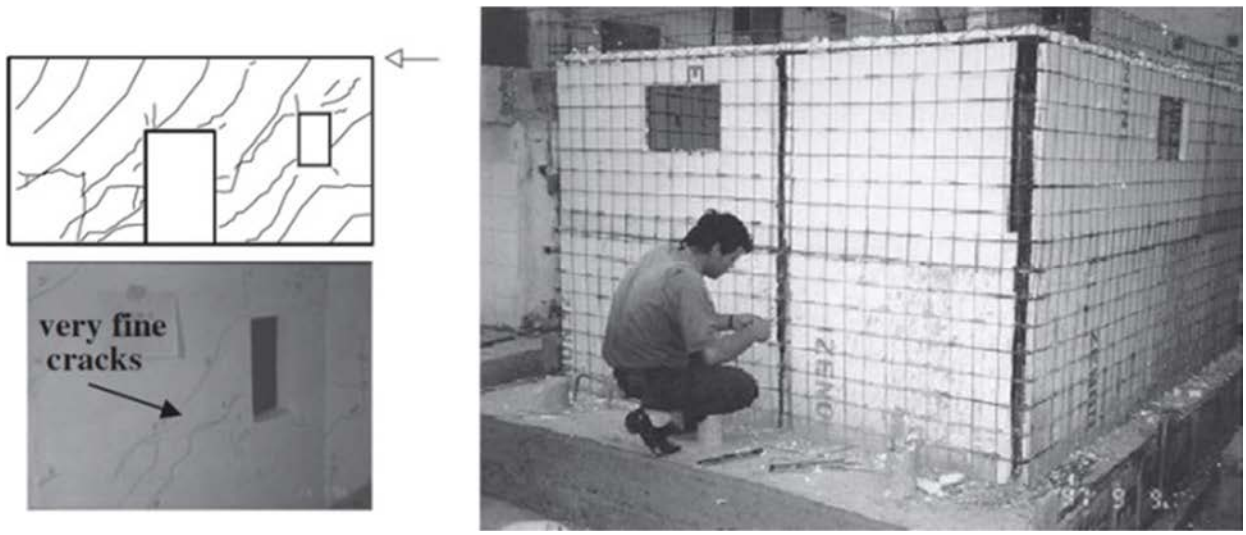
آزمایش شماره ده: نتایج آزمایش‌ها و مطالعات انجام شده توسط مورتاگ و کارادوگان [۹]، بر روی ساختمان یک طبقه ساخته شده از پانل سه‌بعدی در مقیاس یک‌به‌دو با اعمال چهار برابر نیروهای طراحی لرزه‌ای با استفاده از جک‌های هیدرولیکی نشان می‌دهد:

۱. مش استفاده شده در طرفین دیوار نقش مؤثری در کاهش ترک‌های برشی دارد.
۲. علی‌رغم اعمال نیروهایی معادل چهار برابر نیروهای طراحی لرزه‌ای، هیچ شکست موضعی جدی رخ نداده و تنها ترک‌های ریز در سطح مشاهده گردید (شکل ۱۰).
۳. هیچ ترکی در اتصالات دیواربه‌دیوار یا دیوار به سقف رخ نداد.
۴. هیچ‌گونه جدایی بین دولایه دیوار مشاهده نگردید.

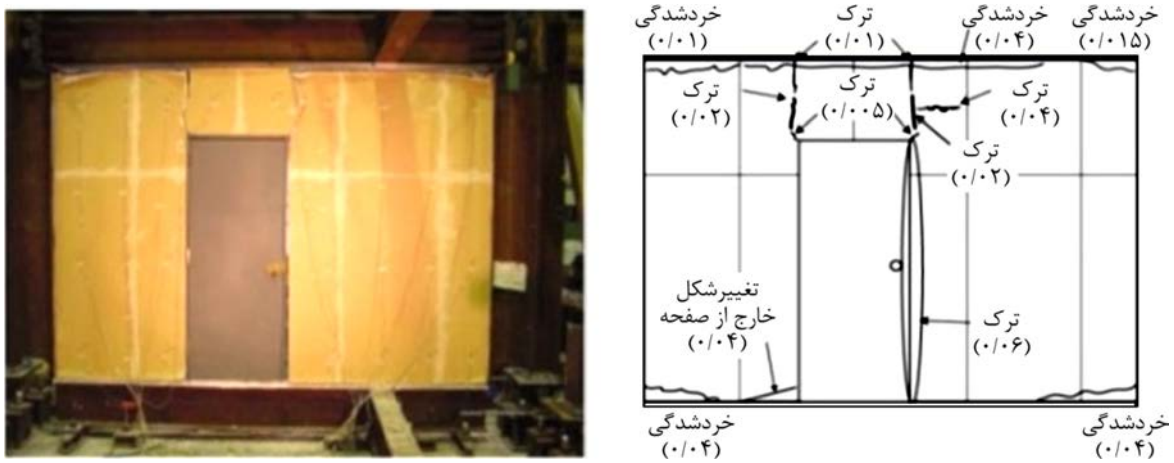
۴-۲-۲- نتایج آزمایش لرزه‌ای دیوارهای خشک

آزمایش شماره یازده: نتایج آزمایش‌های انجام شده توسط لی و همکاران [۱۰]، بر روی دیوار خشک با استفاده از جک‌های هیدرولیکی نشان می‌دهد:

۱. خسارات در پانل‌های گچی که در فشار واقع می‌شوند، رخ می‌دهد و شامل له شدن پانل‌های گچی، ترک در پانل‌های گچی، ترک در درزها و تغییر شکل خارج از صفحه پانل‌ها می‌شود.
۲. خسارات وارد بر دیوار خشک، درجایی متمرکز می‌گردد که ستون، تیر یا اِستادها به دلایل فرمی مانند بازشو یا دیوار متقاطع ثابت شده و حرکات دیوار را محدود کرده باشد.
۳. چنانچه بازشویی در دیوار پیش‌بینی نگردیده و دیواری در تقاطع با آن وجود نداشته باشد و در نتیجه امکان لغزش پارتیشن وجود داشته باشد تا تغییر مکان‌های بالاتری دیوار دچار آسیب نخواهد شد. در این شرایط خسارت‌ها در مرزهای دیوار به‌ویژه در چهارگوشه‌ی دیوار رخ داده، درحالی‌که بخش‌های داخلی خسارات کمتری می‌بینند. متوسط کرنش مرزها بیش از دو برابر بخش‌های داخلی است و کرنش گوشه‌ها ۵۰٪ بیش از مرزهاست.
۴. در صورت وجود در، کل پارتیشن به سه بخش مجزا تقسیم شده و دوباره کرنش گوشه‌ها نسبت به سایر بخش‌ها بالاتر و کرنش مرزها نسبت به بخش‌های داخلی بالاتر می‌باشد (شکل ۱۱).



شکل (۱۰): *نمونه مورد آزمایش از پانل سه‌بعدی در سمت راست شکل و مشاهده‌ی ترک‌های ریز پس از انجام آزمایش در سمت چپ شکل [۹].*

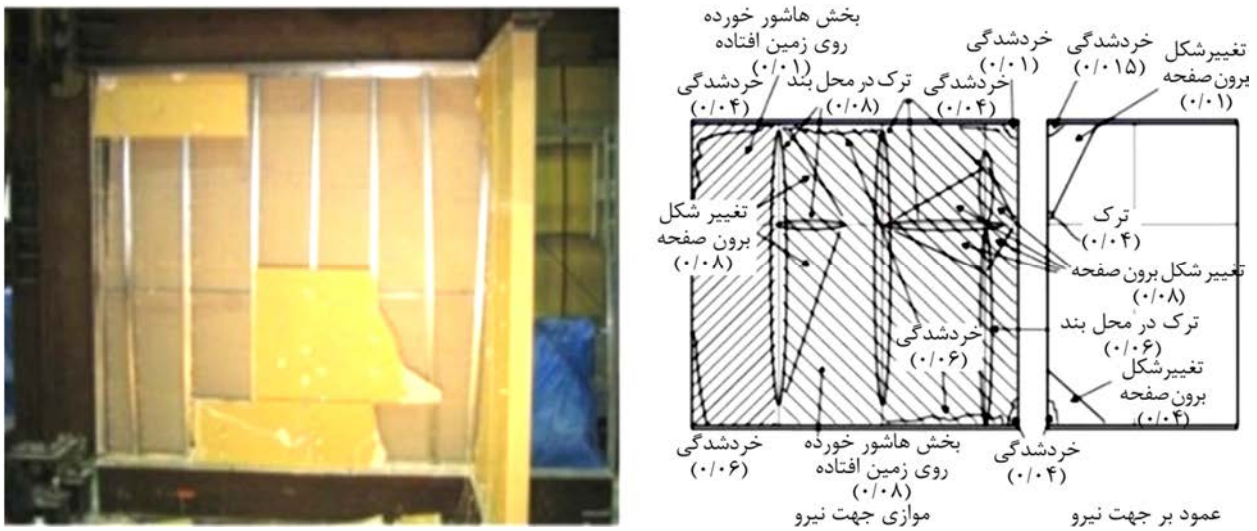


شکل (۱۱): *نحوه‌ی توزیع خسارات در دیوار با بازشو [۱۰].*

۵. در صورت تقاطع پارتیشن با پارتیشن متعامد، کرنش متوسط در پارتیشن موازی دو برابر پارتیشن عمودی خواهد بود، آسیب‌های وارده در نزدیکی تقاطع دیوارها بیشتر بوده و مشابه موارد فوق، آسیب بخش‌های مرزی بیشتر از بخش‌های میانی خواهد بود. در این شرایط دیوار تحت تغییر مکان کمتری نسبت به نمونه‌های فوق دچار آسیب می‌گردد (شکل ۱۲).

۴-۲-۳- نتایج آزمایش لرزه‌ای پانل کامپوزیت معدنی فوق سبک

آزمایش شماره دوازده: این پانل توسط تابش‌پور*، در انواع شرایط، شامل دیوار پرکننده، دیوار باربر و تیغه به دو صورت با و بدون بازشو تحت نیروهای درون‌صفحه‌ای و برون‌صفحه‌ای آزمایش شده است. در جهتی که دیوار تحت نیروهای برون‌صفحه‌ای قرار می‌گیرد، انواع نماها و جزئیات نازک‌کاری شامل سنگ پلاک با اسکوپ، سنگ پلاک بدون اسکوپ، کاشی با چسب، کاشی با دوغاب، اندود سیمان، اندود گچ و انواع زیرسازی شامل توری منگنه شده، ورق XPS و اجرای نما به‌طور مستقیم روی پانل پیش‌بینی گردیده است (شکل ۱۳). نمونه‌ی ساخته شده در چهار مرحله به ترتیب تحت شتاب ۰/۲g، ۰/۳۵g، ۰/۵g، ۰/۷g قرار گرفت که در آخرین مرحله شتاب معادل دو برابر بیشینه شتاب طراحی بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ می‌باشد:



شکل (۱۲): *نحوه توزیع خسارات در دیوارهای متعامد [۱۰].*

شکل (۱۳): *نمونه‌ی مورد آزمایش برای پانل‌های کامپوزیت معدنی فوق سبک تحت نیروهای درون و برون‌صفحه‌ای به دو صورت با و بدون بازشو و با انواع نما و زیرسازی.*

۱. از مرحله‌ی ۰/۳۵g پوسته‌ای شدن روکش گچ به‌صورت مختصر در فواصل ۵ سانتی‌متری از کنج دیوارهایی که تحت نیروهای درون‌صفحه‌ای قرار داشتند و به‌صورت میانقاب عمل می‌کردند آغاز گردید و تا انتهای آزمایش تحت شتاب ۰/۷g اندکی عمیق‌تر شد (شکل ۱۴).

۲. در مرحله‌ی شتاب ۰/۷g، در میانه دیواری که به‌صورت تیغه تحت نیروهای برون‌صفحه‌ای قرار داشت یک ترک افقی سرتاسری پدیدار شد (شکل ۱۵).

۳. تا مرحله‌ی پایانی در سایر قسمت‌هایی که تحت نیروهای درون و برون‌صفحه‌ای قرار گرفته بودند، هیچ‌گونه آسیبی مشاهده نگردید. حتی علی‌رغم این که در اجرای بازشوها در هر دو حالت درون و برون‌صفحه‌ای، تیر نعل درگاه و قاب کاذب پیرامون پنجره اجرا نشده بود، هیچ نوع خسارت و ترکی ایجاد نگردید.

شکل (۱۴): *ترک‌های کنج در گوشه‌های فوقانی و تحتانی دیوار تحت نیروهای درون‌صفحه‌ای در مرحله‌ی شتاب ۰/۷g.*

شکل (۱۵): *ترک افقی سرتاسری در میانه‌ی تیغه تحت نیروهای برون‌صفحه‌ای در مرحله‌ی شتاب ۰/۷g.*

۴. عملکرد انواع مصالح نما، جزئیات اجرایی آن و چسبندگی بین نما و پانل‌ها تا آخرین مرحله بسیار مطلوب بود.

۵- نتیجه‌گیری

نتیجه‌ی مطالعات صورت گرفته در خصوص ویژگی‌های مصالح رایج در ساخت دیوارها و آزمایش‌های لرزه‌ای صورت گرفته به‌خوبی نشان می‌دهد بلوک‌ها به‌خودی‌خود از یکپارچگی مطلوبی برخوردار نبوده و چنانچه کیفیت ملات، جزئیات و نحوه‌ی اجرای آنها مطلوب نباشد، هم در برابر نیروهای درون‌صفحه‌ای و هم در برابر نیروهای برون‌صفحه‌ای بسیار آسیب‌پذیرند. ولی پانل‌ها با توجه به یکپارچگی ذاتی و جزئیات پیش‌بینی‌شده در اتصال آنها به سازه پیرامون از رفتار مطلوب‌تری در برابر نیروهای جانبی برخوردارند. در مقابل بلوک‌ها نیاز به نیروی کار متخصص نداشته و در همه‌ی مناطق در دسترس هستند درحالی‌که پانل‌ها نیاز به نیروی کار متخصص داشته و همه‌جا در دسترس نیستند. بررسی‌های میدانی صورت گرفته در سطح شهر تهران به‌عنوان پایتخت کشور زلزله‌خیز ایران، بسیار نگران‌کننده است. اکثر پروژه‌ها با استفاده از بلوک‌ها و بدون رعایت هیچ‌گونه تمهیدی جهت افزایش یکپارچگی و ارتقای عملکرد درون‌صفحه‌ای و برون‌صفحه‌ای دیوارها اجرا می‌شوند. در این میان فراوانی ۵۰ درصدی بلوک‌های سفالی با توجه به تردی بالای این مصالح و روش‌های اجرای رایج از جمله عدم اجرای بندهای قائم، عدم اتصال دیوار به سازه، نسبت کم ضخامت به ارتفاع به‌ویژه در مورد تیغه‌های داخلی و عدم پیش‌بینی هیچ‌گونه مش یا لایه‌ی تقویتی اضافی جهت کاهش تردی دیوار بر میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها هم در برابر نیروهای درون‌صفحه‌ای و هم در برابر نیروهای برون‌صفحه‌ای زلزله می‌افزاید.

به‌عنوان دستاورد کاربردی پژوهش حاضر، اصول استخراج شده از آزمایش‌ها و مطالعات عددی انجام شده بر روی انواع مصالح دیوارها، در قالب چک‌لیستی در جدول (۴) ارائه شده است. این چک‌لیست به‌صورت ابزاری در اختیار مهندسین سازه و معماری قرار گرفته تا ضمن آگاهی از عملکرد لرزه‌ای مصالح انتخابی، تمهیدات لازم جهت ارتقای عملکرد لرزه‌ای در مراحل مختلف طراحی و اجرای ساختمان را بسته به شرایط پروژه به کار گیرند. بعلاوه این چک‌لیست مقایسه‌ای از میزان کارایی تمهیدات قابل اجرا جهت انتخاب بهینه‌ترین راه‌کارها با توجه به شرایط حاکم بر پروژه را در اختیار طراحان و مجریان قرار می‌دهد. نتایج پژوهش حاضر که بر پایه‌ی نتایج آزمایشگاهی و عددی تحقیقات قبلی استوار است، به‌خوبی نشان می‌دهد علی‌رغم ساختار یکپارچه‌تر پانل‌ها و اطمینان بیشتر از عملکرد لرزه‌ای آنها، بسته به شرایط پروژه با پیش‌بینی تمهیدات ویژه می‌توان عملکرد لرزه‌ای دیوارها شامل انواع بلوک‌ها و پانل‌ها را ارتقا بخشید. بدیهی است هر چه ویژگی‌های ذاتی مصالح و اتصالات بین اجزا مطلوب‌تر باشد، تمهیدات مورد نیاز کمتر و اطمینان از رفتار لرزه‌ای دیوار بیشتر خواهد بود.

قدردانی

از شرکت تعاونی دانش‌بنیان بنای رسیس، جهت دعوت در جلسه‌ی آزمایش میز لرزان پانل کامپوزیت معدنی فوق سبک و در اختیار قرار دادن عکس‌ها و مستندات مربوطه تشکر می‌شود.

جدول (۴): *نتایج حاصل از آزمایش‌های لرزه‌ای انواع بلوک‌ها و پانل‌ها جهت ارتقای کیفیت ساخت دیوارها.*

	مصالح دیوارها	نتایج حاصل از آزمایش‌های لرزه‌ای
بلوک‌ها	آجر فشاری	- هر اقدامی جهت افزایش مقاومت کششی دیوار پرکننده - آجر سفال سوراخ‌دار، دارای بیشترین درصد افزایش مقاومت قاب از میان مصالح این گروه - کاهش اثر مقاومت فشاری بلوک سفال در مقاومت قاب پرشده با افزایش یا تکرار بار جانبی به دلیل رفتار ترد مصالح - تأثیر میانقاب بلوک سفال بر سختی اولیه و عدم تأثیر قابل‌توجه در مقاومت نهایی به دلیل شکست سریع - رفتار لرزه‌ای مطلوب‌تر بلوک با دانه‌های سبک در مقایسه با بلوک سفال علی‌رغم مقاومت فشاری کمتر
	آجر سفال	- اهمیت زنجابی کردن آجر و نگهداری از ملات در افزایش مقاومت دیوار - تأثیر نازک‌کاری در افزایش یکپارچگی، مقاومت، سختی و ظرفیت جذب انرژی قاب پر شده - پر کردن درز بین دیوار و قاب جهت افزایش مشارکت دیوار در باربری جانبی
	بلوک سفال	- سختی و ظرفیت برش درون‌صفحه‌ای بالاتر دیوار با بند قائم در مقایسه با دیوار بدون بند قائم - کاهش مقاومت و سختی برون‌صفحه‌ای دیوار در اثر حذف بند قائم - تغییر رفتار خمش دوطرفه‌ی دیوار از رفتار نسبتاً ترد به رفتار با شکل‌پذیری بالا در اثر حذف بند قائم - تأثیر تسلیح دیوار در افزایش مقاومت درون‌صفحه‌ای و برون‌صفحه‌ای میانقاب - تأثیر آرماتور افقی بین بندها در افزایش مقاومت میانقاب
	بلوک با دانه‌های سبک	- مود شکست به‌صورت سازه‌ی طره‌ای در خصوص دیوار غیرمسلح و دیوار مسلح با آرماتور بین رگ‌ها و مود شکست به‌صورت دال در خصوص دیوار با مش خارجی در برابر نیروهای برون‌صفحه‌ای - مناسب‌ترین موقعیت آرماتور جهت افزایش مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت برشی و شکل‌پذیری به‌صورت شبکه مش خارجی - تأثیر بیشتر مقاومت ملات مصرفی در مقایسه با آرماتور افقی بین بندها در مقاومت ترک‌خوردگی دیوار - تأثیر تیر کمرکش در افزایش مقاومت میانقاب - مقاومت نهایی بالاتر میانقاب با پوشش بتنی در مقایسه با میانقاب با هسته بتنی - افزایش مقاومت میانقاب و مقاومت ترک‌خوردگی با افزایش محصورشدگی گوشه‌ها - تأثیر ضخامت یا ضریب لاغری دیوار و اتصالات پیرامونی بر ظرفیت تغییر شکل، مقاومت و سختی خارج از صفحه‌ای دیوار - ایجاد مکانیسم قوسی در برابر نیروهای برون‌صفحه‌ای حتی از طریق درزهای نیمه پر شده بین دیوار و تیر - اهمیت بالاتر شرایط مهارهای پیرامونی در مقایسه با ضخامت دیوار در ظرفیت تغییر شکل برون‌صفحه‌ای - ظرفیت برون‌صفحه‌ای بیشتر دیوار پرکننده با اتصال میلگرد در مقایسه با دیوار با اتصال آجر مورب بدون درز - تأثیر ارتفاع ساختمان بر مقاومت خارج از صفحه‌ای دیوار - رفتار باثبات‌تر و ظرفیت تغییر شکل بیشتر دیوار محصور در مقایسه با دیوار پر کننده
	بلوک بتنی سبک	- پتانسیل مطلوب بلوک‌های بتنی سبک از لحاظ مقاومت در برابر زلزله - زلزله در هر دو حالت سازه‌ای و غیر سازه‌ای - افزایش مقاومت و سختی بدون کاهش ظرفیت تغییر مکان قاب - مشارکت بلوک‌های بتنی سبک به دلیل قابلیت تغییر شکل بالا، تا حد نهایی فروپاشی قاب - عدم تأثیر تسلیح دیوار پر کننده بر سختی قاب پر شده - افزایش ظرفیت تغییر مکان و شکل‌پذیری و کاهش خسارات لرزه‌ای قاب در اثر مسلح نمودن دیوار
پانل‌ها	پانل سه‌بعدی	- عدم شکست موضعی جدی و تنها وقوع ترک‌های ریز در برابر نیروهای بالاتر از سطح طراحی - نقش مؤثر مش طرفین دیوار در کاهش ترک‌های برشی - پیوستگی مطلوب دو لایه دیوار
	دیوار خشک	- رفتار لرزه‌ای بسیار مطلوب - خسارات در پانل‌های گچی تحت فشار به‌صورت له شدن و ترک پانل، ترک درزها و تغییر شکل خارج از صفحه پانل - تمرکز خسارت در محل‌هایی که ستون، تیر یا اِستادها به دلایل فرمی مانند بازشو یا دیوار متقاطع ثابت‌شده و حرکات دیوار را محدود می‌کند. - وقوع خسارت در پانل‌ها به ترتیب در گوشه‌ها، مرزها، میانه‌ی دیوار
	پانل کامپوزیت معدنی فوق سبک	- رفتار بسیار مطلوب پانل به‌صورت دیوار پرکننده و دیوار باربر تحت نیروهای درون‌صفحه‌ای و برون‌صفحه‌ای تا دو برابر بیشینه شتاب طراحی بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ - رفتار بسیار مطلوب پانل به‌صورت تیغه تحت نیروهای درون‌صفحه‌ای و برون‌صفحه‌ای تا ۱/۴ برابر شتاب طراحی بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ - عدم نیاز به اجرای تیر نعل درگاه برای بازشوها و قاب کاذب پیرامون پنجره، حتی در برابر نیروهای لرزه‌ای - اتصال و چسبندگی مطلوب بین پانل با انواع مصالح و جزئیات اجرایی گوناگون نما

مراجع

۱. تابش‌پور، محمدرضا (۱۳۹۳) معرفی روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی (Analytical Hierarchy Process, AHP) برای انتخاب دیوار مناسب. مجموعه مقالات دومین سمینار بررسی سازه‌ای دیوارهای جداکننده، تهران، انجمن ایرانی مهندسان محاسب ساختمان، ۲۴۶-۲۴۱.

۲. مهدی، طارق، خرمی‌آذر، مریم و خلیلی‌جهرمی، کیان (۱۳۸۹) *بررسی انواع دیوارهای جداکننده و نحوه طراحی آنها*. گزارش تحقیقاتی شماره گ-۵۶۹، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.

۳. تابش‌پور، محمدرضا (۱۳۸۸) *دیوارهای پرکننده آجری در قاب‌های سازه‌ای*. نشر فدک ایساتیس، تهران.

۴. انواری، علی‌مسعود (۱۳۸۷) *تیغه‌های جداکننده داخلی در ساختمان‌سازی*. نشر کتاب دانشگاهی، چاپ هفتم، تهران.

۵. مخدومی، حامد و رهگذر، رضا (۱۳۸۹) بررسی سبک‌سازی بتن و افزودنی‌های آن- مزایا و کاربردها. مجموعه مقالات *کنفرانس بین‌المللی سبک‌سازی و زلزله*، جهاد دانشگاهی استان کرمان، جلد اول، ۵۰۸-۹۹.

۶. طراحی، محمدرضا (۱۳۸۹) مقاوم‌سازی و سبک‌سازی به‌وسیله بلوک‌های ایرکریت. مجموعه مقالات *کنفرانس بین‌المللی سبک‌سازی و زلزله*، جهاد دانشگاهی استان کرمان، جلد اول، ۷۴۶-۷۳۳.

7. Penna, A., Magenes, G., Calvi, G., and Costa, A. (2008) Seismic Performance of AAC Infill and Bearing Walls with Different Reinforcement Solutions. *14th International Brick and Block Masonry Conference*.

۸. گلابچی، محمود و مظاهریان، حامد (۱۳۹۱) *فناوری‌های نوین ساختمانی*. *انتشارات دانشگاه تهران*. چاپ سوم، تهران.

9. Mowrtage, W. and Karadogan, F. (2009) Behavior of Single-Story Lightweight Panel Building under Lateral Loads. *Journal of Earthquake Engineering*, **13**, 100-107.

10. Lee, T., Kato, M., Matsumiya, T., Suita, K., and Nakashima, M. (2007) Seismic performance evaluation of non-structural components: Drywall partitions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **36**(3), 367-382.

۱۱. معاونت تحقیق و توسعه شرکت تعاونی دانش‌بنیان بنای رسیس (۱۳۹۲) *پانل‌های سوپر سبک کامپوزیت مسلح معدنی؛ ایزی وال، فناوری نوین در صنعت ساختمان*. فدک ایساتیس، تهران.

12. Karadogan, F., Pala, S., Ilki, A., Yuksel, E., Mowrtage, W., Teymur, P., Erol, G., Taskin, K., and Comlek, R. (2009) Improved infill walls and rehabilitation of existing low-rise buildings. *Seismic Risk Assessment and Retrofitting*, Netherlands, 387-426.

۱۳. شاه‌نظری، محمدرضا (۱۳۷۶) *بررسی رفتار قاب‌های فولادی دربرگیرنده دیوارهای بنایی تحت تأثیر بارهای جانبی در تراز سقف*. پایان‌نامه دکتری در رشته مهندسی سازه، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

14. Paulo, M.F., Pereira, M.F., Ferreira, J.E., and Lourenço, P.B. (2011) Behavior of masonry infill panels in RC frames subjected to in plane and out of plane loads. *7th International Conference AMCM*, Kraków, Poland.

15. Kaltakci, M.Y., Koken, A., and Korkmaz, H.H. (2008) An experimental study on the behavior of infilled steel frames under reversed-cycling loading. *Iranian Journal of Science and Technology*, **32**(B2), 157-160.

۱۶. مقدم، حسن، محمدی قاضی محله، مجید و خلیلی جهرمی، کیان (۱۳۸۹) *بررسی کارایی میانقاب مرکب برای تقویت لرزه‌ای ساختمان*. گزارش تحقیقاتی شماره گ-۵۵۵، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.

۱۷. پارسا، فرزاد و سروقد مقدم، عبدالرضا (۱۳۸۷) بررسی

آزمایشگاهی عملکرد میانقاب‌های مصالح بنایی در قاب‌های بتنی. نشریه دانشکده فنی، (۶)**۴۲**، ۶۹۰-۶۸۱.

18. Tu, Y.H., Chuang, T.H., Liu, P.M., and Yang, Y.S. (2010) Out-of-plane shaking table tests on unreinforced masonry panels in RC frames. *Engineering Structures*, 32, 3925-3935.
19. Ming, L., Yun, Ch., and Xiaowei, L. (2011) Shaking table test on out-of-plane stability of infill masonry wall. *Transactions of Tianjin University*, **17**(2), 125-131.
20. Kakaletsis, D.J. and Karayannis, C.G. (2008) Influence of masonry strength and openings on infilled R/C frames under cycling loading. *Journal of Earthquake Engineering*, **12**(2), 197-221.
21. Maheri, M.R., Motielahi, F., and Najafgholipour, M.A. (2011) The influence of mortar head joints on the in-plane and out-of-plane seismic strength of brick masonry walls. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil and Environmental Engineering*, **35**(C1), 63-79.

* این آزمایش توسط معاونت تحقیق و توسعه شرکت تعاونی دانش‌بنیان بنای رسیس به راهنمایی و تحت نظارت دکتر محمدرضا تابش‌پور استادیار دانشگاه صنعتی شریف و در آزمایشگاه میز لرزان دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شریف در شهریور ماه ۱۳۹۳ انجام گردیده است.

اصطلاحات فنی

۱- آجر فشاری	Pressed Bricks
۲- آجر سفال	Perforated Clay Bricks
۳- بلوک سفال	Hollow Clay Blocks
۴- بلوک با دانه‌های سبک	Concrete Blocks with Light Weight Aggregate
۵- بلوک بتنی سبک	Light Weight Concrete Blocks (AAC)
۶- پانل‌های سه بعدی	3D Panels
۷- دیوار خشک	Dry Wall
۸- پانل کامپوزیت معدنی فوق سبک	Ultralight Mineral Composite Panel
۱۱- مکانیسم قوسی	Arching Mechanism
۹- مقاومت درون صفحه‌ای	In-Plane Strength
۱۰- مقاومت برون صفحه‌ای	Out-of-Plane Strength