

# بررسی رفتار پانل‌های ساندویچی با مصالح شاتکریتی کم‌سیمان

سحر صفری (دانشجوی کارشناسی ارشد)

امید رضایی‌فر\* (دانشیار)

مجید قلعه‌کی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

مهندسی عمران شهریه، زمستان ۱۴۰۰  
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۱/۴، ص. ۳۹-۴۶، (پژوهشی)

saharsafari@semnan.ac.ir  
orezayfar@semnan.ac.ir  
mgholhaki@semnan.ac.ir

در عصر حاضر، به افزایش سرعت و کاهش استفاده از آلاینده‌ها بیشتر از قبل توجه شده است. سازه‌های پیش‌ساخته ضمن افزایش سرعت ساخت و ساز، باعث صرفه‌جویی در زمان و منابع نیز می‌شوند. در مطالعه‌ی حاضر، از ترکیب سازه‌های پیش‌ساخته به همراه بتن‌ویت استفاده شده است. بتن‌ویت از جمله پوزولان‌هایی است که به راحتی استخراج می‌شود و از سیمان، هزینه‌ی تولید کمتری دارد. به این منظور از طرح اختلاط مبتنی بر بتن‌ویت استفاده و رفتار رفت و برگشتی بر روی ۶ نمونه بررسی شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، نمونه‌ی ساخته شده از بتن‌ویت ۹۲٪ بار نهایی، ۴۳٪ انرژی جذب شده و ۶۱٪ سختی نمونه‌ی شاهد را به دست آورده و به میزان ۴۳٪ شکل‌پذیرتر از نمونه‌ی شاهد بوده است. در پایان می‌توان گفت که نمونه‌ی ساخته شده از بتن‌ویت، مقاومت قابل قبولی در برابر نمونه‌های سیمان تولید و به خوبی انرژی سازه را جذب می‌کند.

واژگان کلیدی: پانل ساندویچی، ظرفیت باربری، رفتار برشی، شاتکریت، سیمان.

## ۱. مقدمه

دیوارها به دو دسته دیوارهای برشی بلند و کوتاه تقسیم می‌شوند: در دیوارهای برشی کوتاه، مقدار ارتفاع به طول کمتر از ۲ است و ظرفیت آنها به صورت برشی بیان می‌شود. دیوارهای برشی کوتاه، از نظر خمش مشکل خاصی ندارند و در مقابل خمش وارد، مقاوم هستند و آرماتورهای افقی و قائم برشی از عوامل مهم‌اند و باید توسط طراح کنترل شوند. اما در دیوارهای برشی بلند، مقدار نسبت ارتفاع به طول بیش از ۲ و به جای برش، خمش عامل تعیین‌کننده است. خاطرنشان می‌شود به غیر از عامل اخیر، عواملی از قبیل: نحوه‌ی توزیع میلگرد در دیوار، ضخامت دیوار و شرایط مرزی دیوار در نحوه‌ی رفتار دیوارهای برشی مؤثر هستند. به طور کلی مقاومت دیوارهای برشی تحت اثر بارهای یک‌طرفه حدود ۷٪ بیشتر از مقاومت آنها تحت تأثیر بار رفت و برگشتی است، که این اختلاف را می‌توان ناشی از خستگی آرماتورهای مقطع دانست.<sup>[۱]</sup>

مطالعات صورت گرفته حاکی از آن است که سیستم ساختمانی تشکیل شده از پانل‌های سه‌بعدی نیمه‌پیش‌ساخته، نسبت به زلزله‌های با بسامد بالا حساسیت بیشتری دارند، که دلیل این اتفاق هم سختی زیاد سیستم است.<sup>[۲]</sup> از طرفی سیستم پانل سه‌بعدی به دلیل صلبیت بالا می‌تواند به طور عمده در ناحیه‌ی خطی مقاومت کند و تحمل کافی در برابر بار لرزه‌یی با شدت متوسط داشته باشد.<sup>[۵]</sup> از جمله ویژگی‌هایی که باعث مقاومت مذکور شده است، می‌توان به مقاومت اضافی زیاد، وقوع تغییرشکل‌های غیرکشسان و در نتیجه استهلاک انرژی و در نهایت تغییرمکان بسیار کم در سینه هنگام اعمال لرزه اشاره کرد.<sup>[۶]</sup> در مطالعات عددی صورت گرفته، بررسی رفتار خمشی پانل‌های ساندویچی با استفاده از حل ریاضی بوده است، که

پانل ساندویچی از دو لایه شبکه‌ی فازی مش در طرفین و یک لایه فوم پلی‌استارین گندسوز در وسط تشکیل شده است. به طوری که سه لایه‌ی مذکور توسط مفتول‌های جانبی به یکدیگر متصل شده‌اند. در سیستم اخیر، چون دیوارها و سقف به صورت یکپارچه و به شکل باکس است، بنابراین توزیع بارها و مقاومت در برابر نیروهای خارجی به ویژه زلزله، تقریباً یکنواخت و همگن است. بر اساس مشخصات سازه‌ی پانل ساندویچی، می‌توان آن را یکی از مقاوم‌ترین مصالح ساختمانی نامید.

همان‌طور که می‌دانیم، چنانچه به خواهیم سازه هم نیروهای بزرگ حاصل از زلزله را تحمل کند و هم مقرون به‌صرفه نیز باشد، باید در هنگام اعمال نیروهای زلزله از محدودی ارتجاعی خود بگذرد و وارد قلمرو رفتار غیرارتجاعی خود شود. به عبارت دیگر، سازه مقاومتی کمتر از مقاومت نیاز (مقاومت متناسبی در سازه که برای زلزله‌ی طرح مورد نیاز است) داشته باشد، اما در عوض با پذیرش تغییرشکل و تغییرمکان‌های زیاد با ورود به رفتار غیرارتجاعی قادر باشد بخش قابل توجهی از انرژی ورودی ناشی از زلزله را مستهلک کند. چنین سازه‌یی یک سازه‌ی شکل‌پذیر است.<sup>[۱] [۲]</sup>

بررسی و مطالعات پیشین در مورد رفتار لرزه‌یی دیوارهای برشی معمولی، که طبق ضوابط معمولی آیین‌نامه طرح شده باشد، نشان می‌دهد که از لحاظ رفتاری،

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۹/۸/۲۵، اصلاحیه ۱۴۰۰/۳/۸، پذیرش ۱۴۰۰/۴/۵

DOI:10.24200/J30.2021.56800.2858

## ۲. روش آزمایشگاهی

پانل‌های ساخته شده در آزمایش حاضر، شامل دیوارهای پانلی با مقیاس کامل و یک ساختمان ۱ طبقه با مقیاس ۱:۲/۳۵ بوده‌اند. پانل‌های واقعی دارای ابعاد  $۲/۶۵ \times ۲$  متر و عرض ۱۴ سانتی‌متر بودند، که از ۲ عدد پانل دیواری به عرض ۱ متر استفاده و به وسیله‌ی میلگرد حرارتی  $\phi ۶$  به طول ۵۰ سانتی‌متر با فاصله‌ی ۴۰ سانتی‌متر به یکدیگر متصل شده‌اند. جهت اتصال دیوار به آرماتورهای انتظار پی از میلگرد حرارتی U شکل استفاده شد، که در مقطع بالای دیوار نیز قرار داشتند. در نمونه‌های مذکور، شبکه‌ی آرماتور از جنس مفتول گالوانیزه با چشمه‌ی  $۸ \times ۸$  سانتی‌متر بر روی پانل پلی‌استایرن به ضخامت  $۱۴\text{cm}$  قرار گرفته است. فولاد به کار برده شده در آزمایش اخیر از دو نوع میلگرد و شبکه‌ی آرماتور در پانل‌ها بوده و ساخت شبکه‌های اخیر مطابق با آیین‌نامه‌ی ASTM A۸۲ صورت گرفته است.

در ساختمان ۱ طبقه از پانل‌هایی به ابعاد  $۱/۲۰ \times ۰/۶$  متر و عرض ۵ سانتی‌متر استفاده شده و در آن، در یک سمت دو بازو به ابعاد  $۲/۴ \times ۲/۴$  سانتی‌متر و در سمت دیگر یک بازو به ابعاد  $۶/۵ \times ۶/۵$  سانتی‌متر قرار داشته است. همچنین یک بازو به عنوان درب به ابعاد  $۱ \times ۰/۵$  متر در نظر گرفته شده بود. سقف سازی ذکر شده نیز از نوع پانلی به ابعاد  $۱/۱ \times ۱/۱$  سانتی‌متر و دیوار داخلی آن نیز به طول ۰/۵۵ متر بوده است. شبکه‌ی آرماتور استفاده شده در نمونه‌ی اخیر از جنس مفتول گالوانیزه با چشمه‌ی  $۲ \times ۲$  سانتی‌متر بوده است. در شکل ۱، نمایی از سازه‌های ساخته شده مشاهده می‌شود.

همچنین در شکل ۲، نحوه‌ی اتصال دیوارهای پانلی به میلگردهای انتظار پی مشاهده می‌شود:

در شکل‌های ۳ و ۴، نیز جزئیات آرماتورهای مقطع طولی و عرضی پانل‌های با مقیاس واقعی مشاهده می‌شود:

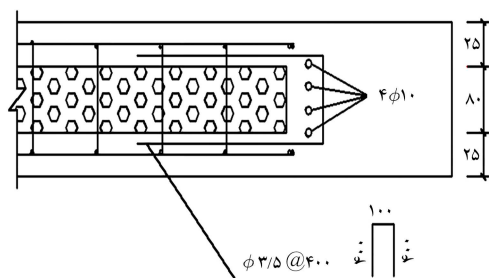


ب) دیوار پانلی.



الف) سازه یک طبقه؛

شکل ۱. نمایی از سازه‌های ساخته شده.



شکل ۲. نحوه‌ی اتصال دیوار به مهار جانبی (ابعاد به میلی‌متر).

با فرض عملکرد نیمه‌کامپوزیتی و با استفاده از گسترش معادله‌ی دیفرانسیل خمش، حل ریاضی رفتار خمشی پانل‌های ساندویچی انجام شده است. با مقایسه‌ی حل ریاضی ارائه شده با مدل اجزاء محدود روشن شد که مدل ریاضی ارائه شده، دقت بالایی دارد.<sup>[۷]</sup> از پژوهش‌های انجام شده در این زمینه می‌توان به تفسیر پاسخ میز لرزان ساختمان ۳ طبقه‌ی ساخته شده از دیوارهای پانل ساندویچی بتنی پرداخت، که مشاهده‌های به دست آمده از آزمایش مذکور نشان می‌دهد که تحت اعمال تحریک دینامیکی پاسخ سازه، میزان قابل توجهی برتری به نسبت نتیجه‌های مورد انتظار از مطالعات قبلی شبه‌استاتیکی که بر روی نمونه‌های ۱ طبقه و ساده انجام شده است، به دست آمده است.<sup>[۹]</sup> آزمایش دیگری با میز لرزان انجام شده است، که یک ساختمان با مقیاس کوچک‌تر مدل شده است که بر اساس نتایج آن، قالب رفتار ساختمان به صورت برشی است، که به دلیل رفتار نسبتاً شکننده‌ی ساختمان است.<sup>[۱۰]</sup> همچنین رفتار دینامیکی ساختمان‌های پانلی ۶ طبقه‌ی بررسی شده و تغییرمکان طبقات، نیروی برشی اعمال شده بر آنها و انرژی جذب به وسیله‌ی نمونه‌ی مورد بررسی در بخش‌های خطی و غیرخطی محاسبه شده است.<sup>[۱۱]</sup>

از دیگر مطالعات انجام شده، ارزیابی رفتار لرزه‌ی ساختمان نیمه پیش‌ساخته‌ی پانلی بر روی میز لرزان است، که یک نمونه ساختمان ۱ طبقه با استفاده از پانل‌های دیواری و سقفی آماده و بر روی میز لرزان مطالعه شده است. همچنین به جهت ارزیابی بهتر عملکردی این‌گونه سازه‌ها، آنالیز اجزاء محدود صورت گرفته است. با توجه به نتایج به دست آمده سازه‌های نیمه پیش‌ساخته با پانل‌های ساندویچی به دلیل سختی زیاد سیستم‌های مذکور نسبت به زلزله‌هایی با بسامد بالا واکنش بیشتری دارند. آزمایش میز لرزان یک ساختمان ۴ طبقه با مقیاس آزمایشگاهی برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ی سازه‌های ساخته شده با پانل‌های پیش‌ساخته از دیگر مطالعات انجام شده است. با توجه به نتایج، در صورت اعمال بار زلزله به ساختمان ۴ طبقه‌ی پانلی، مکانیسم خرابی در طبقه‌ی اول مشاهده شده است، که بیشتر بازوها دچار ترک‌های مورب شده‌اند، که نیازمند میلگردهای تقویتی است. هنگامی که سیستم همچنان رفتاری خطی از خود نشان می‌دهد، ترک‌های اولیه ایجاد می‌شود. سیستم پانلی ۴ طبقه در برابر زلزله‌ی شدید، ایمنی و پایداری مناسب دارد. در انتهای بارگذاری، سختی سیستم نسبت به سختی اولیه، ۷٪ کاهش از خود نشان داده است.<sup>[۱۲ و ۱۳]</sup>

از دیگر پژوهش‌های مرتبط با این حوزه می‌توان به بررسی رفتار اتصال‌های I و T شکل دیوار به دیوار،<sup>[۱۴]</sup> گمی کردن عوامل عملکرد لرزه‌ی برای سازه‌ی ساخته شده از پانل سه‌بعدی،<sup>[۱۵]</sup> تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی محاسباتی و آزمایشگاهی پانل‌های سه‌بعدی بتن آرمه،<sup>[۱۶]</sup> بررسی عملکرد لرزه‌ی بتن پیش‌ساخته در سیستم دیوار باربر رفتار لرزه‌ی ساختمان نیمه پیش‌ساخته‌ی پانلی،<sup>[۱۷]</sup> مقایسه‌ی رفتار پانل‌های ساندویچی با پانل‌های معمولی در خمش و برش<sup>[۱۸]</sup> و بررسی مقایسه‌ی رفتار اجزاء سازه‌ی پانلی در حالت مستقل و سیستم،<sup>[۱۹]</sup> اشاره کرد.

مطالعات زیادی بر روی آزمایش میز لرزان برای انواع سازه‌های بتن مسلح با استفاده از مصالح بنایی،<sup>[۲۰]</sup> دیوارهای بنایی غیرمسلح و قاب بتنی ۳ طبقه،<sup>[۲۱]</sup> صورت گرفته است. از دیگر مطالعات انجام شده در این زمینه می‌توان به بررسی تیغه‌های موقتی و اجزاء غیرسازه‌ی آنها اشاره کرد.<sup>[۲۲ و ۲۳]</sup>

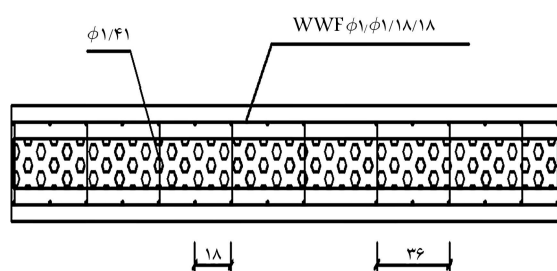
در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی پانل‌های سبک سه‌بعدی به صورت دیوار و سازه‌ی یک طبقه پرداخته شده است. بارگذاری بر روی نمونه‌ها به صورت رفت و برگشتی بوده و در بتن استفاده شده در سازه‌های ذکر شده، از بتن‌نیت استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات دیوارها.

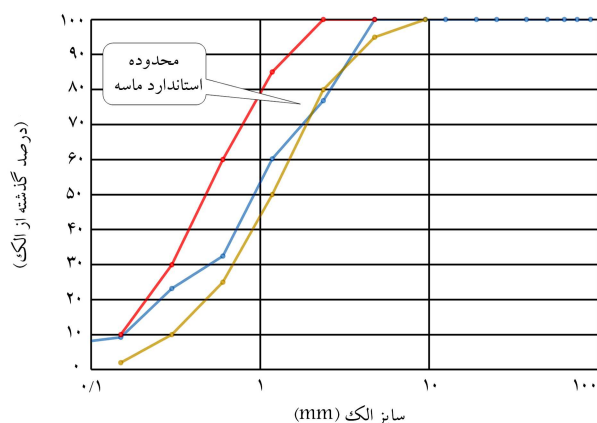
نام نمونه	ابعاد (متر)	تعداد	مشخصات دیوار
W1-CB22°	۲/۶۵ × ۲	۲	دیوار بتنی با عیار سیمان ۲۲° و بتونیت
W1-C40°	۲/۶۵ × ۲	۱	دیوار بتنی با عیار سیمان ۴۰°
W1-C22°	۲/۶۵ × ۲	۱	دیوار بتنی با عیار سیمان ۲۲°
W1-D	۲/۶۵ × ۲	۱	دیوار کاهگلی

جدول ۲. مشخصات طرح اختلاط‌های استفاده شده.

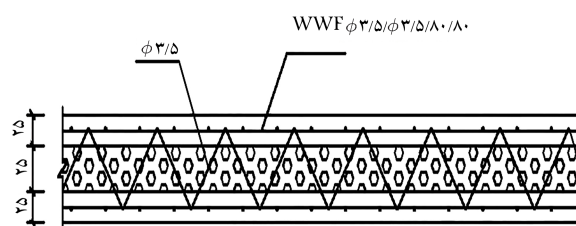
ردیف	نمونه	ماسه (kg)	آب (kg)	سیمان (kg)	بتونیت (kg)	شن (kg)	w/c
۱	°/۷۵CB22	۱۷۸۰	۱۶۵	۲۲۰	۱۳۵	--	°/۷۵
۲	°/۷۵C22°	۱۹۱۵	۱۶۵	۲۲۰	--	--	°/۷۵
۳	°/۵۵C40°	۸۴۰	۲۲۰	۴۰۰	--	۸۴۰	°/۵۵



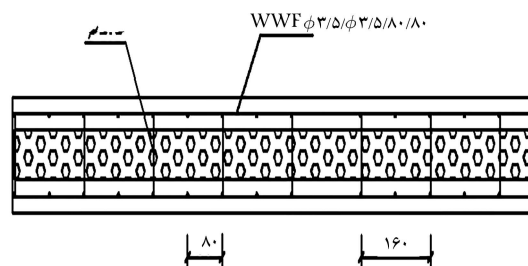
شکل ۶. مقطع عرضی پانل‌ها (ابعاد به میلی‌متر).



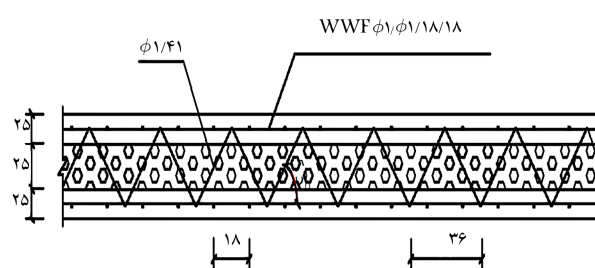
شکل ۷. منحنی دانه‌بندی ماسه.



شکل ۳. مقطع طولی پانل‌ها (ابعاد به میلی‌متر).



شکل ۴. مقطع عرضی پانل‌ها (ابعاد به میلی‌متر).



شکل ۵. مقطع طولی پانل‌ها (ابعاد به میلی‌متر).

مشخصات بتونیت استفاده شده مطابق جدول ۳ آمده است:

استاندارد کنترل دانه‌بندی ماسه، استاندارد ASTM-C33 بوده است، که باید در محدوده‌ی زیر الک ۴ قرار گیرد. برای کنترل استاندارد بودن ماسه‌ی آزمایش، توزیع دانه‌بندی بر روی آن انجام شد و سرانجام ماسه‌ی مورد نظر، که در محدوده‌ی مجاز از نوع شسته‌ی شکسته بود، برای انجام آزمایش‌های مرتبط انتخاب شد. در شکل ۷، نمودار منحنی ماسه‌ی استفاده شده مشاهده می‌شود:

ساختمان ۱ طبقه نیز با استفاده از مصالح پایه‌ی خاکی یعنی بتونیت ساخته شده و ضخامت بتن شانکریت شده‌ی آن از هر طرف ۱/۵ سانتی‌متر بوده است. این نمونه به نام S-CB22° نام‌گذاری شده است. نقشه‌ی مشخصات سازه‌ی اخیر در شکل ۸ مشاهده می‌شود:

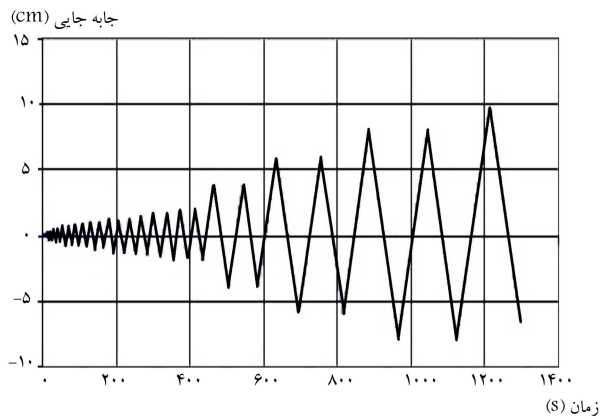
همچنین در شکل‌های ۵ و ۶، جزئیات آرماتورهای مقطع طولی و عرضی پانل‌های با مقیاس ۱:۲/۳۵ مشاهده می‌شود:

مشخصات دیوارها در جدول ۱ ارائه شده است:

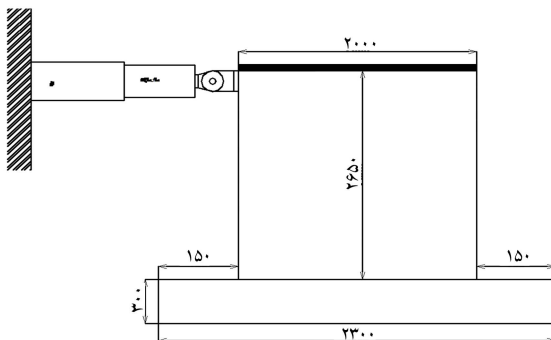
در مطالعه‌ی حاضر، ۳ نوع طرح اختلاط استفاده شده است، به نحوی که وزن مخصوص بتن  $2300 \frac{kg}{m^3}$  به دست آید. در جدول ۲، طرح اختلاط‌های استفاده شده ارائه شده است:

جدول ۳. مشخصات بتونیت استفاده شده.

آنالیز	میانگین
جذب آب (%)	۳۰۰-۷۰۰
تورم ( $ML/g^2$ )	۲۲-۲۵
رطوبت (%)	۴-۸
دانه‌بندی (Mesh)	۴۰۰
مونت موریلونیت (%)	۸۶۰
ظرفیت تبادل کاتیونی ( $meq/100\ mgr$ )	۱۰۰-۱۱۰



شکل ۹. نحوه‌ی اعمال بار به نمونه‌ها.

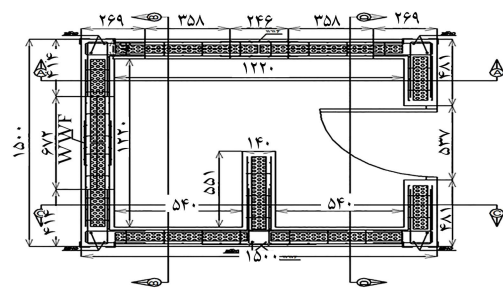


شکل ۱۰. نحوه‌ی استقرار نمونه‌ها.

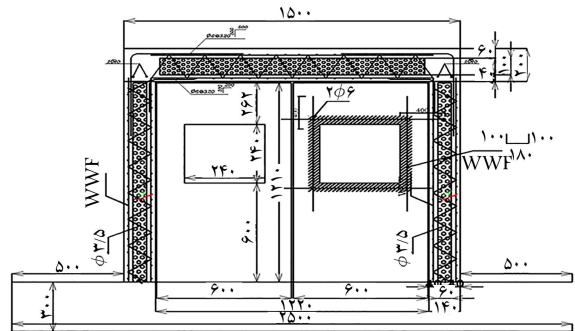
بارگذاری در پژوهش حاضر، به صورت رفت و برگشتی (سیکلیک) انجام شده است. روش کنترل تغییرمکان استاندارد ASTM جهت اعمال بار در داخل صفحه‌ی دیوار به کار برده شده است. به منظور اعمال بار به دیوار، در قسمت بالای دیوار یک صفحه به نبشی‌ها جوش داده شد. همچنین مطابق شکل ۹، بارگذاری به صورت متمرکز به دیوار اعمال شده است. نحوه‌ی استقرار نمونه و سیستم بارگذاری در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود:

### ۳. نتایج

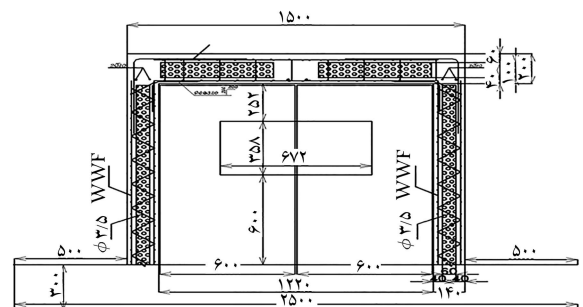
منحنی‌های هیستریزس نمونه‌ها در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. خلاصه‌ی نتایج ظرفیت باربری نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق نتایج به دست آمده، نمونه با عیار سیمان ۴۰۰ توانسته است بیشترین میزان باربری را کسب کند. نمونه‌هایی که در آنها از بتونیت استفاده شده است، مقاومت کمتری از نمونه‌هایی با عیار



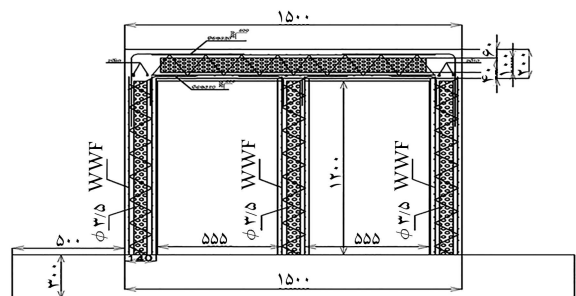
الف) پلان سازه



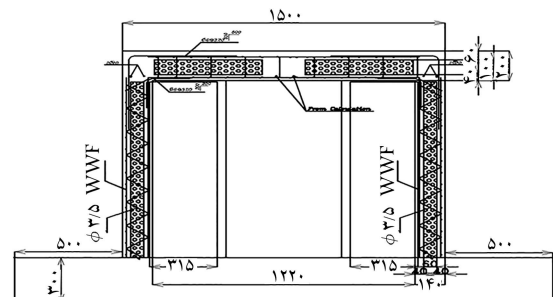
ب) مقطع A-A



ج) مقطع B-B

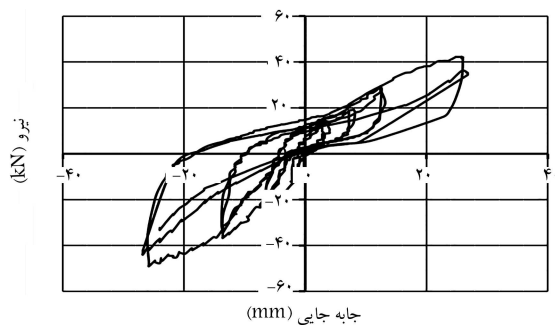


د) مقطع C-C

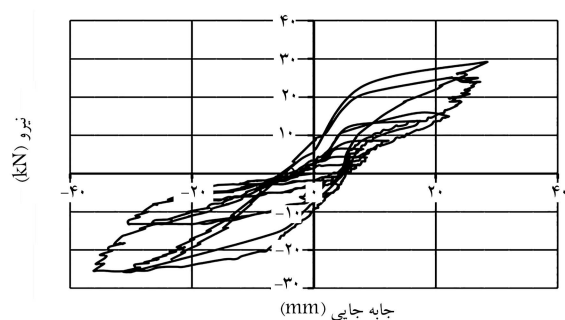


ه) مقطع D-D

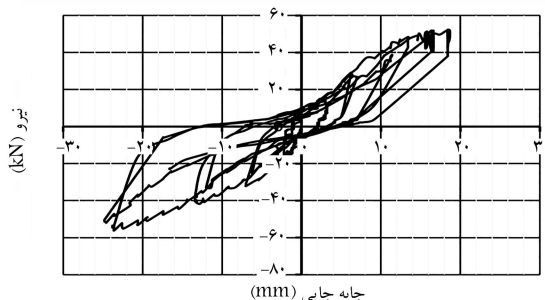
شکل ۸. مشخصات سازه‌ی ۱ طبقه.



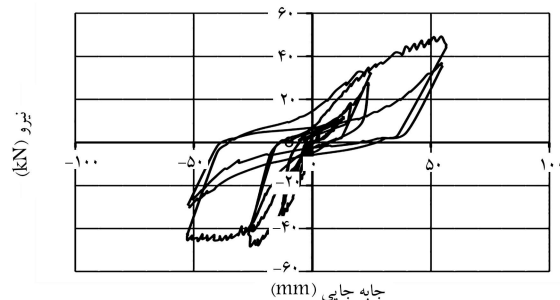
ب) منحنی هیستریزیس نمونه W2-CB220؛



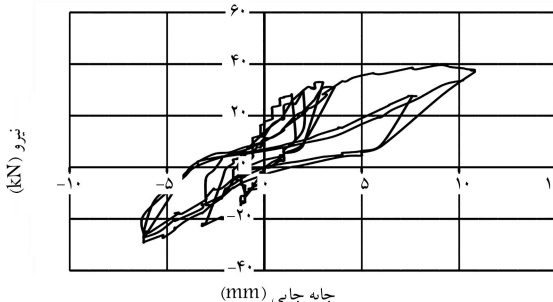
الف) منحنی هیستریزیس نمونه W1-CB220؛



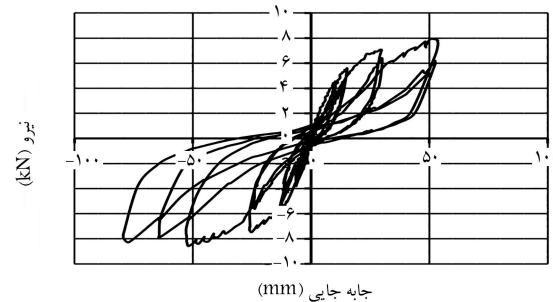
د) منحنی هیستریزیس نمونه W1-C400؛



ج) منحنی هیستریزیس نمونه W1-C220؛

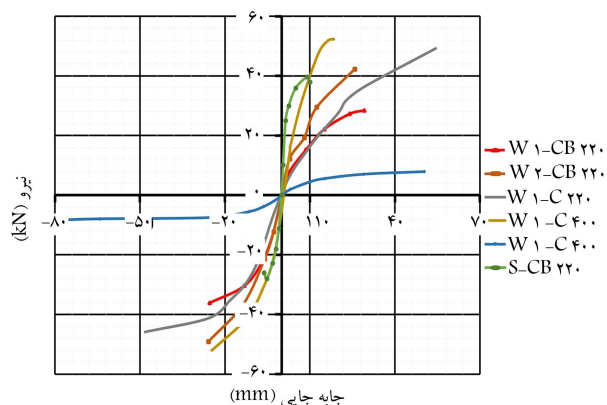


و) منحنی هیستریزیس نمونه S-CB220؛



ه) منحنی هیستریزیس نمونه W1-D؛

شکل ۱۱. منحنی هیستریزیس نمونه‌ها.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی منحنی پوش‌آور نمونه‌ها.

در جدول ۶، خلاصه‌ی نتایج نمونه‌ها ارائه شده است. بار نهایی نمونه‌ی W1-C220 برابر ۴۹/۲۴ کیلو نیوتن و بار نهایی نمونه‌های S-CB220، W1-D، W1-C400، W2-CB220 و W1-CB220 به ترتیب برابر ۲۸/۴۴، ۴۲/۳۱، ۵۲/۳۳، ۸/۲۵ و ۳۹/۶۶ بوده است. با توجه به اعداد ذکر شده، نمونه‌ی

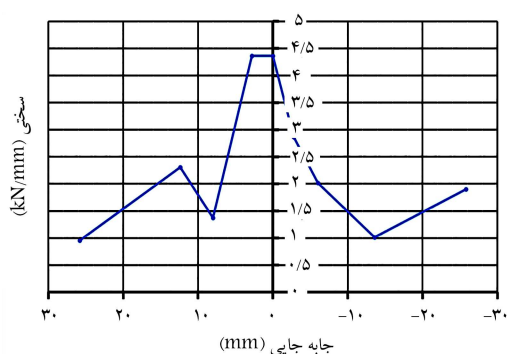
جدول ۴. ظرفیت باربری نمونه‌ها.

نام نمونه	ظرفیت باربری (kN)
W1-CB220	۳۲/۲۷
W2-CB220	۴۵/۶۷
W1-C220	۴۷/۵۵
W1-C400	۵۲/۱۷
W1-D	۸/۰۹

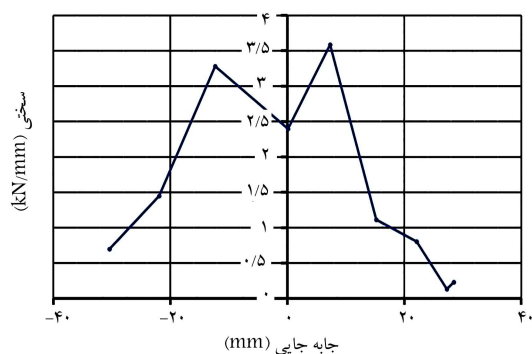
سیمان ۲۲۰ به دست آورده‌اند. نمونه‌ی کاه‌گِل کمترین میزان مقاومت را کسب کرده است.

در شکل ۱۲، منحنی پوش‌آور نمونه‌ها مشاهده می‌شود. نتایجی که از بنتونیت به دست آمده است، نشان می‌دهد بنتونیت می‌تواند نتایج نسبتاً قابل قبولی در مقابل سیمان به دست آورد.

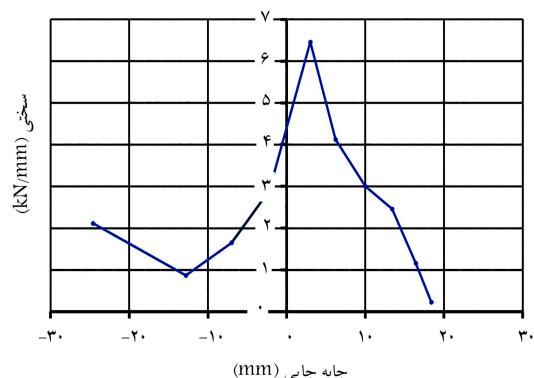
نمودارهای سختی نمونه‌ها در شکل ۱۳ مشاهده می‌شوند: انرژی سطح حلقه‌های هیستریزیس به صورت درصدی از انرژی نمونه‌ی W1-C400 در جدول ۵ ارائه شده است:



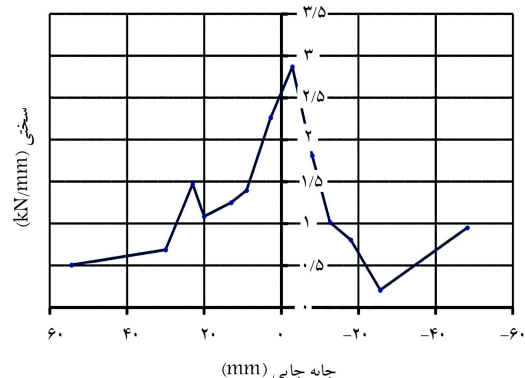
ب) نمودار سختی نمونه W2-CB220



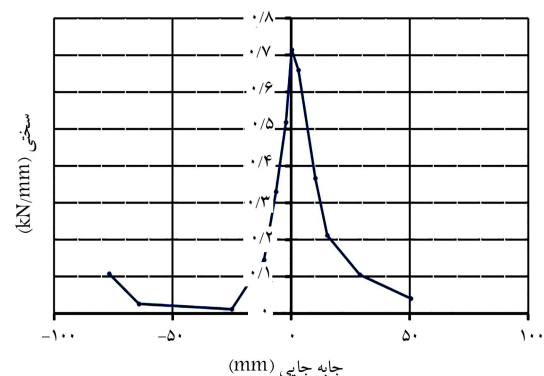
الف) نمودار سختی نمونه W1-CB220



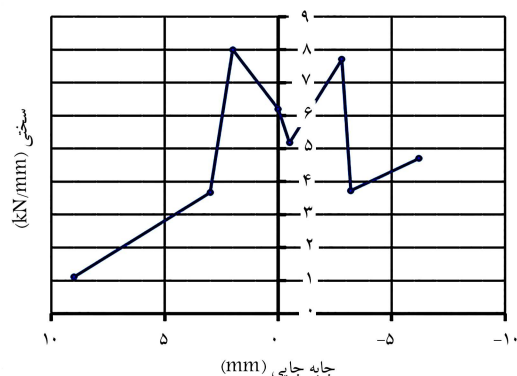
د) نمودار سختی نمونه W1-C400



ج) نمودار سختی نمونه W1-C220



ه) نمودار سختی نمونه W1-D



و) نمودار سختی نمونه S-CB220

شکل ۱۳. نمودار سختی نمونه‌ها.

W1-C400 بیشترین بار و نمونه‌ی W1-D، که نمونه‌ی کاه‌گسل است، کمترین بار را تحمل کرده است. نمونه‌ی W1-C400 نسبت به نمونه‌ی مینا، ۶/۲۸٪ افزایش مقاومت داشته است.

مقدار انرژی جذب شده توسط نمونه برابر با سطح زیر منحنی پوش نمونه است. بیشترین انرژی جذب شده توسط نمونه‌ی W1-C220 و بعد از آن به ترتیب نمونه‌های W2-CB220 و W1-CB220 بوده‌اند.

کمترین انرژی جذب شده توسط نمونه‌ی S-CB220 بوده و بعد از آن نمونه‌ی W1-D قرار داشته است. میانگین شکل‌پذیری نمونه‌ها بدین صورت بوده است: نمونه‌ی S-CB220، بیشترین شکل‌پذیری و سپس به ترتیب نمونه‌های W1-D، W1-C400 و W1-C220 قرار داشته‌اند. نمونه‌ی W1-CB220 کمترین میزان شکل‌پذیری را به خود اختصاص داده است.

جدول ۵. مقایسه‌ی سطح انرژی نمونه‌ها.

نام نمونه	انرژی (%)
W-CB220	۷۷/۰۰
W2-CB220	۸۴/۸۴
W1-C220	۹۵/۸۶
W1-C400	۱۰۰/۰۰
W1-D	۳۶/۳۹
S-CB220	۶۵/۸۳

جدول ۶. خلاصه‌ی نتایج میانگین نمونه‌ها.

میانگین												نمونه
DUTIUTY	Yield		A(kN.mm)	$P_{peak} * 0.4$			$P_{peak} * 0.18$			$P_{peak}$		
	$\Delta(mm)$	P(kN)		Ke(kN/mm)	$\phi$	P(kN)	G(kN/m)	$U\Delta(mm)$	P(kN)	$\Delta(mm)$	P(kN)	
۱/۸۸	۸/۹۱	۳۱/۸۶	۵۱۱/۸۲	۰/۷۲	۱۸/۱۸	۱۲/۹۱	۱/۸۹	۱۸/۵۹	۲۵/۸۲	۳۰/۷۸	۳۲/۲۷	W۱-CB۲۲۰
۱/۱۷	۷/۵۱	۳۳/۷۹	۶۴۱/۳۳	۲/۹۴	۶/۲۵	۱۸/۲۷	۲/۱۳	۱۷/۳۵	۳۶/۵۴	۲۵/۹۰	۴۵/۶۷	W۲-CB۲۲۰
۱/۸۶	۱۶/۹۵	۳۸/۷۵	۱۲۰۰/۶۲	۱/۰۹	۱۷/۴۵	۱۹/۰۲	۱/۲۱	۳۱/۵۰	۳۸/۰۴	۵۱/۳۰	۴۷/۵۵	W۱-C۲۲۰
۱/۳۱	۹/۲۵	۴۴/۸۵	۵۰۰/۸۹	۴/۲۴	۴/۹۶	۲۰/۸۷	۳/۴۹	۱۲/۰۱	۴۱/۷۳	۲۱/۵۰	۵۲/۱۷	W۱-C۴۰۰
۱/۸۰	۱۱/۲۳	۶/۹۲	۱۲۹/۸۴	۰/۴۰	۸/۷۰	۳/۲۳	۰/۳۲	۲۰/۱۰	۶/۴۷	۶۳/۶۰	۸/۰۹	W۱-D
۲/۵۱	۱/۳۹	۲۷/۸۷	۸۷/۷۷	۲۸/۱۱	۱/۲۷	۱۳/۵۳	۸/۳۵	۳/۲۵	۲۷/۰۶	۷/۱۰	۳۳/۸۳	S-CB۲۲۰

#### ۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، ابتدا نمونه‌های بتنی با مصالح مورد نظر ساخته شدند. طبق نتایج به دست آمده، بتنوتیت خاصیتی سیمانی دارد و تا درصد معینی می‌توان از آن به عنوان جایگزین سیمان استفاده کرد. نمونه‌ی شاهد با عیار سیمان ۲۲۰ و یک نمونه با عیار سیمان ۴۰۰ نیز آماده شد. سپس از طرح اختلاط مورد نظر در بخش سازه‌ی استفاده شد.

در قسمت سازه‌ی، ۵ دیوار پیش‌ساخته‌ی سه‌بعدی و یک سازه‌ی ۱ طبقه‌ی پیش‌ساخته بررسی و مطالعه شدند. دیوارهای ساخته شده دارای ارتفاع و ضخامت یکسان بودند. تمایز دیوارها در شاتکریت استفاده شده، بوده است. دو دیوار ساخته شده و همچنین سازه‌ی ۱ طبقه با استفاده از بتنوتیت مطالعه شدند.

نتایج مطالعه‌ی حاضر، در برگرفته‌ی تعیین ظرفیت برشی، سختی برشی، میزان انرژی جذب شده و همچنین میزان ضریب شکل‌پذیری مربوط به هر یک از نمونه‌های دیوارهای پیش‌ساخته‌ی سه‌بعدی تحت اثر بار جانبی رفت و برگشتی، بدین صورت است:

نمونه‌ی W۱-C۴۰۰ بیشترین ظرفیت باربری را داشته و توانسته است ۵۲/۳۳ کیلونیوتن بار را تحمل کند. بتن شاتکریت شده بر روی نمونه‌ی W۱-C۴۰۰ با سیمان ۴۰۰ ساخته شده است، که نسبت به سایر نمونه‌ها مقاومت بیشتری را در بخش تکنولوژی بتن و سپس در بخش سازه به دست آورده است. بعد از آن نمونه‌ی W۱-C۲۲۰ با تحمل بار به میزان ۴۹/۲۹ کیلونیوتن به عنوان نمونه‌ی شاهد قرار داشت، که مقاومت به دست آمده از نمونه‌ی اخیر، نزدیک به نمونه‌ی آزمایش با بتنوتیت یعنی W-1CB۲۲۰ با میزان تحمل بار ۴۵/۶۷ کیلونیوتن بوده است، که نشان می‌دهد بتنوتیت به عنوان یک ماده با خواص سیمانی نتایج قابل قبولی به دست آورده است و قابلیت آن را دارد که در ابعاد بزرگ‌تر استفاده شود. نمونه‌ی دیگر بتنوتیت به میزان بتنوتیت ۳۲/۲۷ کیلونیوتن بار تحمل کرده است. همچنین نمونه‌ی W ۱-D با میزان ۷/۹۲ کیلونیوتن کمترین بار را متحمل شده است.

بیشترین سختی مربوط به نمونه‌ی S-CB۲۲۰ بوده است. این موضوع نشان

می‌دهد که از کنار هم قرار گرفتن دیوارهای ساخته شده و تبدیل آن به یک سازه، سختی بیشتر نمونه را به دنبال دارد. پس از آن نمونه‌ی W۱-C۴۰۰ قرار داشت. سختی نمونه‌های W۱-CB۲۲۰ و W۲-CB۲۲۰ از نمونه‌ی W۱-C۲۲۰ بیشتر بود، که نشان می‌دهد استفاده از بتنوتیت باعث افزایش سختی نمونه شده و نمونه‌ی W۱-D، کمترین سختی را داشته است. روند کاهش سختی در نمونه‌ها با شیب تند رخ داده است.

مقدار انرژی جذب شده توسط هر نمونه معادل سطح زیر منحنی پوش است. نمونه‌ی W۱-C۲۲۰ بیشترین سطح زیر منحنی را داشته است، در نتیجه بیشترین میزان انرژی را جذب کرده است. بعد از آن نمونه‌های W۲-CB۲۲۰ و W۱-CB۲۲۰ قرار داشتند. به عبارت دیگر، در نمونه‌هایی که در آنها از بتنوتیت استفاده شده است، میزان جذب انرژی کاهش یافته است. نمونه‌ی S-CB۲۲۰ سطح زیر نمودار کمتری نسبت به دیوارهای ساخته شده با بتنوتیت، یعنی نمونه‌های W۱-CB۲۲۰ و W۲-CB۲۲۰ داشته است. به عبارت دیگر، انرژی کمتری را جذب کرده است. نمونه‌ی W۱-D، کمترین سطح زیر منحنی را داشته و در نتیجه، کمترین میزان انرژی را جذب کرده است.

میانگین شکل‌پذیری نمونه‌ی S-CB۲۲۰، ۲/۵۱ بوده است، که از سایر نمونه‌ها بیشتر بوده است. بعد از آن نمونه‌ی W۱-CB۲۲۰ با میانگین ۱/۸۸، بیشترین شکل‌پذیری و نمونه‌ی W۲-CB۲۲۰ با میانگین ۱/۱۷، کمترین میزان شکل‌پذیری را داشته‌اند. این موضوع نشان می‌دهد که هنگام ترکیب دیوارهای پانلی با یکدیگر و به وجود آوردن یک سازه، شکل‌پذیری نمونه افزایش می‌یابد. در آزمایش انجام شده، شکل‌پذیری نمونه‌ی S-CB۲۲۰ در مقایسه با نمونه‌های W۱-CB۲۲۰ و W۲-CB۲۲۰ به ترتیب به میزان ۳۳٪ و ۲ برابر افزایش داشته است.

به عنوان جمع‌بندی می‌توان گفت سازه‌ی ۱ طبقه‌ی ساخته شده، که با عنوان نمونه‌ی S-CB۲۲۰ معرفی شده است، در مقایسه با دیوارهای برشی ساخته شده با مصالح شاتکریتی مشابه، پارامترهای مؤثر آن در برابر زلزله، یعنی میزان سختی و میزان شکل‌پذیری بهبود یافته است. دیوار ساخته شده از کاه‌گل نیز کمترین حد تحمل بار، کمترین میزان انرژی جذب شده و کمترین میزان سختی را داشته است.



## منابع (References)

1. Tasnimi, A. "Behavior and seismic design of reinforced concrete buildings", *Building and Housing Research Center*, Summer (in Persian) (201).
2. Moghadam, H. "Earthquake Engineering", *Publications of Road and Transportation Research and Studies Center*, Summer (in Persian) (1996).
3. Tasnimi, A. "Behavior of shear walls in conventional buildings", *Building and Housing Research Center*, **246**(1), Spring (in Persian) (1997).
4. Rezaifar, O., Kabir, M.Z., Taribakhsh, M. and "Dynamic behaviour of 3D-panel singlestorey system using shaking table testing", *Engineering Structures*, **30**(2), pp. 318-337 (2008).
5. Rezaifar, O. and Kabir, M. "Shaking table examination on dynamic characteristics of a scaled down 4-story building constructed with 3D-panel system", *Structures*, **20**, pp. 411-424 (2019).
6. Rezaifar, O., Kabir, M.Z., Taribakhsh, M. and et al. "Dynamic behavior of 3D-panel single-story system using shaking table testing", *Engineering Structures*, **30**(2), pp. 318-337 (2008).
7. Salmon, D.C. and Einea, A. "Partially composite sandwich panel deflections", *J. Struct. Eng.*, **121**(4), pp. 778-783 (1995).
8. Salmon, D.C., Einea, A., Tadros, M.K. and et al. "Full scale testing of precast concrete sandwich panels", *Struct. J.*, **94**(4), pp. 354-362 (1997).
9. Palermo, M., Ricci, I., Silvestri, S. and et al. "Preliminary interpretation of shaking-table response of a full-scale 3-storey building composed of thin reinforced concrete sandwich walls", *Engineering Structures*, **76**, pp. 75-89 (2014).
10. Shi, W. and Zhang, L. "Report of earthquake resistant test of the model of evg-3d project", *State Laboratory for Disaster Reduction in Civil Engineering*, Shaking Table Testing Division of Tongji University (Nov 1997).
11. Rezaifar, O., Sharifia, H. and Morshed, R. "Investigation of dynamic behavior of 6-storey panel buildings", *9th International Congress of Civil Engineering Isfahan*, Isfahan University of Technology (2012).
12. Rezaifar, O., Kabir, M. and Bakhshi, A. "Shaking table test of a 1: 2.35 scale 4-story building constructed with a 3D panel system", *Sci. Iran. J.*, **16**, pp. 199-215 (2009).
13. Kabir, M.Z. and Rezaifar, O. "Shaking table examination on dynamic characteristics of a scaled down 4-story building constructed with 3D-panel system", *Structures*, *Elsevier*, **20**, pp. 411-424 (2019).
14. Ahmadi, R., Rashidian, O. and Abasnia, R. "Investigation of the behavior of wall-to-wall L and T-shaped joints in concrete sandwich panels", *7th International Congress of Civil Engineering, Tehran*, Tarbiat Modares University, Faculty of Civil Engineering (in Persian) (2006).
15. Mashal, F.M. "Quantification of seismic performance factor for building incorporating three-dimensional construction system", *15WCEE, Lisbon* (2012).
16. Numayr, K. and Haddad, R. "Static and dynamic analytical and experimental analysis of 3D reinforced concrete panels", *Structural Engineering and Mechanics*, **32**, pp. 399-406 (2009).
17. Pavese, A. and Dionysios A. "Experimental assessment of the seismic performance of a prefabricated concrete structural wall system", *Engineering Structures*, **33**(6), pp.562-578 (June 2011).
18. Sheikh Milani, E., Hassan A. and Ferdowsi, B. "Comparison of the behavior of 3D sandwich panels with conventional panels in bending and cutting", *8th International Congress of Civil Engineering, Shiraz*, Shiraz University (in persian) (2009).
19. Rezaeifar, O. and Ali Esmaili, R. "A comparative study of the behavior of panel structural components in independent state and system", *6th National Congress of Civil Engineering, Semnan*, Semnan (in persian) (2011).
20. Meisl, C.S., Elwood, K.J. and Ventura, C.E. "Shake table tests on the out-of-plane response of unreinforced masonry walls", *Can. J. Civ. Eng.*, **34**(11), pp. 1381-1392 (2007).
21. Stavridis, A., Koutromanos, I. and Shing, P.B. "Shake-table tests of a three-story reinforced concrete frame with masonry infill walls", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **41**(6), pp. 1089-1108 (2012).
22. Petrone, C., Magliulo, G. and Manfredi, G. "Shake table tests on standard and innovative temporary partition walls", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **46**(10), pp. 1599-1624 (2017).
23. Petrone, C., Magliulo, G. and Manfredi, G. "Seismic demand on light acceleration sensitive nonstructural components in European reinforced concrete buildings", *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, **44**(8), pp. 1203-1217 (2015).