

مطالعات آزمایشگاهی و عددی بر روی رفتار سیستم ترکیبی قاب بتن مسلح با ساندویچ پانل و دیوار برشی

محمدزمان کبیر، دانشیار، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
شاپور طاحونی، استادیار، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
مجید صافحیان، دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده

کلیدواژه‌ها: ساندویچ پانل، دیوار برشی، بارگذاری چرخه‌ای افزایشنده، شکل پذیری، قاب خمشی بتن مسلح

یکی از روشهای نوین بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود، افزودن میان قابهای پیش‌ساخته از جمله پانل‌های سبک ساندویچی است.

۱- مقدمه

امروزه با گذشت حداقل سه دهه از احداث تعداد زیادی ساختمان که مطابق آیین‌نامه‌های قدیم طراحی و ساخته شده‌اند و توجه به این نکته که در بسیاری از این موارد نیروهای طرح لرزه‌ای به اندازه کافی مد نظر قرار نگرفته است، مسأله مقاوم‌سازی و بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود به یکی از چالشهای مهم مهندسی مبدل گشته است [۱].

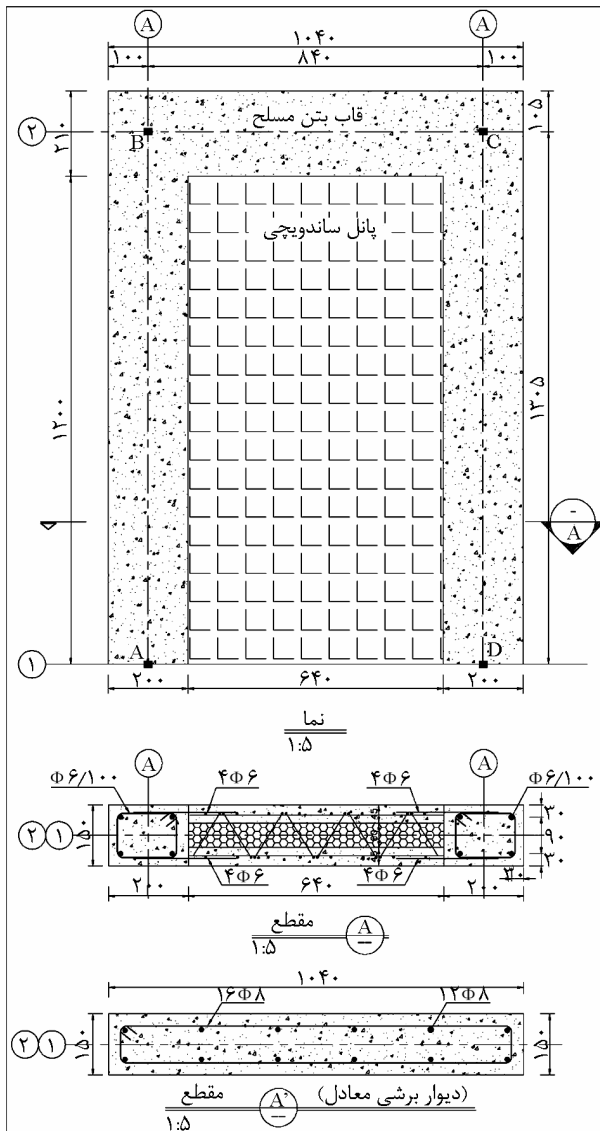
یکی از روشهای متداول بهسازی لرزه‌ای در سطح سیستم کلی باربر جانبی سازه، جایگزینی و افزودن میانقابها است. این راهکار در ساختمانهایی که به علت کاربری خاص آنها به جداسازی‌های فراوانی در پلان معماری نیاز دارند، کاربرد مناسبی خواهد داشت. از جمله انواع نوین و پیش‌ساخته این میانقابها، پانل‌های سبک ساندویچی هستند که در محل به قاب فلزی یا بتنی موجود افزوده می‌شوند. با توجه به سرعت و سهولت بالای اجرا، سبکی، عایق صوتی بودن و به علاوه صرفه‌جویی در مصرف انرژی به خاطر هسته پلی‌استایرن در وسط، استفاده از این پانل‌ها روزبه‌روز گسترش بیشتری پیدا می‌کند [۲].

مطابق شکل (۱)، پانل‌های پیش‌ساخته سبک شامل دو صفحه شبکه مفتول‌های جوش شده هستند که یک لایه عایق پلی‌استایرن در میان آنها قرار گرفته و توسط تعدادی اعضای خرپایی به یکدیگر متصل شده‌اند. این پانل‌ها به

در این مقاله ابتدا با انجام مطالعات آزمایشگاهی بر روی دو گروه پانل ساندویچی 120×60 سانتیمتر و 120×124 سانتیمتر رفتار واقعی پانل‌ها و همچنین مشخصات مکانیکی آنها استخراج گردیده است. سپس با استفاده از توصیه‌های آیین‌نامه‌های معتبر از جمله *FEMA356* و *FEMA273*، تأثیر افزودن ساندویچ پانل یا دیوار برشی بر روی رفتار لرزه‌ای یک قاب درگاهی بتن مسلح مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. روش این پژوهش مبتنی بر نتایج حاصل شده از اعمال بار جانبی افزایشنده چرخه‌ای می‌باشد که به صورت دندانه‌ای در بالاترین تراز مدل اعمال شده است. به این ترتیب پارامترهای باربری جانبی بیشینه، تغییرشکل نهایی، روند کاهش سختی و نهایتاً میزان شکل‌پذیری در هر یک از حالات محاسبه و ارائه شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که افزودن پانل به قاب بتن مسلح موجود، پیوند ارتعاش مود اول سازه را ۲۱ درصد کاهش می‌دهد. به علاوه پارامترهای سختی، شکل‌پذیری و باربری نهایی قاب اولیه به ترتیب ۸۰، ۳۰ و ۴۰ درصد افزایش می‌یابد.

همچنین نتایج مثبت راهکار افزودن پانل‌های ساندویچی به قابهای موجود در قیاس با افزودن دیوار برشی عبارتند از:
الف- پتانسیل بالاتر در حفظ سختی سازه به ویژه در تغییر شکل‌های زیاد، ب- شکل‌پذیری مناسبتر، پ- حجم کمتر مصالح مصرفی و ت- سهولت بالاتر اجرا.

آرماتورهای موجود در مدل‌های مورد بررسی در شکل (۲) نشان داده شده است.

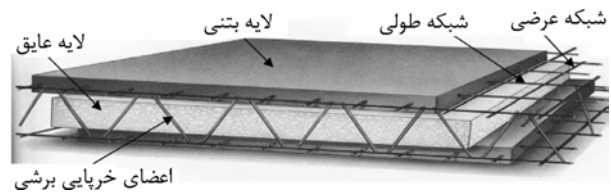


شکل (۲): مشخصات هندسی و آرماتورگذاری مدل‌های مورد مطالعه.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

بر اساس روش ذکر شده در مقدمه و مطابق تصویر (۱)، مدل آزمایشگاهی دقیقی از حالت ترکیبی قاب بتنی و ساندویچ پانل ساخته و در آزمایشگاه سازه پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تحت بارگذاری جانبی قرار گرفته است. جزئیات دقیقتر در خصوص چگونگی ساخت و آزمایش مدل‌ها و همچنین نتایج کامل به دست آمده از این آزمایشها در مرجع [۱۲] آورده شده است.

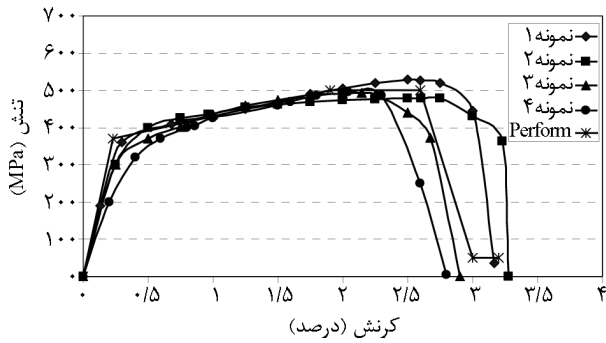
عنوان المان دیوار و سقف در ساختمان به کار می‌روند [۳]. عرض یکسان پانل‌ها ۱۲۰ سانتیمتر می‌باشد و بسته به کاربردهای متفاوت، طول و ضخامتهای مختلف دارند.



شکل (۳): نمای سه‌بعدی پانل‌های ساندویچی و اجزای آن [۴].

پانل‌های دیوار علاوه بر این که جداکننده فضاهای معماری هستند، نقش المان باربر قائم و المان سخت‌کننده در برابر بارهای جانبی را هم ایفاء می‌کنند. بیشتر تحقیقات موجود بر روی پانل‌ها، شامل آزمایشات برشی و خمشی در حالت بارهای یک طرفه و استاتیکی است [۵-۶]. به منظور بررسی انتقال برش بین لایه‌ای در پانل‌های ساندویچی و تخمین ظرفیت خمشی آنها، آزمایشاتی انجام شده است که در نتیجه ضریب عملکرد کامپوزیتی لایه‌ها جهت کنترل کفایت المانهای برشی به دست آمده است [۷]. همچنین در تحقیق دیگری نمونه‌هایی از این پانل‌ها تحت بارهای استاتیکی رفت و برگشتی قرار گرفته و منحنی‌های هیستریزس آنها به دست آمد و برای هر پانل یک ضریب رفتار و یک ضریب افزایش تغییرمکان تعیین گردیده است [۸].

علی‌رغم مزایای عمده نهفته در سیستم ترکیبی قاب و پانل، چگونگی رفتار و اندرکنش اجزای مختلف آن تاکنون مورد بررسی و ارزیابی کافی قرار نگرفته است. از این رو در این مقاله سعی شده است تا ابتدا با انجام مطالعات آزمایشگاهی و سپس مطالعات عددی، مقایسه‌ای بین مدل‌های پنج گانه قاب بتنی تنها، ترکیب قاب و پانل با سربار ثقلی و بدون سربار ثقلی و ترکیب قاب و دیوار برشی انجام گیرد. به این منظور از توصیه‌های آیین‌نامه‌های معتبر از جمله دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود [۹] و [۱۰] FEMA356 و [۱۱] FEMA273، در کنار المانهای مختلف غیرخطی دو نرم‌افزار Ram Perform و Ansys استفاده شده است. ابعاد هندسی و آرایش



شکل (۳): نمودار تنش-کرنش مفتول‌های داخلی پانل ساندویچی.

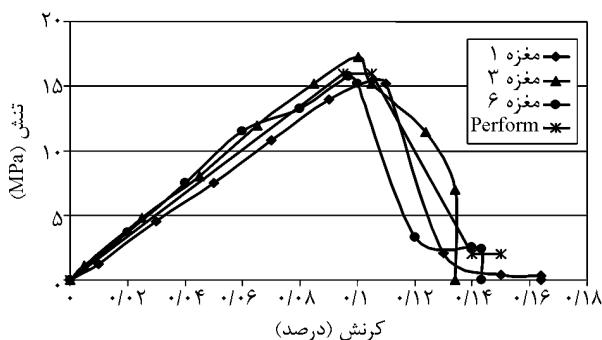
جدول (۱): هندسه و مقاومت فشاری نمونه‌های استاندارد بتن قاب.

محل بتن مصرفی	ابعاد نمونه (میلی‌متر)	وزن مخصوص (کیلوگرم/مترمکعب)	حداکثر نیروی اعمالی (کیلو نیوتن)
قاب	۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰	۲۳۶۰	۶۴۰
پانل	۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰	۲۱۵۷	۴۶۰

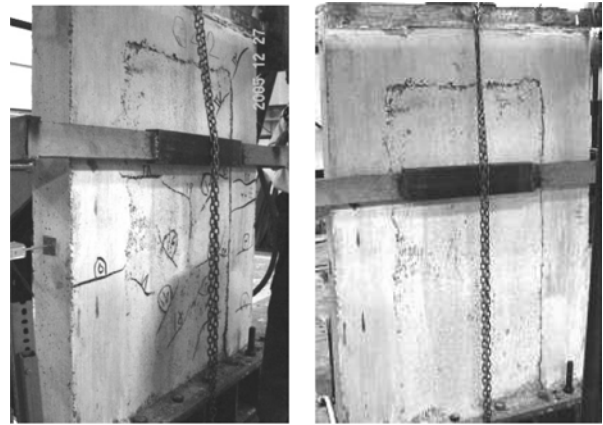
جدول (۲): هندسه و مقاومت فشاری مغزه‌های استوانه‌ای بتن شاتکریتی.

شماره مغزه	ابعاد (قطر×طول) (میلی‌متر)	وزن مخصوص (کیلوگرم/مترمکعب)	مقاومت فشاری مغزه (کیلوگرم/سانتیمترمربع)
۱	۵۴/۴×۱۱۲/۳	۲۲۵۳	۱۳۲/۲
۲	۵۴/۴×۱۰۲/۹	۲۱۹۷	۱۱۹/۴
۳	۵۴/۴×۱۱۹	۲۳۰۲	۱۳۸/۹
۴	۵۴/۴×۱۰۸/۲	۲۲۹۱	۱۴۷/۳

با بهره‌گیری از نتایج آزمایشات فوق می‌توان دیاگرام تنش-کرنش بتن شاتکریتی را در فشار به صورت منحنی شکل (۴) در نظر گرفت. لازم به ذکر است علی‌رغم رفتار سهمی شکل بتن، در نرم‌افزار *Perform*، رفتار غیرخطی مصالح به صورت چند خطی مدل می‌شود. از این رو منحنی شکسته شکل (۴) که نزدیکترین همخوانی را با رفتار واقعی مغزه‌های آزمایشی دارد، برای مدلسازی بتن شاتکریتی انتخاب شده است.



شکل (۴): نمودار تنش-کرنش بتن شاتکریتی.



بعد از بارگذاری

قبل از بارگذاری

تصویر (۱): مدل آزمایشگاهی قاب ترکیبی با ساندویچ پانل.

در استاندارد *ASTM A82*، حداقل مقاومت جاری شدن و نهایی کششی مفتول‌های فولادی مورد استفاده در شبکه جوش شده به ترتیب برابر $۳۸۵MPa$ و $۴۸۵MPa$ تعیین شده است. این استاندارد برای کرنش‌های متناظر با تنش‌های فوق، ضابطه محدودکننده‌ای ذکر نکرده است.

مشخصات مکانیکی مفتول‌های مورد استفاده در شبکه جوش شده پانل‌های آزمایشگاهی بر اساس استاندارد فوق می‌باشد که مطابق روش جوش اتوماتیک موجود در *ASTM A185* به یکدیگر متصل شده‌اند.

شبکه جوش شده در کلیه نمونه‌های پانلی عبارت است از مفتول‌های با قطر $۳/۵$ میلی‌متر که به طور عمودی و افقی با فواصل یکسان ۸۰ میلی‌متر روی هم جوش شده‌اند. (تار و پود) $\left(WWF \frac{80/80/\phi 3.5/\phi 3.5}{L/1200} \right)$ همچنین قطر مفتول‌های برشی مورب نیز $۳/۵$ میلی‌متر و از همان جنس مفتول‌های شبکه می‌باشد. ضخامت لایه عایق پلی استایرن نیز در کلیه نمونه‌ها ۶ سانتیمتر و فاصله دو شبکه از یکدیگر ۱۰ سانتیمتر می‌باشد.

با توجه به نتایج به دست آمده از طریق تست مقاومت کششی چهار نمونه از مفتول‌های موجود در شبکه جوش شده پانل‌ها، دیاگرام تنش-کرنش متناظر با رفتار واقعی این مفتول‌ها در شکل (۳) نشان داده شده است.

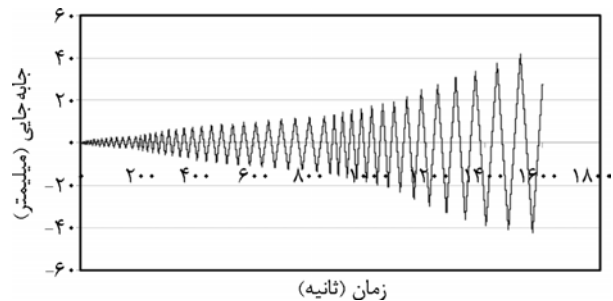
همچنین جهت تعیین مشخصات واقعی بتن مصرفی در قاب و پانل نیز نمونه‌های استاندارد مکعبی و مغزه‌های استوانه‌ای تهیه شده است که در جدول‌های (۱) و (۲)، نتایج تست مقاومت فشاری این نمونه‌ها آمده است.

به صورت کلی تر در نرم افزار *Perform* تهیه شده است. در شکل (۷)، نمایی از اجزای مختلف مدل های عددی مشاهده می گردد. همچنین تعاریف غیرخطی مصالح مورد استفاده مطابق مشخصات ذکر شده در مرجع [۱۳] و نمودارهای تنش- کرنش شکل های (۳) و (۴) می باشد. به این ترتیب علاوه بر ارائه منحنی های پوش بار- تغییرمکان و روند تغییرات سختی حالات پنج گانه در یک دستگاه مختصات، شکل های (۸) و (۹)، مقادیر عددی برداشت شده از منحنی های فوق و نسبت تغییرات در قالب جدول (۴) خلاصه شده است.

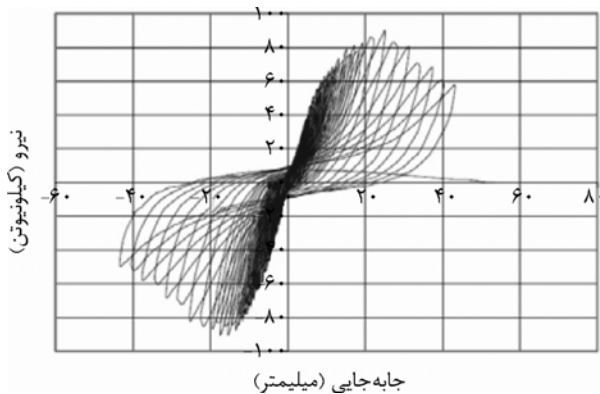
جدول (۳): نتایج آزمایش سیستم ترکیبی در بارگذاری سیکلی افزایشنده.

شماره سیکل	جابه جایی افقی (mm)		نیروی عکس العمل (kN)		سختی نمونه (kN/m)	
	رفت	برگشت	رفت	برگشت	رفت	برگشت
۱	۰/۴۰۰	۰/۳۹۰	۰/۰۸۴	۴/۱۶۰	۲۰۹۹۱	۱۰۶۶۷
۱۰	۱/۸۳۲	۲/۱۷۱	۲/۱۹۴۵	۱۶/۴۷۲	۱۱۹۷۹	۷۵۸۷
۲۰	۵/۱۸۹	۶/۱۴۲	۴۶/۲۵۷	۴۵/۰۲۰	۸۹۱۴	۷۳۳۰
۳۰	۱۳/۳۵۵	۱۵/۳۳۴	۸۷/۳۲۳	۷۹/۳۱۶	۶۵۳۹	۵۱۷۳
۴۰	۳۳/۴۴۲	۴۳/۳۶۷	۵۷/۷۹۰	۵۷/۹۲۰	۱۷۲۸	۱۳۳۶

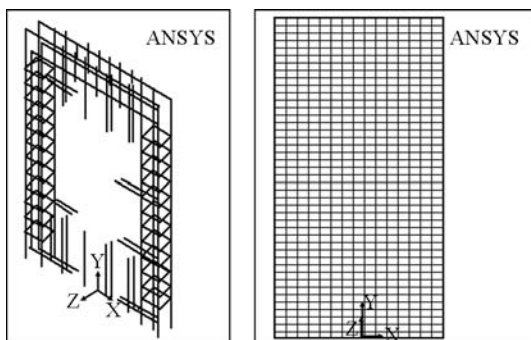
در مطالعات آزمایشگاهی جهت شبیه سازی حرکات رفت و برگشتی سازه در حین وقوع زلزله، از روشهای ساده سازی همچون بارگذاری های چرخه ای وابسته به زمان استفاده می گردد. از آنجا که تاکنون روش استاندارد جهت بارگذاری چرخه ای در این سیستم های ترکیبی خاص تهیه نشده است، در نمونه حاضر بار جانبی به صورت شبه- استاتیکی و کنترل شونده توسط تغییرمکان در سیکل های متوالی به قسمت فوقانی قاب ترکیبی اعمال شده است. این الگوی بار شامل سه مرحله اصلی ترک خوردگی، جاری شدن و نهایی می باشد. در شکل (۵)، منحنی تاریخچه زمانی بار مورد نظر نشان داده شده است.



شکل (۵): نمودار بارگذاری دندانه ای سیستم قاب ترکیبی آزمایشگاهی.



شکل (۶): منحنی های هیستریزس مدل آزمایشگاهی.



شکل (۷): مدل های عددی پانل و قاب در نرم افزار Ansys.

مشاهدات حین آزمایش نمونه نشان می دهد که اولین ترکها در ارتفاع تقریبی ۴۰۰ میلی متر از پای ستون اتفاق می افتد. سپس ترکهای مایل در نیمه پایین پانل آغاز می گردد تا جایی که با افزایش تغییرمکان اعمالی، ترکها در هر دو لایه پانل پخش می شود. در ادامه پس از ایجاد شکاف در حد فاصل قاب و پانل، ترکهای موجود در بتن شاتکریتی به یکدیگر رسیده و باز شده و در نهایت پانل داخلی کاملاً باربری خود را از دست می دهد. در جدول (۳) و همچنین شکل (۶)، نتایج مطالعات آزمایشگاهی آورده شده است.

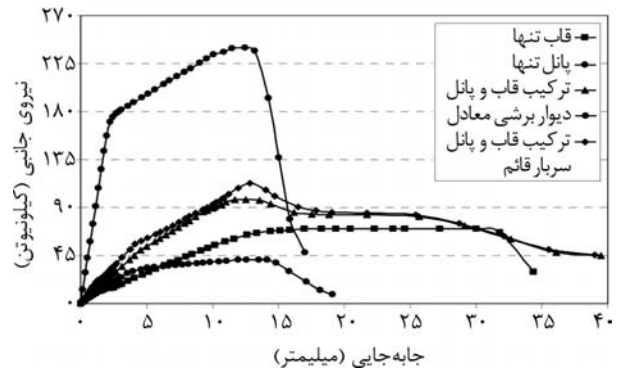
۳- مطالعات عددی

بر اساس مشخصات هندسی و آرما توری شکل (۲) و همچنین امکانات مدلسازی های عددی در نرم افزارهای غیرخطی مدل های دو بعدی کاملی با تمام جزئیات آرما توری و اتصال بین اعضاء در نرم افزار Ansys و

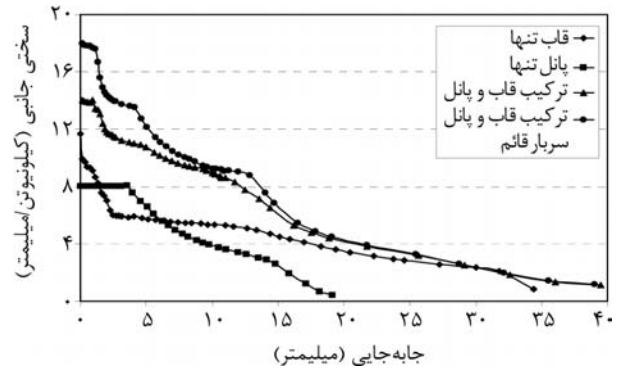
به علت محدود بودن شرایط آزمایشگاه، امکان اعمال بار ثقلی خارجی بر روی نمونه‌های تهیه شده وجود نداشته است. با این حال در شرایط واقعی بهره‌برداری، بارهای قائم مرده و زنده همواره بر روی سیستم ترکیبی اعمال خواهد شد. از این رو مدل عددی ساخته شده از سیستم ترکیبی مجدداً با بارگذاری قائم خطی ۱/۲۵ تن بر متر بر روی تیر فوقانی تحلیل شده است. نتایج بررسیها نشان می‌دهد که این مسأله باعث افزایش به ترتیب ۲۴ و ۱۶ درصدی در سختی اولیه و باربری نهایی سازه می‌گردد. علت آن نیز قرار گرفتن سیستم سازه تحت فشار اولیه می‌باشد، چرا که عموماً در سازه‌های بتنی وجود فشار در حد کم و مناسب علاوه بر تأخیر در بروز ترکهای ناشی از کشش و برش بتن، سبب بهبود عملکرد اندرکنشی نیروی محوری فشاری و لنگر خمشی می‌گردد. با این وجود رفتار سیستم ترکیبی در تغییرشکلهای بزرگ تفاوت چندانی نخواهد داشت؛ زیرا اعمال سربار قائم علاوه بر نکات مثبت فوق، باعث بروز لنگرهای ثانویه در اجزای سازه خواهد شد که در جهت خلاف ایمنی می‌باشد.

از آنجایی که در ساخت مدل آزمایشگاهی از یک سو به علت ابعاد محدود و سایر مشکلات اجرایی امکان رعایت ضوابط شکل‌پذیری زیاد مندرج در آیین‌نامه‌ها به راحتی فراهم نمی‌باشد و از سوی دیگر وضعیت واقعی بسیاری از سازه‌های بتن مسلح موجود در سطح کشور به گونه‌ای است که نمی‌توان از آنها توقع تحمل تغییرشکلهای بزرگ در حین زلزله‌های شدید را داشت، تغییرشکل نهایی قاب اولیه به ۳۵ میلیمتر محدود می‌گردد. در حالی که نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که پس از افزودن پانل به آن حتی در زمان اعمال تغییرشکل ۴۰ میلیمتر نیز همچنان سیستم ترکیبی باربری مناسبی دارد. این مسأله در نتایج آزمایشگاهی نیز حاصل شده است.

از نکات قابل توجه در رفتار سیستم ترکیبی نقش پانل افزوده شده در گستره تغییرشکلهای متوسط به بالا می‌باشد؛ چرا که نتایج تحلیل صورت گرفته بر روی پانل تنها نشان می‌دهد که این المان سازه‌ای عملاً پس از تغییرشکل در حدود ۲۰ میلیمتر، باربری جانبی خود را کاملاً از دست



شکل (۸): مقایسه منحنی‌های پوش حلقه‌های هیستریزیس در ترکیبات مختلف قاب و پانل.



شکل (۹): مقایسه منحنی‌های روند کاهش سختی در ترکیبات مختلف قاب و پانل.

جدول (۴): مقایسه نتایج مدل‌های عددی.

معیارهای مقایسه	مدل عددی در نرم‌افزار Perform			
	پانل تنها (۱)	قاب تنها (۲)	ترکیب قاب و پانل بدون سربار (۳)	ترکیب قاب و پانل با سربار (۴)
حداکثر نیروی اعمالی ^۱ (کیلونیوتن)	۴۱/۲	۷۰/۱	۹۷/۵	۱۱۳
حداکثر تغییرمکان ^۲ (میلیمتر)	۱۵/۶	۳۲/۷	۲۷/۶	۱۶/۶
سختی اولیه ^۳ (کیلونیوتن/میلیمتر)	۸/۰	۷/۷	۱۳/۵	۱۶/۷
شکل‌پذیری (بی بعد) ^۴	۳/۳	۲/۶	۳/۴	۳/۱
پریود مودال ^۵ (ثانیه)	۰/۱۰۵	۰/۱۱۲	۰/۰۹۵	۰/۰۸۹

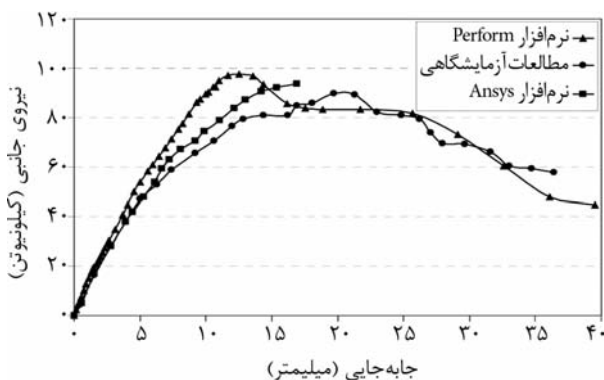
$$P_{max} - {}^*۱ \quad \Delta_{max} - {}^*۲ \quad K_i - {}^*۳$$

$$T - {}^*۴ \quad \mu - {}^*۴$$

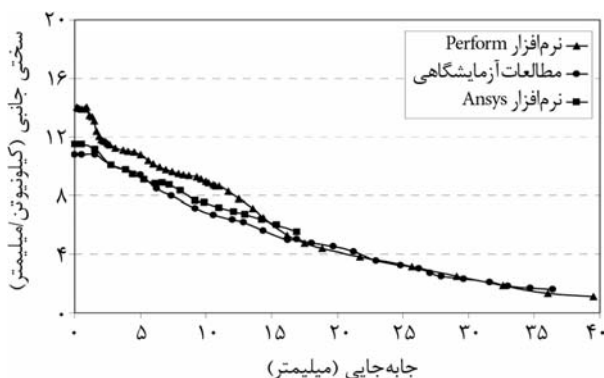
۴- مقایسه نتایج مطالعات آزمایشگاهی با تحلیل‌های عددی

با توجه به نتایج ارائه شده در دو قسمت قبل و تحلیل‌های انجام شده توسط نرم‌افزارهای غیرخطی، اکنون جهت درک بیشتر تفاوتها و شباهتها، منحنی‌های متناظر در مطالعات آزمایشگاهی و عددی در مدل ترکیب قاب و پانل به صورت همزمان و بر روی یک دستگاه مختصات در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) آورده شده‌اند. همچنین مقادیر عددی برداشت شده از منحنی‌های فوق و درصد اختلاف در قالب جدول (۵) خلاصه شده است.

طبق انتظار و به علت فرضیات مورد استفاده در مدلسازی‌های نرم‌افزاری، نتایج آنالیزهای عددی نسبت به نتایج مدل آزمایشگاهی در سطح بالاتری قرار دارد. از دیگر نتایج حاصل شده از مقایسه منحنی‌های پوش حلقه‌های هیستریزیس، دامنه عملکرد خطی بیشتر و



شکل (۱۰): مقایسه نتایج مطالعات آزمایشگاهی و عددی در منحنی‌های پوش حلقه‌های هیستریزیس مدل قاب و پانل.



شکل (۱۱): مقایسه نتایج مطالعات آزمایشگاهی و عددی در منحنی‌های روند کاهش سختی مدل قاب و پانل.

می‌دهد. این در حالی است که پانل پس از قرارگیری در داخل سیستم ترکیبی به علت نقش محصورکنندگی قاب پیرامونی، نه تنها میزان باربری قاب اولیه را همچنان افزایش می‌دهد بلکه سبب شده تا شیب انتهایی منحنی رفتار سازه به صورت کاملاً ملایم درآید. این نکته در عملکرد مناسب و ایمن سازه در حین زلزله‌های شدید بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

یکی از گزینه‌های مرسوم در جهت تقویت سازه‌های بتنی موجود، استفاده از دیوار برشی می‌باشد. از این رو مدل قاب درگاهی مورد نظر با فرض افزودن دیوار بتن مسلح داخلی به صورت یک دیوار برشی یکپارچه با میزان مصرف فولاد مساوی، نیز معادل سازی شده است. این گزینه علی‌رغم افزایش سختی اولیه سازه و میزان باربری نهایی به میزان ۵/۹۳ و ۲/۴۶ برابر سازه ترکیبی با پانل، دارای یک نقطه ضعف عمده می‌باشد؛ زیرا پس از رسیدن به حد نهایی باربری، دچار شکست ترد برشی می‌گردد. این شکست ناشی از کم بودن آرماتورها و نسبت پایین ارتفاع به طول مدل می‌باشد که به طور مشابه در آزمایشات بر روی تیرهای عمیق نیز مشاهده شده است.

به عنوان یک نتیجه‌گیری نهایی می‌توان توضیحات فوق را به صورت زیر خلاصه نمود: مدل قاب خمشی به علت سختی جانبی کم، در برابر نیروهای جانبی دچار تغییرشکل‌های زیادی شده و به ازای نیروی جانبی کمتری نسبت به دیوار برشی دچار شکست می‌گردد. همچنین به دلیل نرمی قابل توجه آن، مکانیزم کاهش سختی جانبی با سرعت و شتاب کمتری حادث می‌گردد. از سوی دیگر، مدل دیوار برشی یک سیستم بسیار سخت با مقاومت جانبی قابل ملاحظه است. رفتار این مدل با فرض مصرف آرماتور یکسان با پانل ساندویچی، به صورت شکننده می‌باشد. اما در حالت ترکیب قاب و پانل، عملکرد خمشی و شکل پذیر قاب خمشی اولیه به همراه عملکرد برشی و همراه با سختی جانبی نسبتاً بالای پانل، سختی و مقاومت لازم در برابر نیروهای جانبی ناشی از تحریکات شدید تأمین شده است.

جدول (۵): مقایسه کمی نتایج مطالعات آزمایشگاهی و عددی.

درصد اختلاف (%)			نتایج <i>Perform</i> (۳)	نتایج <i>Ansys</i> (۲)	نتایج آزمایشگاهی (۱)	معیار مقایسه
۳ ۲	۳ ۱	۲ ۱				
۴/۲	۸/۱	۵/۷	۹۷/۵	۹۳/۶	۹۰/۲	حداکثر نیروی اعمالی ^{۱*} (کیلونیوتن)
—	۷/۴	—	۲۷/۶	—	۲۵/۷	حداکثر تغییر مکان ^{۲*} (میلیمتر)
۱۶/۲	۱۹/۴	۲/۸	۱۲/۹	۱۱/۱	۱۰/۸	سختی اولیه ^{۳*} (کیلونیوتن / میلیمتر)
—	۵/۷	—	۳/۷	—	۳/۵	شکل پذیری ^{۴*} (بی بعد)

$\mu - ^*۴$

$K_i - ^*۳$

$\Delta_{max} - ^*۲$

$P_{max} - ^*۱$

در تغییر شکل‌های محدود افزایش یابد.
ب- سیستم ترکیبی با پانل دارای سختی اولیه نسبتاً مناسبی بوده و طی مراحل متوالی بارگذاری به تدریج دچار کاهش سختی شده است. شکل منحنی کاهش سختی این سیستم مشابه قاب خمشی، کاملاً هموار و با شیب مناسب می‌باشد و در آن پله‌های ناگهانی کاهش سختی مشاهده نمی‌شود. اما در حالت دیوار برشی معادل، سختی اولیه بسیار زیاد بوده و تا حد باربری جانبی زیادی عملکرد خطی خود را حفظ می‌نماید.

پ- در گزینه ترکیبی قاب و پانل، به ویژه در ساختمانهای کوتاه، مزایای هر دو سیستم متداول قاب خمشی (عملکرد خمشی نرم و شکل پذیر) و دیوار برشی (عملکرد برشی با مقاومت و سختی اولیه بالا) تا حد زیادی مشاهده شده و معایب آنها نیز مرتفع گردیده است.

ت- مقایسه نتایج مطالعات آزمایشگاهی و عددی بر روی مدل ترکیبی قاب و پانل نشان می‌دهد علی‌رغم تمامی ساده‌سازی‌های صورت گرفته در مدل‌سازی‌های نرم‌افزاری، نتایج تطابق بسیار خوبی با یکدیگر دارند و می‌توانند در تحقیقات آتی نیز مورد استفاده قرار گیرند.

۶- سپاسگزاری

در خاتمه از زحمات چند ماهه آقایان جهانپور و شاهرادی که در قالب پایان‌نامه کارشناسی ارشد، مسؤولیت انجام بخش عمده‌ای از مطالعات آزمایشگاهی را بر عهده داشتند، نهایت تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

شکننده‌تر بودن رفتار مدل‌های عددی نسبت به مدل‌های آزمایشگاهی است. همچنین وجود پله‌های متوالی در منحنی پوش مدل آزمایشگاهی به خصوص در مرحله کاهش باربری به علت ناهمگنی‌های موجود در ساخت و یا اتصالات اعضاء به یکدیگر می‌باشد. از این مسأله در مدل‌سازی‌های عددی چشم‌پوشی گردیده و به این ترتیب منحنی پوش شکل هموارتری پیدا می‌کند.

به این ترتیب می‌توان این گونه نتیجه‌گیری کرد که علی‌رغم تمامی ساده‌سازی‌های صورت گرفته در مدل‌سازی سیستم ترکیبی در نرم‌افزار *Perform*، از جمله رفتار چندخطی مصالح مصرفی، شرایط تکیه‌گاهی صلب و کاملاً پیوسته، همگن بودن اجزاء، چشم‌پوشی از نارسایی‌های حین ساخت و مهمتر از همه اتصال کامل تمامی اجزاء به یکدیگر (پانل و قاب)، همچنان نتایج آنالیزهای عددی و مطالعات آزمایشگاهی تطابق بسیار خوبی دارند و می‌تواند در سایر مدل‌سازی‌های عددی نیز مورد استفاده قرار گیرد.

۵- نتیجه‌گیری

در نهایت می‌توان با تکیه بر داده‌های موجود در جداول و منحنی‌های ارائه شده در بخش‌های گذشته، نتیجه‌گیری‌های زیر را بیان نمود:

الف- اگرچه افزودن پانل به قاب بتن مسلح موجود سبب

کاهش ۲۱ درصدی در میزان پریرود ارتعاشی مود اول می‌گردد، اما افزایش سختی، شکل‌پذیری و همچنین باربری نهایی قاب اولیه به ترتیب به میزان ۸۰، ۳۰ و ۴۰ درصد باعث شده است تا سطح ایمنی و عملکرد مورد انتظار از سازه بالاخص

۷- مراجع

۸. جهانپور، علیرضا (۱۳۸۲). تعیین ضریب شکل پذیری و برآورد ضریب رفتار پانل‌های ساندویچی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
۹. دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمانهای موجود (۱۳۸۱). پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
10. Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, Report No. FEMA 356, FEMA, Washington, D.C.
11. Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, Report No. FEMA 273, FEMA, Washington, D.C.
۱۲. صافحیان، مجید (۱۳۸۶). تحلیل دینامیکی غیرخطی قابهای بتن مسلح تقویت‌شده با پانل‌های پیش‌ساخته ساندویچی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
13. Structural Engineering Software, RAM International (2000). Ram perform user guide 3D-Ver.1.25, www.ramperform.com.
1. Thome, S. and Rizzo, C. (2004). Upgrading concrete floors, *Concrete International*, **26**(6).
2. Jagdish, C. and Nijhawan, P. (1998). Insulated wall panels interface shear transfer, *PCI Journal*, May-June, **95**(8), 48-59.
3. Rezaifar, O., Kabir, M.Z., Taribakhsh, M., and Tehranian, A. (2008). Dynamic behaviour of 3D-panel single-story system using shaking table testing, *Engineering Structures*, **30**(2), 318-337.
4. Kabir, M. (2005). Structural performance of 3D sandwich panels under shear and flexural loading, *Scientia Iranica*, **12**(4), 402-408.
5. Einea, A. (1992). Structural and thermal efficiency of precast concrete sandwich panel system, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, University of Nebraska-Lincoln, Omaha.
۶. باقرزاده، افشین (۱۳۷۸). تعیین پارامترهای مکانیکی پانل‌های ساندویچی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.
۷. نجفی، مجتبی (۱۳۸۲). مطالعات آزمایشگاهی و عددی برش بین لایه‌ای در پانل‌های ساندویچی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.