

رفتار لرزه‌ی بین میان‌قاب‌های آجری در قاب‌های بتن مسلح تحت اثر هم‌زمان نیروهای داخل و خارج از صفحه

محسن علی‌نژاد (کارشناس ارشد)

مسعود سلطانی‌محمدی* (دانشیار)

عباسعلی تسنیمی (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۳ (۳۰-۲، شماره ۱/۴، ص. ۱۹۹-۱۹۶، یادداشت نثی)

میان‌قاب‌های آجری به دلایل معماری و همچنین سازه‌ی به صورت گسترده‌ی در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. معمولاً میان‌قاب‌های بنایی عناصر معماری محسوب می‌شوند و وجودشان توسط مهندسان صرف‌نظر می‌شود. وجود میان‌قاب‌ها باعث ایجاد تغییرات عمده‌ی در خواص سازه می‌شود، لذا در نظر گرفتن نقش میان‌قاب‌ها در فرآیند تحلیل و طراحی، امری صحیح نیست. از میان مدل‌های ارائه‌شده در این زمینه، مدل دستک فشاری به علت سادگی و دقت نسبتاً قابل قبول برای مدل‌سازی داخل صفحه‌ی میان‌قاب‌ها، بیشتر از سایر مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. طی رخداد یک زلزله، میان‌قاب به‌طور هم‌زمان در جهت داخل و خارج صفحه تحت اثر نیرو قرار می‌گیرد. این اثر هم‌زمانی نیروها در بسیاری از مدل‌های معرفی‌شده برای مدل‌سازی رفتار داخل صفحه‌ی میان‌قاب‌ها از جمله مدل دستک فشاری نادیده گرفته می‌شود. از این رو در این نوشتار، به بررسی رفتار میان‌قاب تحت اثر هم‌زمان نیروهای داخل و خارج از صفحه پرداخته شده است. بدین منظور ابتدا با ریز مدل‌سازی اجزاء میان‌قاب شامل واحدهای آجری و اجزاء تماسی، مدل یک طبقه و یک دهانه‌ی قاب پر شده با میان‌قاب یا همان قاب مرکب مورد مطالعه‌ی عددی قرار گرفته است. پس از مقایسه‌ی نتایج تحلیل با نتایج آزمایشگاهی و اعتبارسنجی مدل، به بررسی اثرات هم‌زمانی نیروهای داخل و خارج از صفحه بر رفتار میان‌قاب پرداخته شده است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که هم‌زمانی نیروهای داخل و خارج از صفحه، اثر ناچیزی در ظرفیت داخل صفحه دارد، اما از ظرفیت خارج از صفحه می‌کاهد.

واژگان کلیدی: میان‌قاب آجری، ریز مدل‌سازی، اثر هم‌زمان نیروهای داخل و خارج از صفحه، مطالعه‌ی عددی.

۱. مقدمه

قاب‌های ساختمانی بیش از پیش ضروری به نظر می‌رسد. لذا آئین‌نامه‌ها و ضوابط ساختمانی جدید ضمن تأکید بر اهمیت در نظرگیری میان‌قاب‌ها در روند تحلیل و طراحی، مدل‌ها و توصیه‌هایی بدین منظور ارائه کرده‌اند. مطالعه‌ی در زمینه‌ی میان‌قاب‌های آجری اولین بار در سال ۱۹۵۰ انجام شد،^[۱] که در آن با مشاهده‌ی تکیه‌ی قاب به میان‌قاب، ایده‌ی قید قطری معادل برای مدل‌سازی میان‌قاب در قاب‌های مرکب جهت انجام تحلیل‌های سازه‌ی پیشنهاد شد. در سال ۱۹۶۲ نیز آزمایش‌هایی بر روی قاب‌های فولادی با میان‌قاب بتنی انجام شد.^[۲] این آزمایش‌ها منجر به این نتیجه شد که میان‌قاب را می‌توان با یک قید قطری معادل جایگزین کرد.

میان‌قاب‌های آجری غیرمسلح به‌طور گسترده‌ی در ساختمان‌ها به عنوان دیوار پیرامونی ساختمان‌ها و جداکننده‌ی فضاهای داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. وجود میان‌قاب در یک ساختمان باعث تغییرات مقاومت، سختی، دوره‌ی تناوب و به‌طور کلی عملکرد لرزه‌ی ساختمان می‌شود. به‌علت وجود نیروی اندرکنشی بین قاب و میان‌قاب ظرفیت باربری و سختی قاب مرکب نسبت به قاب تنها افزایش می‌یابد. میان‌قاب‌ها عناصری هستند که وزن و سختی قابل توجهی دارند. با توجه به مطالب ذکرشده، دخالت دادن نقش میان‌قاب‌ها در مراحل مختلف تحلیل و طراحی

* نویسنده مسئول

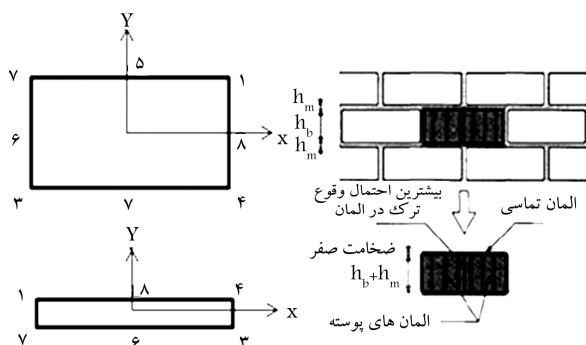
تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۲/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۲/۳/۲۸، پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۲۰.

alinejad.157@gmail.com
msoltani@modares.ac.ir
tasnimi@modares.ac.ir

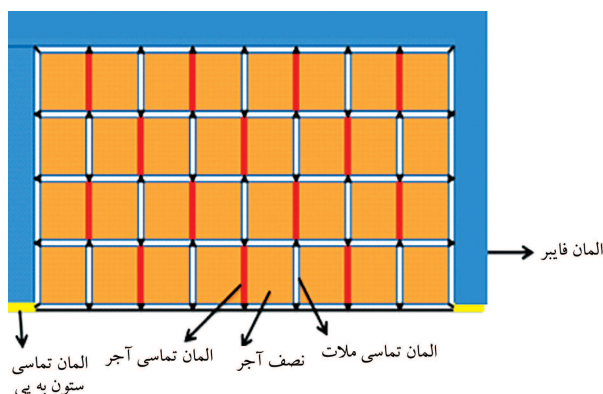
در آزمایشگاه بتن دانشگاه توکیو استفاده شده است. این نرم‌افزار با استفاده از مجموعه‌ای از المان‌های مختلف، قابلیت مدل‌کردن رفتار غیرخطی سازه‌ها، تحت حالات مختلف بارگذاری را دارد و با عنایت به در اختیار بودن مجوز استفاده و توسعه‌ی آن توسط نویسندگان، این برنامه در فرایند پژوهش استفاده شد. در این پژوهش، برای مدل‌سازی اعضای قاب بتن مسلح، از المان فایبر (المانی با سطح مقطع فیبری) با ۷ گره استفاده شده است. ۳ گره برای معرفی درجات آزادی انتقالی، ۳ گره برای معرفی درجات آزادی دورانی و یک گره‌ی مجازی برای بیان محور محلی و جهت‌گیری المان مورد استفاده قرار گرفته است. با استفاده از این ۷ گره، موقعیت هندسی المان و ارتباط بین محور محلی و کلی مشخص می‌شود.

برای مدل‌سازی میان‌قاب آجری غیرمسلح، از المان ۸ گره‌ی برای مدل‌سازی آجر و المان ۶ گره‌ی برای مدل‌سازی ملات استفاده شده است. جهت منطبق شدن گره‌های آجر و ملات باید المان آجر را طوری تقسیم کرد که بتوان ملات پیرامون آجر را مدل کرد. برای انجام این کار، المان آجر دست‌کم به دو قسمت تقسیم شده و بین دو نصف آجر، المان تماسی آجری قرار گرفته است (شکل ۱).

همچنین برای در نظر گرفتن اندرکنش قاب با میان‌قاب از المان تماسی در دور تا دور میان‌قاب استفاده شده است (شکل ۲). مشخصات میان‌قاب بر مبنای خواص منشور بنایی تعریف شده است. به منظور مدل‌سازی رفتار لغزش و بازشدگی المان‌های تماسی از مدل چگالی تماسی لی و همکاران استفاده شده است.^[۱۲] این مدل که اصولاً برای بیان رفتار سطح ترک‌خورده‌ی بتنی توسعه یافته است، در پژوهشی در سال ۲۰۰۹، برای معرفی سطح تماس آجر و ملات اصلاح شده است.^[۱۳] آجرها توسط المان‌های ۸ گره‌ی ساخته شده‌اند و برای مدل‌سازی آجر باید ضخامت، مدول



شکل ۱. نحوه‌ی مدل‌سازی آجر و ملات به صورت یک المان پیوسته.



شکل ۲. مدل‌سازی قاب و میان‌قاب.

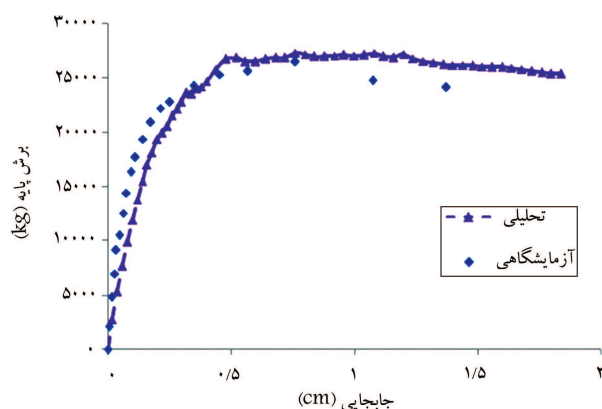
همچنین در سال ۱۹۷۱ با اقتباس از مفهوم قید فشاری معادل و با استفاده از آزمایش‌های مختلف بر روی قاب‌های مرکب با میان‌قاب‌های مرکب و آجری، یک رابطه‌ی نیمه تجربی برای محاسبه‌ی عرض قید فشاری معادل پیشنهاد شد.^[۳] همچنین در پژوهشی در سال ۱۹۹۷، رفتار قاب‌های بتنی مرکب به روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفت،^[۴] که در آن برای مدل‌سازی رفتار بتن در قاب‌های بتنی و مصالح بنایی در میان‌قاب‌ها نیز از مدل اجزاء محدود ترک پخشی استفاده شده است. تحلیل‌های انجام‌شده توسط این روش نشان داد که روش مذکور به درستی قادر به پیش‌بینی مودهای گسیختگی قاب‌های مرکب بتنی است و از آن می‌توان برای ارزیابی قاب‌های مرکب استفاده کرد.

بیشتر پژوهش‌ها در زمینه‌ی میان‌قاب‌های آجری در خصوص رفتار داخل صفحه و یا خارج از صفحه بدون در نظر گرفتن اندرکنش این نیروها بوده است. پژوهشگرانی نیز اثر اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه را بر رفتار داخل صفحه‌ی میان‌قاب قابل ملاحظه دانسته‌اند.^[۵-۸] اما در مقابل، پژوهشگران دیگری اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه در میان‌قابی که در جهت خارج از صفحه در سطوح کم تا متوسط بارگذاری می‌شود، بر رفتار داخل صفحه‌ی میان‌قاب را ناچیز می‌دانند.^[۹، ۱۰] در مطالعه‌ی دیگری همچنین عنوان شده است که برای بارگذاری کمتر از ۲۰٪ ظرفیت خارج از صفحه‌ی میان‌قاب، اثر کاهشی بارگذاری خارج از صفحه در ظرفیت داخل صفحه بسیار ناچیز و قابل صرف نظر کردن است.^[۹] در سال ۲۰۰۷ نیز با استفاده از تحلیل‌های اجزاء محدود، مدل SAT برای مدل‌سازی میان‌قاب‌ها ارائه شده است. این مدل با در نظرگیری یک درجه‌ی آزادی نرمال شده‌ی میان‌قابی که در مرکز میان‌قاب قرار دارد، اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه‌ی میان‌قاب را در نظر گرفته است.^[۵] پژوهشگرانی دیگری هم در سال ۲۰۰۹، مدل اندرکنشی مقطع فیبری را برای مدل‌سازی میان‌قاب‌ها ارائه کرده‌اند. در این مدل، برای هر میان‌قاب در هر دهانه از سازه، یک عضو قطری در نظر گرفته شده است، که این عضو شامل ۲ المان تیر-ستونی است که با المان فیبری مدل شده‌اند و یک گره در وسط آن است. این گره کل جرم در جهت خارج از صفحه را در خود متمرکز می‌کند.^[۶]

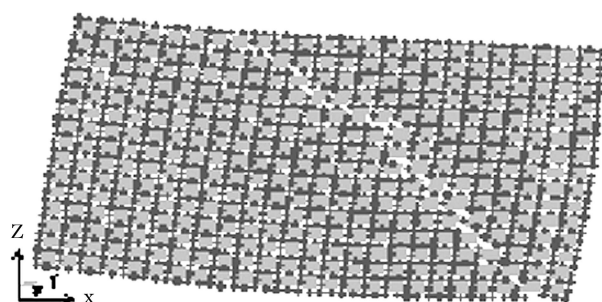
از بین پژوهش‌های مورد اشاره فقط پژوهشی در سال ۱۹۹۹ به صورت لرزه‌ی بود و نمونه‌ها روی میز لرزان مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.^[۱۰] بقیه‌ی مطالعات به صورت استاتیکی انجام گرفته‌اند، که بعضاً دارای الگوی بارگذاری متفاوتی بوده‌اند و به نظر می‌رسد این همان نکته‌ی است که باعث اختلاف نظر پژوهشگران در این زمینه شده است. در حالت واقعی نیروهای داخل و خارج از صفحه، هم‌زمان به مقدار بیشینه‌ی خود نمی‌رسند و نسبت این دو نیرو در زمان‌های مختلف متغیر است، لذا الگوهای بارگذاری استاتیکی هم‌زمان، منعکس‌کننده‌ی آنچه میان‌قاب طی یک رخداد زلزله متحمل می‌شود، نیستند. مضاف بر اینکه نحوه‌ی بارگذاری خارج از صفحه‌ی میان‌قاب‌ها در مراجع مختلف دارای اختلافات زیادی هستند، که باعث ایجاد اختلاف در نتایج می‌شوند. در این نوشتار برای بررسی اثر هم‌زمانی نیروهای داخل و خارج صفحه در رفتار میان‌قاب‌ها هر دو رویکرد استاتیکی و دینامیکی مورد توجه قرار گرفته است. ابتدا با رویکرد تحلیل استاتیکی غیرخطی به بررسی اثر هم‌زمانی نیروهای داخل و خارج از صفحه پرداخته شده و سپس در رویکرد دوم با تحلیل دینامیکی غیرخطی افزاینده این موضوع مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مدل‌سازی

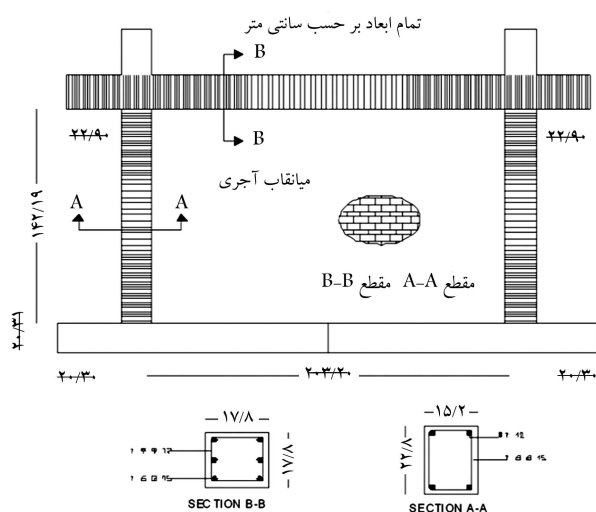
در این مطالعه، برای مدل‌سازی سازه‌ها، از نرم‌افزار COM3^[۱۱] توسعه یافته



شکل ۴. منحنی بار- تغییر مکان دیوار w۱.



شکل ۵. الگوی ترک‌خوردگی دیوار از نتایج تحلیل مدل عددی.



شکل ۶. هندسه‌ی مدل و ابعاد مقاطع و جزئیات آرماتورگذاری.

نمونه‌ی آزمایشی از یک قاب خمشی بتن مسلح ۶ طبقه و ۳ دهانه الگوبرداری شده است. مقاومت متوسط مصالح به‌کاررفته در جدول ۲ ارائه شده است.

نسبت ارتفاع به طول دهانه‌ی نمونه‌ها $h/l = \frac{2}{3}$ و بارهای طراحی براساس ۱۹۹۱ UBC تعیین شده‌اند. نمونه‌های آزمایشگاهی از دهانه‌ی میانی در طبقه‌ی زیرین و با مقیاس $\frac{1}{4}$ الگوبرداری شده است. ابعاد ستون‌ها در نمونه‌ی آزمایشی 178×178 میلی‌متر و عرض تیر نمونه‌ی ۱۵۲ و ارتفاع آن ۲۲۹ میلی‌متر است. دیوارهای پرکننده شامل واحد آجرکاری توپر به ضخامت ۹/۲۱ cm هستند (شکل ۶). بارگذاری جانبی نیز به صورت بارگذاری یک‌نواخت فراینده است (جدول ۳).

ارتجاعی، مقاومت فشاری و کششی، ضریب پواسون و وزن واحد حجم منشور بنایی تعریف شود. واحد تماسی از المان‌های ۶ گره‌یی ساخته شده است و جهت مدل‌سازی المان تماسی باید مقاومت فشاری، ضخامت ملات و همچنین مقدار چسبندگی و ضریب اصطکاک داخلی ملات تعریف شود. رفتار کششی پس از ترک‌خوردگی با استفاده از مدل نرم‌شدگی مائکاو و همکاران^[۱۱] که میزان شیب نرم‌شدگی آن وابسته به انرژی شکست است، تعریف شده است.

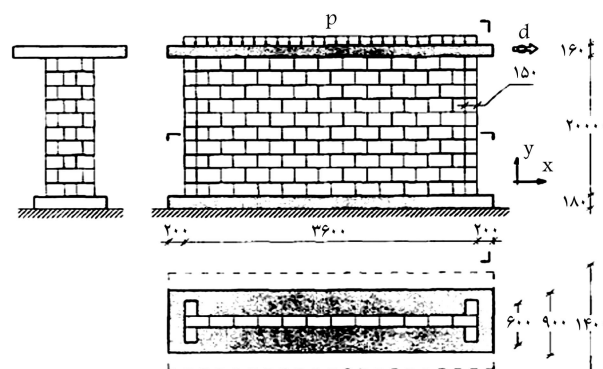
۳. اعتبارسنجی مدل‌سازی

۳.۱. آزمایش دیوار آجری گنز و تولیمان

به منظور بررسی دقت روش و مدل‌های رفتاری استفاده‌شده در تحلیل اعضای مصالح بنایی، یکی از دیوارهای آزمایش‌شده توسط گنز و تولیمان تحت بارهای اعمالی قائم و جانبی مورد تحلیل قرار گرفته است.^[۱۴] این دیوار در معرض بار قائم گسترده با شدت 0.61 kg/cm^2 قرار گرفته است. این دیوار در برابر اعمال جانبی افقی در تراز دال بتنی بالای دیوار، پاسخ بسیار شکل‌پذیری به همراه شکست برشی و کششی در امتداد ترک‌های پله‌یی قطری نشان داده است. هندسه‌ی دیوار آزمایش‌شده و نحوه‌ی اعمال بار در شکل ۳ و مشخصات مصالح در راستای متعام در جدول ۱ ارائه شده است. مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی دیوار در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تطبیق مناسبی به ویژه در مقاومت نهایی حاصل شده است، که نشان از دقت فرضیات مدل‌سازی و مدل‌های رفتاری استفاده‌شده دارد. الگوی ترک‌خوردگی دیوار حاصل از مدل‌سازی عددی دیوار در شکل ۵ ارائه شده است.

۳.۲. قاب شماره‌ی ۹ محرابی^[۴]

در این نوشتار، به منظور بررسی صحت مدل‌سازی رفتار قاب مرکب، نتایج حاصل از آزمایش‌های محرابی که در دانشگاه کلرادو آزمایش شده و^[۴] با نتایج تحلیلی مقایسه شده‌اند. برای اعتبارسنجی مدل تحلیلی از نتایج قاب شماره‌ی ۹ استفاده شده است.



شکل ۳. ابعاد هندسی دیوارهای w گنز و تولیمان.^[۱۴]

جدول ۱. مشخصات مصالح بنایی دیوار.

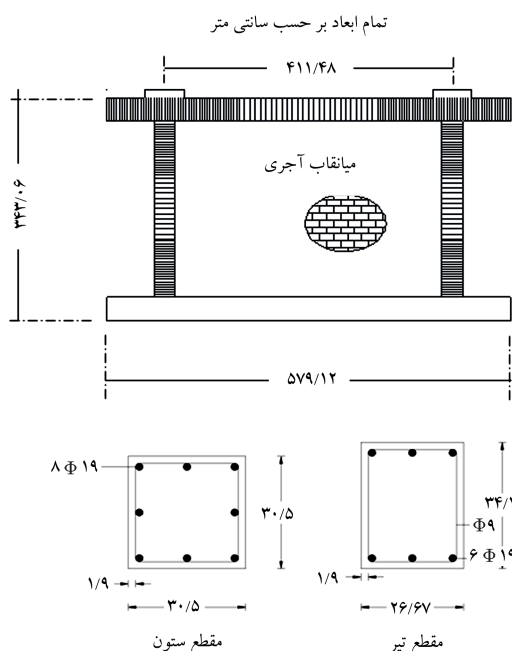
E_w	f_{m_w}	f_{m_y}	f_{t_w}	f_{t_y}
(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
۲۴۶۰	۱/۸۷	۷/۶۱	۰/۲۸	۰/۰۵

جدول ۲. مقاومت متوسط مصالح به‌کاررفته در قاب‌های آزمایشی.^[۱۰]

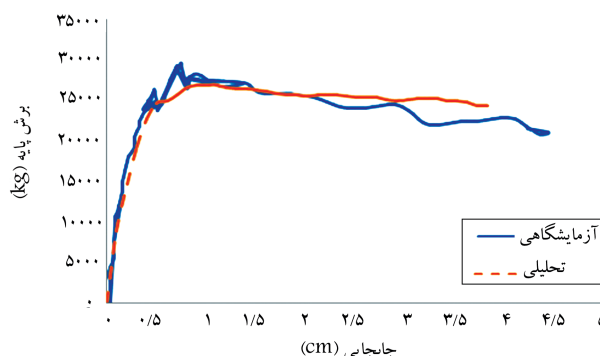
آزمایش	مصالح بتن مسلح قاب			مصالح بنایی دیوار	
	مقاومت فشاری (kg/cm ²)	کرنش متناظر با تنش بیشینه‌ی فشاری	مقاومت کششی (kg/cm ²)	مقاومت فشاری (kg/cm ²)	کرنش متناظر با تنش بیشینه‌ی فشاری
محرابی	۲۶۸	۰/۰۰۲۷	۲۷	۱۴۲	۰/۰۰۲۶

جدول ۳. بارگذاری نمونه‌ی آزمایشی.^[۱۰]

شماره‌ی آزمایش	نوع واحد آجرکاری	بار جانبی	توزیع بارهای قائم (kg)
۹	توپر	یکنواخت	ستون‌ها
		فزاینده	تیر
			۹۷۹۰
			۱۹۵۸۰



شکل ۸. هندسه‌ی مدل و ابعاد مقاطع و جزئیات آرماتورگذاری.



شکل ۷. منحنی نیرو - تغییر مکان قاب شماره‌ی ۹ محرابی.^[۴]

نتیجه‌ی حاصل از تحلیل مدل نمونه در مقایسه با منحنی نیرو - جابجایی آزمایشگاهی در شکل ۷ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، منحنی حاصل از تحلیل، تطابق خوبی با منحنی آزمایشگاهی دارد. در ادامه، این شیوه‌ی مدل‌سازی، مبنای مطالعات پارامتریک پیش رو قرار گرفته است.

۴. تحلیل‌های استاتیکی

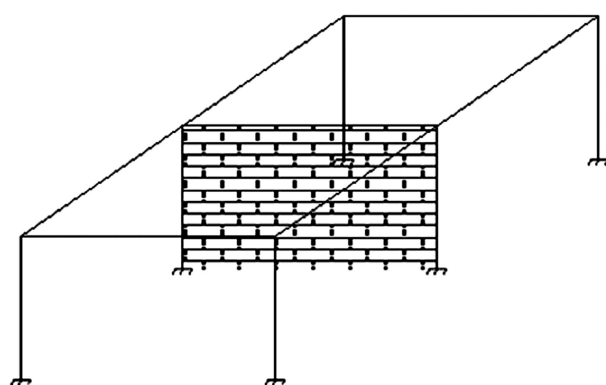
در این قسمت برای بررسی اثرات پیش آسیب‌پذیری دو حالت حدی بارگذاری در نظر گرفته شده است:

(الف) پیش بارگذاری خارج از صفحه؛

(ب) پیش بارگذاری داخل صفحه.

در حالت اول، ابتدا میان‌قاب در جهت خارج از صفحه در سطوح مختلف بارگذاری و سپس باربرداری شده است، سپس میان‌قاب‌های آسیب‌دیده در جهت داخل صفحه، تحلیل و منحنی اندرکنش ظرفیت باربری رسم شده است. در حالت دوم، ابتدا میان‌قاب در جهت داخل صفحه در سطوح مختلف، بارگذاری و سپس باربرداری شده است؛ بعد از آن میان‌قاب‌های آسیب‌دیده در جهت خارج از صفحه تحلیل و منحنی اندرکنش در این حالت نیز رسم شده است. مدل تحلیلی براساس مدل آزمایشگاهی مسلم و همکاران^[۵] که از روی یک قاب ۵ طبقه با ۳ دهانه الگوبرداری و در دهانه‌ی وسط دارای میان‌قاب است، انتخاب شده است.

مدل آزمایشگاهی مسلم و همکاران براساس آئین‌نامه‌های ACI 318 و NEHRP طراحی شده است. مشخصات مدل تحلیلی در جدول ۴ و هندسه‌ی مدل در شکل ۸ آمده است. ضخامت میان‌قاب ۹/۵ سانتی‌متر و به صورت آجر توپر است.

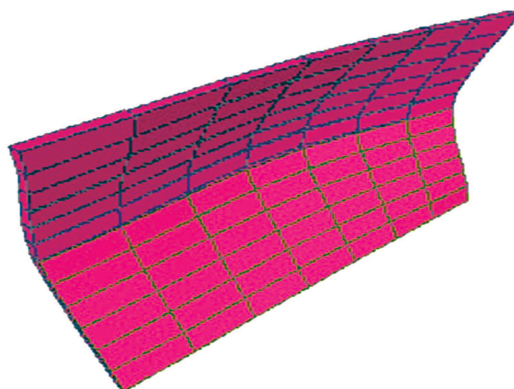


شکل ۹. مدل سازه‌ی سه بعدی تحلیلی.

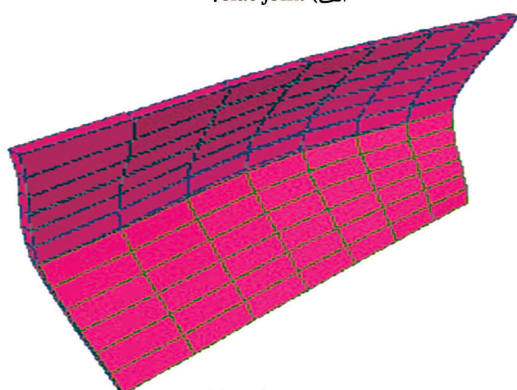
چون در سازه‌های سه بعدی، حرکت ستون‌ها و تیر در جهت خارج از صفحه توسط تیرهای دهانه‌های مجاور محدود می‌شود، برای در نظرگیری شرایط تکیه‌گاهی ستون‌ها با افزودن ۲ دهانه به مدل دو بعدی، مدل سه بعدی سازه‌ی یک طبقه ساخته و برای مدل‌سازی طبقات بالاتر، جرم لرزه‌ی معادل وزن طبقات بالا روی ستون‌های مدل اضافه شده است. شکل سه بعدی مدل تحلیلی به صورت شماتیک در شکل ۹ ارائه شده است. بار (جرم معادل) روی هر یک از ستون‌های میانی مدل برابر با ۲۱۰۰۰ کیلوگرم و ستون‌های دیگر ۱۰۵۰۰ کیلوگرم منظور شده است. همان‌طور که ذکر شد، برای مدل‌سازی اتصال میان‌قاب به قاب از المان اتصال استفاده شده است. از آنجایی که شرایط اتصال میان‌قاب به قاب یکی از مهم‌ترین

جدول ۴. مقاومت متوسط مصالح به‌کاررفته در مدل تحلیلی.

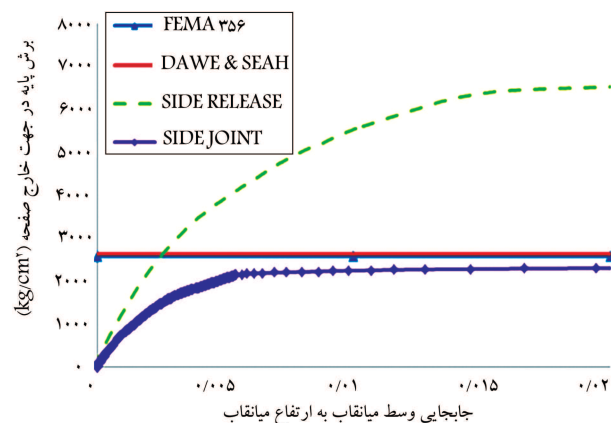
مصالح بتن مسلح قاب			مصالح بنایی دیوار	
مقاومت فشاری	کرنش متناظر با تنش بیشینه‌ی فشاری	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	کرنش متناظر با تنش بیشینه‌ی فشاری
(kg/cm^2)		(kg/cm^2)	(kg/cm^2)	
۳۷۲	—	۲۹٫۶	۱۰۰	۰٫۰۰۳۸



الف) side joint



ب) side release

شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج حاصل از تحلیل با نتایج حاصل از رابطه‌ی FEMA ۳۵۶ و تئوری داو و سیا برای لاغری.^[۱۴]

پارامترهای مؤثر در ظرفیت خارج از صفحه‌ی میان‌قاب است، در ادامه، برای بررسی شرایط مرزی (اتصال قاب به میان‌قاب) ۲ حالت در نظر گرفته شده است:

الف) میان‌قاب در ۴ طرف به قاب متصل است^۱؛

ب) میان‌قاب فقط در بالا و پایین به قاب متصل و در اطراف آزاد است^۲ (میان‌قاب به ستون‌ها متصل نشده است).

پژوهش‌های پیشین نشان داده است که اتصال صلب بین قاب و میان‌قاب، سختی و مقاومت خارج از صفحه‌ی میان‌قاب را بیشتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند.^[۵] بنابراین، در مدل مورد مطالعه برای اتصال قاب به میان‌قاب از المان اتصالی استفاده شده است. برای بررسی اثر شرایط مرزی در ظرفیت خارج از صفحه‌ی میان‌قاب، مدل تحلیلی در ۲ حالت side release و side joint مورد آنالیز استاتیکی بارافزون در جهت خارج از صفحه قرار گرفته و نتایج حاصل از تحلیل با نتایج حاصل از رابطه‌ی FEMA ۳۵۶ و تئوری داو و سیا،^[۱۵] که می‌توان گفت بهترین تئوری از بین تئوری‌های موجود در زمینه‌ی مقاومت خارج از صفحه‌ی میان‌قاب است،^[۵] در شکل ۱۰ مقایسه شده است. همچنین تغییرشکل میان‌قاب در این ۲ حالت به صورت مقیاس شده در شکل ۱۱ ارائه شده است.

همان‌طور که در شکل ۱۰ آمده است، در حالتی که میان‌قاب به ستون‌ها متصل نشده است (عمل قوسی یک طرفه) نتایج حاصل از تحلیل با نتایج حاصل از رابطه‌ی FEMA ۳۵۶ و تئوری داو و سیا تطابق بهتری دارد. مسلم و هاشمی،^[۵] نیز در مدل‌های عددی خود برای میان‌قاب‌هایی با شرایط مشابه دو حالت بررسی‌شده‌ی فوق نشان دادند در حالتی که المان‌های میان‌قاب از المان‌های ستون جدا شده‌اند، تطابق نتایج حاصله با مدل FEMA ۳۵۶ و تئوری داو و سیا بیشتر است. اما در اینجا دو موضوع مطرح است:

۱. میان‌قاب‌ها عملاً در تماس با ستون‌های قاب هستند، هر چند در صورت عدم وجود اتصال مکانیکی، این اتصال مانند اتصال قاب به میان‌قاب در بالا و پایین نیست و نسبت به آنها ضعیف‌تر است. بعضی پژوهشگران همچون مسلم و

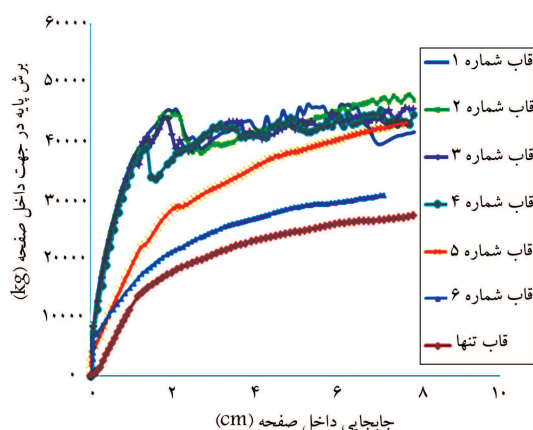
شکل ۱۱. تغییرشکل خارج از صفحه‌ی میان‌قاب در اثر بارگذاری خارج از صفحه.

هاشمی، با توجه به این موضوع و به صورت محافظه‌کارانه در مدل عددی با تعریف گره‌های مجزا برای المان‌های میان‌قاب و ستون، این المان‌ها را از یکدیگر جدا کرده‌اند. اما این نکته حائز اهمیت است که در نظر نگرفتن المان اتصالی موجب درهم فرو رفتگی المان‌ها تحت بار داخل صفحه می‌شود. لذا عدم در نظرگیری المان اتصالی قاب به میان‌قاب در طرفین باعث می‌شود که اندرکنش نیروهای داخل و خارج صفحه در مدل دیده نشوند. همچنین میان‌قاب‌های بنایی تحت اثر بار خارج از صفحه دچار افزایش حجم می‌شوند و حتی در صورت وجود انفصال بین ستون و میان‌قاب، این دو پس از کمی تغییرشکل خارج صفحه در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند و انتقال نیرو بین این دو برقرار می‌شود.

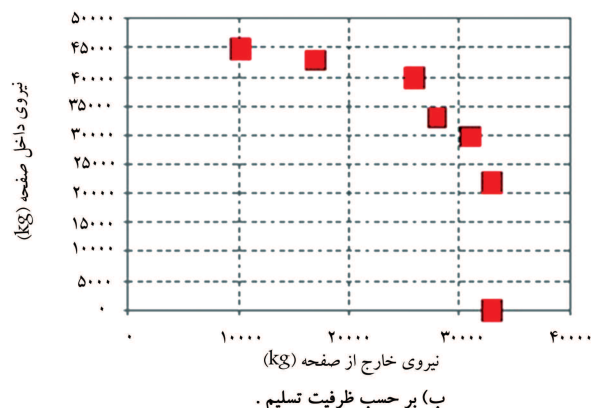
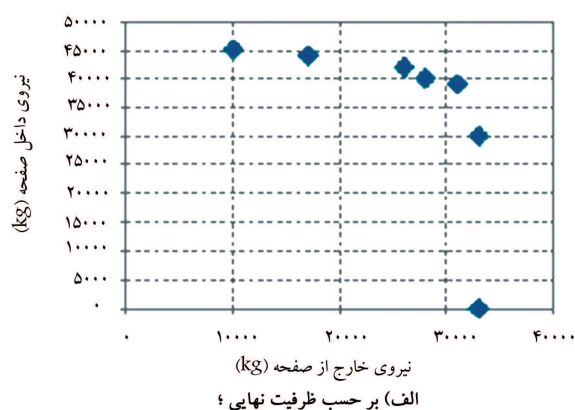
۲. اگر چه مقایسه‌ی نتایج مدل عددی با روابط پیشنهادی در شکل ۱۰، نشان از تطابق بهتر مدلی که در آن میان‌قاب در اطراف از قاب جدا شده است دارد، اما باید توجه کرد این موضوع جامعیت ندارد و بسته به هندسه و مشخصات مصالح در بعضی حالات، مدلی که در ۴ طرف از المان اتصالی استفاده شده است، تطابق بهتری با روابط مذکور دارد. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده‌ی تقریب موجود در روابط FEMA ۳۵۶ و داو و سیا،^[۱۵] باشد؛ که در پژوهش فلناگان و بنت،^[۱۶] نیز گزارش شده است. تحلیل‌های جداگانه‌ی بر روی طیف

می‌توان نتیجه گرفت در سطوح بارگذاری کم با متوسط در جهت خارج از صفحه، که رفتار میان قاب در این سطوح بارگذاری خطی است، بارگذاری خارج از صفحه در ظرفیت داخل صفحه تأثیر ناچیزی دارد. منحنی اندرکنش نیروهای داخل و نیروهای خارج از صفحه بر حسب ظرفیت نهایی و بر حسب ظرفیت تسلیم که با دو خطی کردن منحنی‌های ظرفیت شکل ۱۳ به دست آمده است، به ترتیب در شکل‌های ۱۴ الف و ۱۴ ب ارائه شده است.

مطابق شکل ۱۴، برای بارگذاری معادل ۳۰٪ ظرفیت خارج از صفحه‌ی میان قاب



شکل ۱۳. منحنی نیرو - جابجایی داخل صفحه برای قاب‌های آسیب‌دیده در سطوح مختلف در جهت خارج از صفحه.



شکل ۱۴. منحنی اندرکنش نیروی داخل و خارج از صفحه در حالت پیش بارگذاری خارج از صفحه.

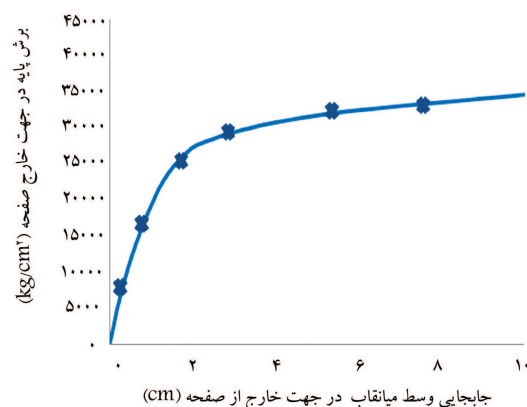
گسترده‌ی از لاغری‌ها و مقاومت فشاری مصالح میان قاب نشان داده است، که استفاده از المان کناری برای مدل‌سازی میان قاب‌ها به نتایج قابل قبول‌تری منتهی می‌شود. لذا در ادامه‌ی پژوهش‌ها، ابتدا از مدلی که میان قاب با استفاده از المان‌های اتصالی به ستون‌ها متصل است، استفاده شده است؛ که البته با کم کردن ضخامت المان‌های اتصالی کناری و تغییر مشخصات آنها نسبت به المان‌های اتصالی بالا و پایین، ضعیف‌تر مدل شده‌اند.

۱.۴. پیش بارگذاری خارج از صفحه

پس از اصلاح المان‌های اتصالی کناری با کاهش سختی دورانی این المان‌ها، مدل تحلیلی در جهت خارج از صفحه‌ی مورد تحلیل بارافزون (به صورت فشار یکنواخت افزایشی) قرار گرفت. منحنی بارافزون خارج از صفحه‌ی میان قاب در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این منحنی محور افقی جابجایی وسط میان قاب و محور قائم برش خارج از صفحه است. نقاط نشان داده شده روی این منحنی نقاطی هستند که میان قاب در جهت خارج از صفحه در تحلیل‌های جداگانه تا این نقطه بارگذاری شده‌اند و سپس باربرداری صورت گرفته است (مطابق جدول ۵).

بعد از فرایند باربرداری در این مرحله، ۶ میان قاب داریم که در سطوح مختلف در جهت خارج از صفحه آسیب دیده‌اند. مدل‌های آسیب‌دیده دوباره تحت بارگذاری داخل صفحه قرار گرفته‌اند. خانواده‌ی منحنی‌های بارافزون برای این تحلیل‌ها در شکل ۱۳ آورده شده است.

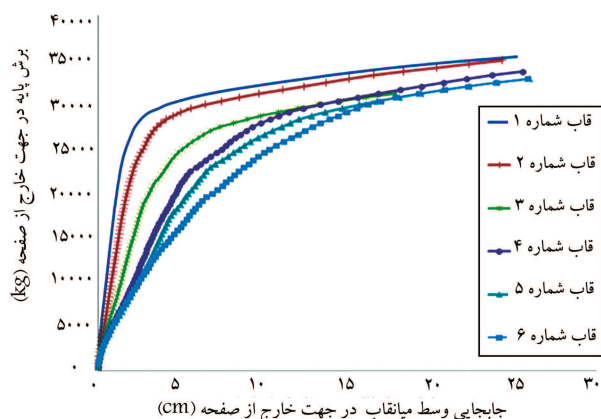
مطابق شکل ۱۳، از مدل شماره‌ی ۴ به بعد که میان قاب در جهت خارج از صفحه وارد محدوده‌ی غیرخطی شده است، با کاهش شدید سختی و مقاومت روبرو می‌شویم، تا جایی که در مدل شماره‌ی ۶ منحنی بارافزون قاب مرکب تقریباً با منحنی بارافزون قاب فقط تطبیق پیدا می‌کند، که این بدین معناست که در مدل شماره‌ی ۶ میان قاب در اثر بارگذاری خارج از صفحه به‌طور کامل آسیب دیده است و در نتیجه، سهمی در باربری داخل صفحه‌ی میان قاب ندارد. با توجه به شکل‌های ۱۲ و ۱۳



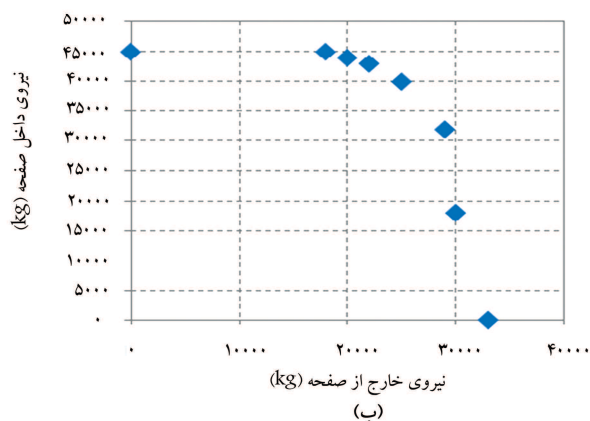
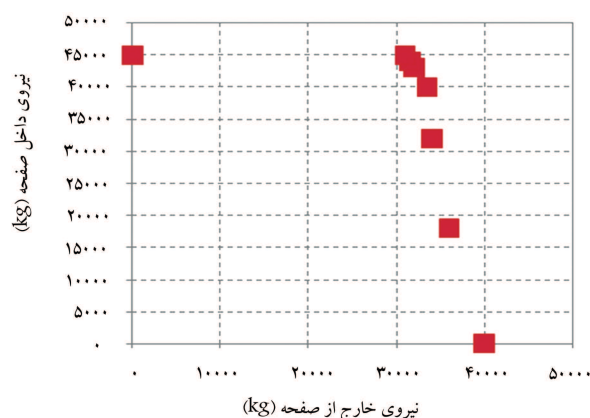
شکل ۱۲. منحنی بارافزون میان قاب در جهت خارج از صفحه.

جدول ۵. مقادیر تغییر مکان اعمالی خارج از صفحه برای مدل‌ها.

شماره‌ی مدل	مقدار تغییر مکان اعمالی (cm)	شماره‌ی مدل	مقدار تغییر مکان اعمالی (cm)
۱	۰٫۵	۴	۳
۲	۱٫۳	۵	۵٫۵
۳	۱٫۷	۶	۷٫۵



شکل ۱۶. منحنی نیرو - جابجایی خارج از صفحه برای قاب‌های آسیب‌دیده در سطوح مختلف در جهت داخل صفحه.



شکل ۱۷. منحنی اندرکنش نیروی داخل و خارج از صفحه در حالت پیش بارگذاری داخل صفحه.

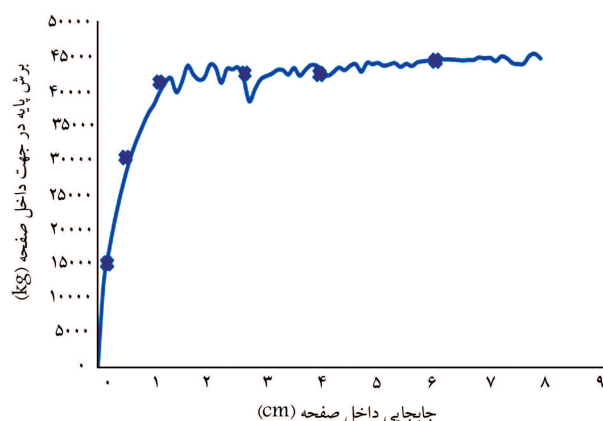
اندرکنش بر حسب ظرفیت نهایی خارج از صفحه و شکل ۱۷ ب، معرف منحنی اندرکنش بر حسب نیرو در دررفت ۲٪ است، که معادل دررفت مجاز در سطح عملکرد ایمنی جانی است. با توجه به شکل ۱۷ می‌توان گفت در سطح عملکرد ایمنی جانی اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه باعث کاهش ظرفیت خارج از صفحه‌ی میان قاب شده است.

با مقایسه‌ی این منحنی اندرکنش با منحنی اندرکنشی حالت اول (شکل ۱۴ الف) به این نتیجه می‌رسیم که ترتیب بارگذاری در نتایج تأثیرگذار است، منحنی اندرکنشی

اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه بسیار ناچیز است، اما افزایش بارگذاری خارج از صفحه باعث کاهش ظرفیت داخل صفحه‌ی میان قاب می‌شود، که این کاهش ظرفیت در ظرفیت تسلیم نسبت به ظرفیت نهایی قابل ملاحظه‌تر است.

۲.۴. پیش بارگذاری داخل صفحه

در این حالت برخلاف حالت قبل میان قاب در سطوح مختلف در جهت داخل صفحه بارگذاری می‌شود و سپس بارگذاری خارج از صفحه اعمال می‌شود. منحنی بارافزون داخل صفحه‌ی قاب مرکب در شکل ۱۵ نشان داده شده است. در این منحنی محور افقی جابجایی بالای قاب و محور قائم نیروی برش پایه در جهت داخل صفحه است. نقاط نشان داده شده روی این منحنی نقاطی هستند که میان قاب در جهت داخل صفحه در تحلیل‌های جداگانه تا این نقطه بارگذاری و باربرداری شده است (جدول ۶). بعد از فرایند باربرداری در این مرحله، ۶ میان قاب داریم که در سطوح مختلف در جهت داخل صفحه آسیب دیده‌اند. مدل‌های آسیب‌دیده دوباره تحت بارگذاری خارج از صفحه قرار گرفته‌اند، خانواده‌ی منحنی‌های بارافزون برای این تحلیل‌ها در شکل ۱۶ نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش جابجایی داخل صفحه از سختی میان قاب در جهت خارج از صفحه کاسته شده است. مهم‌ترین عامل ایجاد مقاومت در جهت خارج از صفحه‌ی میان قاب، کنش قوسی است. یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد کنش قوسی در میان قاب، اتصال کامل قاب با میان قاب است.^[۱۶] با افزایش جابجایی قاب مرکب، میان قاب از قاب در گوشه‌های تحت کنش جدا می‌شود. این جداسازی سبب کاهش اتصال میان قاب به قاب و در نتیجه کاهش عمل قوسی می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت که با افزایش آسیب داخل صفحه از سختی و مقاومت خارج از صفحه‌ی میان قاب کاسته می‌شود. همان‌طور که از شکل ۱۶ قابل استنباط است، در این حالت تغییرات سختی نسبت به تغییر مقاومت قابل ملاحظه‌تر است. منحنی اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه برای این حالت در شکل ۱۷ نشان داده شده است. شکل ۱۷ الف، معرف منحنی



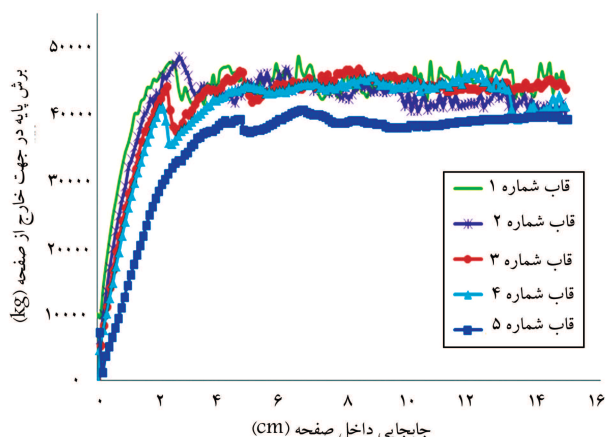
شکل ۱۵. منحنی بارافزون داخل صفحه‌ی قاب مرکب.

جدول ۶. مقادیر تغییر مکان اعمالی داخل صفحه برای مدل‌ها.

شماره‌ی مدل	مقدار تغییر مکان اعمالی داخل صفحه (cm)	شماره‌ی مدل	مقدار تغییر مکان اعمالی داخل صفحه (cm)
۱	۰٫۲	۴	۳
۲	۰٫۶	۵	۴٫۵
۳	۱٫۴	۶	۷

جدول ۷. شدت بار لرزه‌ی خارج از صفحه برای مدل‌های تحلیلی.

شماره‌ی مدل	شدت بار لرزه‌ی خارج از صفحه (g)	شماره‌ی مدل	شدت بار لرزه‌ی خارج از صفحه (g)
۱	۰	۴	۰/۹
۲	۰/۳	۵	۱/۴
۳	۰/۶		



شکل ۱۸. منحنی نیرو- جابجایی داخل صفحه برای قاب‌های آسیب‌دیده در سطوح مختلف در جهت خارج از صفحه تحت زلزله‌ی طیس.

جدول ۸. شدت بار لرزه‌ی داخل صفحه برای مدل‌های تحلیلی.

شماره‌ی مدل	شدت بار لرزه‌ی داخل صفحه (g)	شماره‌ی مدل	شدت بار لرزه‌ی داخل صفحه (g)
۱	۰	۴	۰/۹
۲	۰/۲	۵	۱/۴
۳	۰/۵		

کند. [۱۷] همچنین آنجل و آبرامز عنوان کردند که میان قاب‌هایی با لاغری ۱۰ و پائین‌تر می‌توانند زلزله‌ی به شدت ۲ g را در جهت خارج از صفحه‌ی خود تحمل کنند. [۱۸] پژوهشگران دیگری نیز اظهارنظرهای مشابهی در این زمینه داشته‌اند. [۱۹، ۲۰] لذا در این شتاب‌ها میان قاب در جهت خارج از صفحه دچار آسیب زیادی نمی‌شود، در نتیجه ظرفیت و سختی داخل صفحه در اثر آسیب‌دیدگی خارج از صفحه در این شتاب‌ها دچار تغییر زیادی نمی‌شود. نتایج این بخش، نتایج بند ۱۰.۴ را که در آن ظرفیت داخل صفحه‌ی میان قاب‌هایی که در سطوح کم یا متوسط بارگذاری خارج از صفحه قرار داشته‌اند، دچار تغییر قابل ملاحظه‌ی نمی‌شد، را مورد تأیید قرار می‌دهد.

۲.۵. پیش بارگذاری داخل صفحه

مطابق جدول ۸، در این حالت میان قاب در سطوح مختلف شدت بار لرزه‌ی در جهت داخل صفحه تحلیل می‌شود. سپس میان قاب آسیب‌دیده در جهت خارج از صفحه برای بررسی اثر آسیب داخل صفحه بر روی ظرفیت خارج از

واقع میان قاب در واقع، بین این دو منحنی قرار دارد. در حالت واقعی این دو نیرو هم‌زمان به مقدار بیشینه‌ی خود نمی‌رسند و نسبت این دو نیرو در زمان‌های مختلف و رکورد‌های زمین لرزه‌ی مختلف یکسان نیست، لذا بارگذاری هم‌زمان داخل و خارج صفحه در حالت استاتیکی که منعکس‌کننده‌ی الگوی بارگذاری واقعی باشد، ممکن نیست و تاکنون در هیچ مرجعی به آن اشاره نشده است. لذا در این پژوهش، اثر هم‌زمان نیروهای داخل و خارج از صفحه در بخش آنالیزهای دینامیکی پیگیری شده است.

با توجه به مباحث مطرح‌شده در بند قبل و این بند به عنوان نتیجه‌گیری کلی از تحلیل‌های استاتیکی می‌توان گفت اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه بر میان قابی که در سطوح کم یا متوسط در جهت خارج از صفحه بارگذاری شده است، در ظرفیت داخل صفحه‌ی میان قاب اثر ناچیزی دارد؛ اما این اندرکنش در ظرفیت خارج از صفحه مؤثر است.

۵. تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی افزاینده (IDA)

سه رکورد طیس ۲، نورث ریچ ۴ و کیپ مندوسینو ۵ برای انجام تحلیل‌های دینامیکی در این بخش مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این بند، همانند بند ۴، برای بررسی اثرات پیش‌آسیب‌دیدگی بر روی ظرفیت داخل و خارج از صفحه در حالت بارگذاری لرزه‌ی دو حالت حدی مورد بررسی قرار گرفته است:

-- میان قاب در جهت خارج از صفحه در سطوح مختلف آسیب‌دیده است.

-- میان قاب در جهت داخل صفحه در سطوح مختلف آسیب‌دیده است.

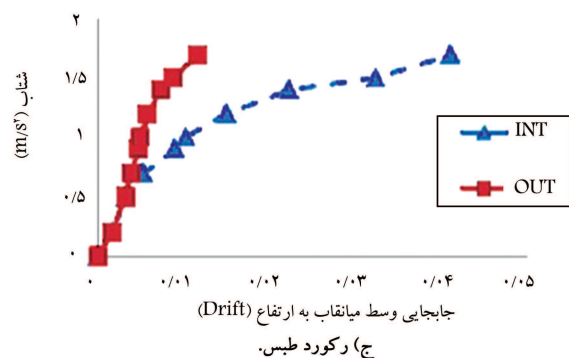
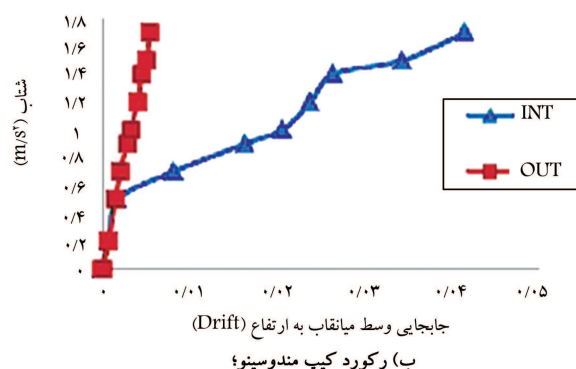
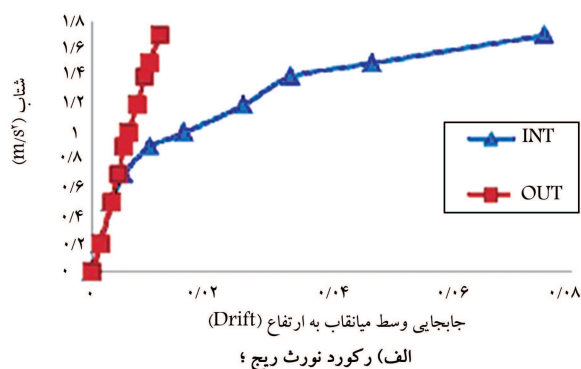
در حالت اول، ابتدا میان قاب در جهت خارج از صفحه در سطوح مختلف تحت رکورد‌های مختلف آسیب‌دیده می‌شود، سپس مدل‌های آسیب‌دیده برای بررسی اثرات آسیب‌دیدگی خارج از صفحه بر ظرفیت داخل صفحه در جهت داخل صفحه‌ی تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌شوند و در حالت دوم نیز ابتدا میان قاب در جهت داخل صفحه در سطوح مختلف تحت رکورد‌های مختلف آسیب‌دیده می‌شود، سپس مدل‌های آسیب‌دیده برای بررسی اثرات آسیب‌دیدگی داخل صفحه بر ظرفیت خارج از صفحه در جهت خارج از صفحه، تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌شوند.

۱.۵. پیش‌آسیب‌دیدگی خارج از صفحه

در این حالت میان قاب مطابق جدول ۷، در سطوح مختلف شدت بار لرزه‌ی در جهت خارج از صفحه تحلیل شده است.

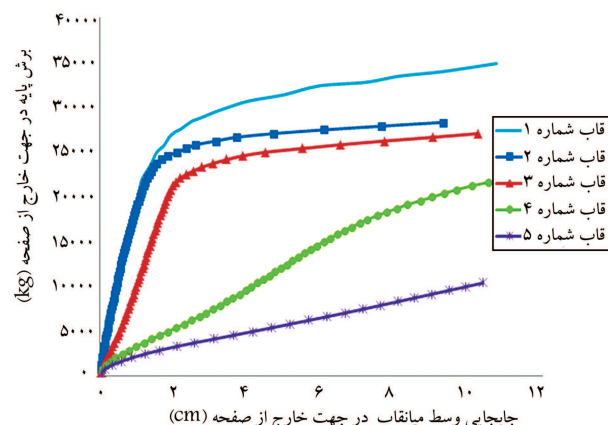
سپس میان قاب آسیب‌دیده در جهت داخل صفحه برای بررسی اثر آسیب خارج از صفحه بر روی ظرفیت داخل صفحه مورد تحلیل استاتیکی غیرخطی بارافزون قرار گرفته است (شکل ۱۸).

از نتایج حاصل در نمودار شکل ۱۸ مشاهده می‌شود که تغییر سختی فقط در شتاب‌های بسیار بالا اتفاق می‌افتد. دلیل این امر نیز ناشی از این مسئله است که در شتاب‌های کوچک، تغییر مکان میان قاب در جهت خارج از صفحه بسیار کوچک است، درواقع می‌توان گفت میان قابی که در تماس کامل با قاب پیرامونی خود است به علت کش قوسی دو طرفه در جهت خارج از صفحه‌ی خود بسیار پایدار است. در این زمینه می‌توان به نتایج پژوهش‌هایی در سال ۱۹۹۹ اشاره کرد که در آنها اظهار داشته‌اند میان قاب در جهت خارج از صفحه‌ی خود می‌تواند بدون هیچ آسیب‌دیدگی قابل ملاحظه‌ی زلزله‌ی به شدت ۱/۳ g الی ۱/۷ g را تحمل



شکل ۲۰. مقایسه‌ی منحنی IDA در حالت اندرکنشی (INT) با منحنی در جهت خارج از صفحه‌ی (OUT).

می‌یابد که این نکته تأکیدی است بر این موضوع که پیش آسیب‌دیدگی داخل صفحه باعث کاهش سختی خارج از صفحه‌ی میان‌قاب می‌شود. با توجه به شکل ۲۰ مشاهده می‌شود در حالتی که رکوردها در جهت خارج از صفحه به میان‌قاب اعمال می‌شوند (OUT)، میان‌قاب پایداری نسبتاً زیادی از خود نشان می‌دهد. درواقع، نتایج این بخش نتایج پژوهش‌های انجام‌شده‌ی پیشین را مورد تأیید قرار می‌دهند.^[۱۸، ۱۷، ۱۹] اما در زمانی که رکوردها هم‌زمان به سازه اعمال می‌شوند، در اثر جابجایی داخل صفحه، گوشه‌های کششی از قاب جدا می‌شوند و المان‌های اتصال در گوشه‌های کششی دچار آسیب می‌شوند، این آسیب‌دیدگی باعث اختلال در تشکیل کنش قوسی می‌شود؛ لذا سختی و مقاومت خارج از صفحه در این حالت دچار افت شدیدی می‌شود. در نتیجه می‌توان مهم‌ترین دلیل خرابی خارج از صفحه‌ی میان‌قاب را آسیب داخل صفحه دانست، که در بخش ۲.۵ به آن اشاره شده است.



شکل ۱۹. منحنی نیرو - جابجایی خارج از صفحه برای قاب‌های آسیب‌دیده در سطوح مختلف در جهت داخل صفحه.

صفحه تحلیل استاتیکی غیرخطی می‌شود (شکل ۱۹). مطابق شکل ۱۹، آسیب داخل صفحه تأثیر بسیار مهمی در ظرفیت خارج از صفحه دارد، و همچنین باعث کاهش شدید مقاومت و سختی خارج از صفحه می‌شود؛ و این نکته‌ی است که باعث می‌شود تئوری‌های موجود در زمینه‌ی رفتار خارج از صفحه‌ی میان‌قاب، مقاومت و سختی خارج از صفحه را بیشتر از حالت واقعی تخمین بزنند.

با مقایسه‌ی نتایج این بخش با بخش ۲.۴، که تحلیل‌ها به صورت استاتیکی است، مشاهده می‌شود که تغییرات مقاومت و سختی خارج از صفحه بسیار شدیدتر است. درواقع، به علت طبیعت رفت و برگشتی رکوردها، برخلاف حالت استاتیکی، که فقط ۲ گوشه‌ی میان‌قاب در کنج کششی از قاب جدا می‌شوند، در حالت‌های واقعی هر ۴ گوشه‌ی میان‌قاب به تناوب در کنج‌های کششی واقع و از قاب جدا می‌شوند، در نتیجه اتصال قاب به میان‌قاب بسیار ضعیف می‌شود و به تبع آن کنش قوسی، سختی و مقاومت خارج از صفحه شدیداً کاهش می‌یابند. در نتیجه می‌توان گفت در حالت‌های واقعی هنگام رخداد یک زلزله با توجه به پایداری نسبتاً خوب میان‌قاب بدون آسیب در جهت خارج از صفحه، که در بخش‌های بعدی به آن اشاره شده است، دلیل اصلی خرابی خارج از صفحه‌ی میان‌قاب آسیب داخل صفحه است.

۳.۵. بارگذاری هم‌زمان داخل و خارج از صفحه

در بندهای ۱.۵ و ۲.۵ درواقع اندرکنش نیروی داخل و خارج از صفحه‌ی میان‌قاب به طور غیر هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته و در این قسمت با اعمال هم‌زمان مؤلفه‌های داخل و خارج از صفحه برای سه رکورد انتخابی، اثرات این هم‌زمانی مورد بررسی قرار گرفته است.

۱.۳.۵. بررسی اثرات هم‌زمانی نیروهای داخل و خارج از صفحه بر رفتار خارج از صفحه‌ی میان‌قاب

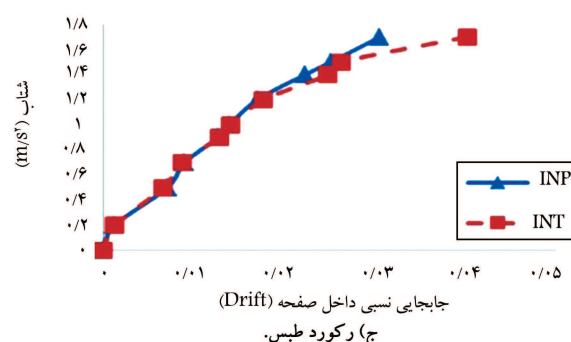
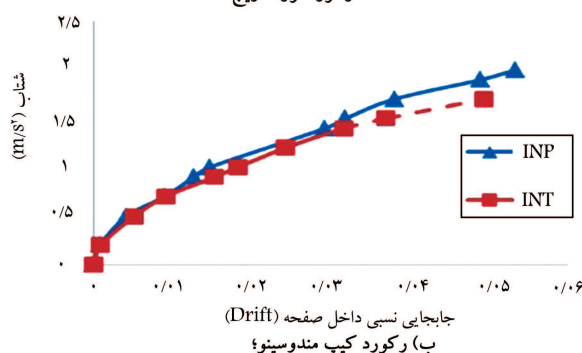
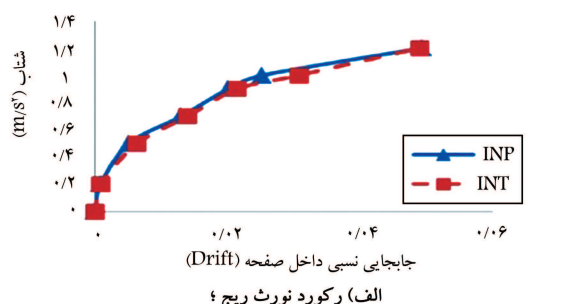
منحنی IDA خارج از صفحه‌ی میان‌قاب برای هر ۳ رکورد در شکل ۲۰ نشان داده شده است.

با مقایسه‌ی منحنی IDA خارج از صفحه‌ی میان‌قاب (OUT) با منحنی IDA خارج از صفحه در حالت اندرکنشی (INT) (حالتی که مؤلفه‌ی عمود بر میان‌قاب و مؤلفه‌ی موازی میان‌قاب هم‌زمان اعمال می‌شوند) مشاهده می‌شود که در شتاب‌های یکسان جابجایی وسط میان‌قاب به طور قابل ملاحظه‌ی افزایش

۲.۳.۵. بررسی اثرات هم‌زمانی نیروهای داخل و خارج از صفحه در رفتار داخل صفحه‌ی میان‌قاب

مقایسه‌ی منحنی IDA داخل صفحه (INP) با منحنی IDA داخل صفحه در حالت اندرکنشی (INT) برای هر ۳ رکورد انتخابی در شکل ۲۱ نشان داده شده است، که مطابق آن برای شتاب‌های یکسان، جابجایی داخل صفحه در هر دو حالت اختلاف بسیار کمی دارد، که مؤید اثر اندک اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه در ظرفیت داخل صفحه است. نتایج این تحلیل‌ها نتایج به دست آمده در بخش ۱.۵ را مورد تأیید مجدد قرار می‌دهند. درواقع می‌توان گفت به علت وزن کم میان‌قاب نسبت به وزن کل سازه در هنگام زلزله، نیروی اندکی به میان‌قاب در جهت خارج از صفحه اعمال می‌شود؛ در نتیجه جابجایی نسبی و آسیب‌دیدگی میان‌قاب در جهت خارج از صفحه اندک است. [۱۷، ۱۸]

در تحلیل‌های استاتیکی مطابق شکل ۱۴ فقط در جابجایی‌های بالا، که میان‌قاب وارد مرحله‌ی غیرخطی شده است، اثر اندرکنشی قابل ملاحظه است؛ اما در تحلیل‌های دینامیکی افزایش یافته مشاهده می‌شود که جابجایی میان‌قاب در جهت خارج از صفحه به میزانی نیست که میان‌قاب در جهت خارج از صفحه وارد مرحله‌ی غیرخطی شود، لذا اثر اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه در ظرفیت داخل صفحه ناچیز



شکل ۲۱. مقایسه‌ی منحنی IDA داخل صفحه در حالت اندرکنشی (INT) با منحنی IDA در جهت داخل صفحه (INP).

است. در نتیجه مدل‌هایی نظیر مدل دستک فشاری FEMA ۳۵۶ از این جهت که اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه را در نظر نمی‌گیرد، دچار خطا نیست. همان‌طور که ذکر شد، بیشتر کارهای پژوهشگران در این زمینه، در مورد اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه در حالت استاتیکی بوده است؛ که بعضاً با الگوهای متفاوت بارگذاری شده‌اند. از آنجایی که در تحلیل‌های استاتیکی علی‌الخصوص در زمینه‌ی بارگذاری خارج از صفحه، الگوی بارگذاری به میان‌قاب تحمیل می‌شود که ممکن است در حالات واقعی میان‌قاب این نوع بارگذاری را تجربه نکند، صرف انجام تحلیل‌های استاتیکی نمی‌تواند قضاوت صحیحی از رفتار واقعی میان‌قاب را نشان دهد. لذا در این پژوهش علاوه بر تحلیل‌های استاتیکی، تحلیل‌های دینامیکی نیز انجام شده است و نتایج این تحلیل‌ها در مقایسه با نتایج تحلیل‌های استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش تحلیل‌های استاتیکی نشان داده شد که برای میان‌قابی که در سطوح کم یا متوسط بارگذاری خارج از صفحه قرار دارد و یا به عبارت دیگر، تا زمانی که رفتار میان‌قاب در جهت خارج از صفحه در مرحله‌ی خطی است، بارگذاری خارج از صفحه میان‌قاب تأثیری در ظرفیت داخل صفحه ندارد. با انجام تحلیل‌های دینامیکی مشخص شد که به علت کنش قوسی، میان‌قاب در جهت خارج از صفحه پایداری نسبتاً مناسبی دارد و تحت اثر رکوردهای زلزله جابجایی اندکی دارد؛ لذا میان‌قاب در جهت خارج از صفحه رفتار خطی دارد و در نتیجه، اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه ناچیز است. نتایج تحلیل‌های دینامیکی و استاتیکی کاملاً منطبق بر هم و مؤید اثر اندک اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه بر روی ظرفیت داخل صفحه است. باید خاطر نشان شود که میان‌قاب‌های مورد مطالعه در این پژوهش در تماس کامل با قاب پیرامونی خود بوده‌اند، اما همان‌طور که می‌دانیم در بیشتر کارهای عملی، اتصال کامل میان‌قاب به قاب علی‌الخصوص در قسمت بالایی برقرار نمی‌شود؛ لذا مطالعه‌ی اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه در میان‌قاب‌هایی که در تماس کامل با قاب پیرامونی خود نیستند، می‌تواند موضوع مطالعات آتی باشد.

۶. نتیجه‌گیری

در این نوشتار، مطالعاتی برای بررسی اثرات هم‌زمانی نیروهای داخل و خارج از صفحه بر رفتار میان‌قاب بنایی غیرمسلح در قاب‌های بتن مسلح انجام شده است. تحلیل‌های صورت گرفته در دو حالت استاتیکی و دینامیکی برای بررسی اثرات هم‌زمانی نیروهای داخل و خارج از صفحه بر رفتار داخل صفحه و تحلیل‌های جداگانه‌ی نیز برای بررسی اثرات هم‌زمانی بر ظرفیت خارج از صفحه انجام شده است.

نتایج مطالعات نشان دادند که اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه اثرات ناچیزی بر مقاومت و سختی داخل صفحه‌ی میان‌قاب دارد. از این رومدل‌هایی نظیر مدل قید قطری FEMA ۳۵۶ از این نظر که اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه در میان‌قاب‌های آجری غیرمسلح را در نظر نمی‌گیرد، در تخمین مقاومت و سختی داخل صفحه خطا ندارد. اما درخصوص اثرات اندرکنش نیروهای داخل و خارج از صفحه بر ظرفیت خارج از صفحه‌ی میان‌قاب نتایج نشان داده است که اندرکنش نیروهای داخل و خارج باعث کاهش شدید مقاومت و سختی خارج از صفحه‌ی میان‌قاب می‌شود، که علت اصلی آن آسیب داخل صفحه است.

تئوری‌های موجود در زمینه‌ی مقاومت خارج از صفحه‌ی میان‌قاب به علت نادیده گرفتن اثرات آسیب‌دیدگی داخل صفحه، مقاومت و سختی خارج از صفحه را بیشتر از حالت واقعی تخمین می‌زنند.

1. side joint
2. side release
3. Tabas
4. Northridge
5. Cape Mendocino

منابع (References)

1. Polyakov, S.V., *Masonry in Framed Buildings*, Translated by G. L. Cairns in 1963, National Lending Library for Science and Technology, Boston Spa, Yorkshire. U.K. (1956).
2. Stafford Smith, B. "Lateral stiffness of infilled frames", *J. Struct. Div., ASCE*, **88**(ST6), pp. 183-199 (1962).
3. Mainstone, R.J. "On the stiffness and strengths of infilled frames", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Supplement IV, pp. 57-90 (1971).
4. Mehrabi, A.B., Shing, P.B., Schuller, M.P. and Noland, J.L. "Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames", *J. of Struct. Eng.*, **122**(3), pp. 228-237 (1996).
5. Hashemi, A. and Mosalam, K.M. "Seismic evaluation of concrete buildings including effects of masonry infill walls", Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Report (2007).
6. Stephen, K. and Mosalam, K.M. "Modeling of unreinforced masonry infill wall considering in-plane and out-of-plane interaction", Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) Report (2009).
7. Kuang, G.S. and Yuen, Y.P. "Effect of out-of-plane loading on in-plane behavior unreinforced infilled RC Frame", *Proceedings of the Conference on Computing and Civil and Building Engineering* (2010).
8. Zomorodi, A. "Effect of out-of-plane loads on the in-plane behavior of masonry infilled RC Frame", Msc thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran (2010).
9. Al-Chaar, G. "Evaluating strength and stiffness of unreinforced masonry infill structures", US Army Group of Engineering, Engineer Research and Development Center (2002).
10. Flanagan, R.D. and Bennett, R.M. "Bidirectional behavior of structural clay tile infilled Frames", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **125**(3), pp. 236-244 (1999a).
11. Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H., *Non-Linear Mechanics of Reinforced Concrete*, SPON Press (2003).
12. Okamura, H. and Maekawa, K., *Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete*, Tokyo, Japan, Gihodo-Shuppn (1991).
13. Salehi, I., Soltani Mohamadi, M. and Tasnimi, A. "Non-linear behavior of brick-mortar interface element in shear", *Modares Technical and Engineering Journal*, **36**, pp. 79-98 (2009) (in Persian).
14. Ganz, H.R. and Thurlimann, B. "Tests on masonry walls under normal and shear loading", Rep. No. 7502-4, Inst. Of Struct. Engrg., ETH Zurich, Zurich, Switzerland (1984) (in German).
15. Dawe, J.L. and Seah, C.K. "Out-of-plane resistance of concrete masonry infilled panels", *Can. J. Civ. Eng.*, **16**(6), pp. 854-864 (1989).
16. FEMA 356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Washington (DC), Federal Emergency Management Agency (2000).
17. Fardis, M.N., Bousias, S.N., Franchioni, G. and Panagiotakos, T.B. "Seismic response and design of RC structures with plan-eccentric masonry infills", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **28**(2), pp. 173-191 (1999).
18. Angel, F., Abrams, D., Shapiro, D., Uzarski, J., Webster, M., "Behavior of reinforced concrete frame with masonry infills," Structural Research Servies (1994). No.589, University of Illinois at Urbana
19. Yi-Hsuan, T., Tsung-Hua, C., Pai-Mei, L. and Yuan-Sen, Y. "Out-of-plane shaking table tests on unreinforced masonry panels in RC frames", *J. of Engineering Structures*, **32**(12), pp. 3925-3935 (2010).