مجله علمی – پژوهشی
مهندسی عمران مدرس
دوره بیست دوم، شماره ۱، سال۱۴۰۰۱

بررسی تحلیلی اثر پارامترهای مختلف بر عملکرد لرزه‌ای میان‌قاب‌های مصالح بنایی دارای بازشو در قاب‌های بتن مسلح با جزئیات لرزه‌ای و غیرلرزه‌ای

دلارام استاد[۱]، جلیل شفائی[۲*]

۱- دانشجوی دکتری عمران-سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
۲- استادیار عمران-سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود.

js.shafaei@gmail.com

تاریخ دریافت ۹۹/۱۲/۰۹ تاریخ پذیرش ۱۴۰۰/۰۸/۰۷

چکیده

قاب‌های دارای میان‌قاب مصالح بنایی رایج‌ترین نوع سازه‌ای است که برای ساخت سازه‌های چند طبقه در کشورهای در حال توسعه استفاده می‌شود. میان‌قاب‌های مصالح بنایی بیشتر برای افزایش سختی و استحکام اولیه ساختمان‌های بتن مسلح مورد استفاده قرار می‌گیرد. از طرفی قرار گرفتن بازشوهای درب و پنجره در میان‌قاب مصالح بنایی سازها اجتناب ناپذیر خواهد بود. در مطالعه حاضر، با مدل‌سازی عددی به روش اجزای محدود غیر خطی اثر وجود میان‌قاب‌های مصالح بنایی دارای بازشوهای مختلف درب و پنجره بر رفتار داخل صفحه قاب‌های بتنی با جزئیات لرزه‌ای و غیر لرزه‌ای در سطوح مختلف بار محوری و ضخامت‌های مختلف میان‌قاب، در عملکرد لرزه‌ای قاب‌های بتن مسلح مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور ابتدا مدل‌های پیشنهادی با استفاده از نتایج آزمایشگاهی در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS اعتبار سنجی شد. نتایج حاصل از تحلیل‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که افزایش بار محوری باعث افزایش مقاومت نهایی، سختی مؤثر و کاهش شکل‌پذیری در نمونه‌های دارای میان‌قاب مصالح بنایی با بازشو مختلف درب و پنجره و قاب بتن مسلح با مشخصات لرزه‌ای می‌شود. افزایش ضخامت میان‌قاب بنایی باعث افزایش مقاومت نهایی و سختی مؤثر در نمونه‌ها با جزئیات لرزه‌ای و غیر لرزه‌ای شد. نتایج این بررسی‌ها نشان می‌دهد که حالت‌های مختلف قرارگیری بازشوها در چگونگی رفتار قاب‌ها آثار قابل توجهی دارد.

واژگان کلیدی: میان‌قاب مصالح بنایی، بازشو، بارگذاری یک‌طرفه، عملکرد لرزه‌ای، تحلیل اجزای محدود.

۱- مقدمه

قاب‌های بتن مسلح که توسط دیوارهای مصالح بنایی (آجری) پر می‌شوند، را مراجع فنی به عنوان قاب‌های میان‌پر[1] معرفی می‌کنند. میان‌قاب‌های مصالح بنایی عضو غیر قابل اجتناب در هر ساختمان محسوب می‌شوند [1]. میان‌قاب مصالح بنایی در ساختمان‌ها به عنوان اعضای غیرسازه‌ای محسوب می‌شوند که وزن قابل توجهی دارند و سختی و مقاومت سازه را افزایش می‌دهند و از شکل‌پذیری[2] قاب می‌کاهند. بسیاری از میان‌قاب‌ها در ساختمان‌ها با توجه به شرایط معماری دارای بازشو درب یا پنجره می‌باشند، وجود بازشو در میان‌قاب‌های مصالح بنایی می‌تواند باعث تغییر رفتار آن تحت بار جانبی و کاهش سختی و مقاومت، نسبت به قاب میان‌پر شود [2]. در آزمایش‌های انجام شده توسط مسلم[3] و همکاران در سال ۱۹۹۷ روی نمونه قاب فولادی دارای میان‌قاب مصالح بنایی، وجود بازشو منجر به بروز رفتار شکل‌پذیری در نمونه‌ها شد [3]. آستریس و همکاران در سال ۲۰۰۳ با استفاده از روش اجزای محدود تأثیر موقعیت و تعداد بازشوها در کاهش سختی قاب‌های میان پر را بررسی کردند [4]. کاکالتیس و کاراینیس[4] در سال ۲۰۰۷ بیان کردند موقعیت بازشو باید تا حد امکان نزدیک به لبه میان‌قاب باشد، تا ارتقای بیشتری در عملکرد قاب دارای میان‌قاب به وجود آید [5]. کاکالتیس و کارایانیس در سال ۲۰۰۸ در ادامه مطالعاتی به منظور بررسی تأثیر شکل بازشو و مقاومت مصالح میان‌قاب انجام دادند [6]. نتایج آزمایش‌های کاکالتیس و کارایانیس در سال ۲۰۰۹ [7]، بلکارد[5] و همکاران در سال ۲۰۰۹ [8]، استادوریس[6] در سال ۲۰۰۹ [9]، تسنیمی و محب خواه[7] در سال ۲۰۱۱ [10]، ژای[8] و همکاران در سال ۲۰۱۶ [11]، اونور اوزتوگلو[9] و همکارانش در سال ۲۰۱۷ [2]، آیدا آیو مید بودیواتی[10] و همکارانش در سال ۲۰۱۸ [12]، طبق مطالعاتشان بیان کردند که قاب میان‌پر از نظر مقاومت و سختی تأثیر بیشتری دارد و رفتار تردتری نسبت به نمونه‌های دارای بازشو از خود نشان می‌دهد و بزرگ شدن ابعاد بازشو تا حدودی باعث افزایش شکل‌پذیری می‌شود.

هدف از این مقاله بررسی عملکرد لرزه‌ای میان‌قاب مصالح بنایی دارای بازشو درب و پنجره با ابعاد مختلف با جزئیات لرزه‌ای[11] و غیرلرزه‌ای[12] با بررسی تأثیر همزمان سطوح مختلف بارهای محوری[13] و افزایش ضخامت میان‌قاب‌های مصالح بنایی است، که در این تحقیق ٤٨ نمونه با جزئیات لرزه‌ای و غیر لرزه‌ای تحت سطوح مختلف بارهای محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ برابر ظرفیت نهایی فشاری ستون‌ها و ضخامت ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر میان‌قاب مصالح بنایی با بازشوهای درب و پنجره با ابعاد و موقعیت قرارگیری مختلف، مدل‌سازی و تحلیل شده است.

۲-معرفی مدل‌های آزمایشگاهی اولیه برای درستی‌آزمایی مدل‌های تحلیلی

برای این مقاله از مدل آزمایشگاهی که توسط منصوری و همکاران [13] ساخته شده بود، برای درستی‌آزمایی استفاده شده است. کار آزمایشگاهی منصوری و همکاران یک قاب بتنی یک دهانه-یک طبقه و یک قاب میان‌پر، یک قاب بتن مسلح با میان‌قاب دارای بازشو درب غیر مرکزی و سه تا قاب دارای میان‌قاب با بازشو پنجره با ابعاد و موقعیت مکانی متفاوت با مقیاس ۱:۲ تحت بار جانبی داخل صفحه قرار گرفته است. شکل (۱) مشخصات ابعادی نمونه قاب دارای میان‌قاب مصالح بنایی با بازشو درب و پنجره و شکل (۲) جزئیات اجرایی قاب بتن مسلح غیر لرزه‌ای را نشان می‌دهد. جدول (۱) به معرفی کلی نمونه‌های آزمایشگاهی پرداخته و همچنین در جدول (۲) میانگین مشخصات مصالح مورد استفاده آورده شده است، ابعاد آجر ۳۱×٤۹×۱۰٦ به ترتیب (ضخامت×ارتفاع×طول) برحسب میلی‌متر است [13].

1. Infill-Frame
2. Ductility
3. Muslam
4. Kakaletsis & Karayannis
5. Belkard
6. Estadoris
7. Tasnimi & Mohebkhah
8. Zhai
9. Onur Oztukoglu
10. Ada Ayu Made Budiwati
11. Seismic
12. Non-Seismic
13. Lateral Load

شکل ۱. مشخصات ابعادی نمونه‌های آزمایشگاهی (mm) [13].

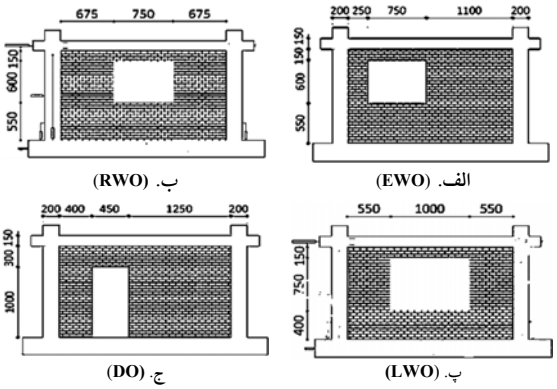


Fig. 1. Dimensional specification of test specimens (mm) [13].

شکل ۲. جزئیات اجرایی قاب بتن مسلح (میلی‌متر) [13].

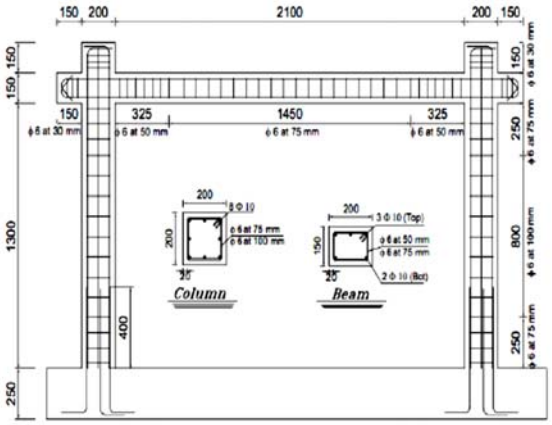


Fig. 2. Executing details of reinforced concrete frame (mm) [13].

جدول ۱. معرفی کلی نمونه‌های آزمایشگاهی [13].

Specimen	configuration	Opening length (mm)	Opening height (mm)	Opening location (x/l)
FRAME	bare frame	---	---	---
SOLID	solid infilled frame	---	---	---
EWO	Infilled frame with eccentric window opening	750	600	0.2
RWO	Infilled frame with regular window opening	750	600	0
LWO	Infilled frame with large window opening	1000	750	0
DO	Infilled frame with door opening	450	1000	0.2

Table 1. General introduction test specimens [13].

جدول ۲. میانگین مشخصات مصالح آزمایشگاهی [13].

Material	Property	Value (MPa)
Frame concrete	Compressive strength	21.9
Brick unit	Compressive strength	9.16
Mortar	Compressive strength	8.33
Reinforcement of longitudinal steel	Yield strength	438.3
	Ultimate strength	645
Reinforcement of transverse steel	Yield strength	396.3
	Ultimate strength	509.3

Table 2 Average specification of experimental materials [13].

۳- معرفی نمونه‌های تحلیلی با بارگذاری داخل صفحه

در این مقاله چهار نوع میان‌قاب مصالح بنایی دارای بازشوهای مختلف درب و پنجره مدل‌سازی شد. قاب‌های بتن مسلح با جزئیات غیر لرزه‌ای مطابق با آرماتوربندی شکل (۲) و قاب بتن مسلح با مشخصات لرزه‌ای ویژه بر اساس ضوابط لرزه‌ای مبحث نهم مقررات ملی ساختمان طراحی و مدل‌سازی شدند [14]، در این پژوهش سطوح مختلف بار محوری ($0.1*A_g*f'_c$)، ($0.2*A_g*f'_c$) و ($0.3*A_g*f'_c$) به ترتیب به عنوان بار محوری کم، متوسط و زیاد و دو نوع ضخامت میان‌قاب ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متر است، ضخامت میان‌قاب با مقیاس ۱:۲ مدل شده است.

۳-۱- معرفی قاب بتن مسلح با میان‌قاب دارای بازشو پنجره و درب

سه نمونه اول تحت سطوح مختلف بار محوری ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ ظرفیت فشاری ستون‌ها و ضخامت میان‌قاب مصالح بنایی ۱۰۰ میلی‌متر و قاب بتنی غیر لرزه‌ای است. سه نمونه دوم تحت سطوح مختلف بار محوری ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ ظرفیت فشاری ستون‌ها و ضخامت میان‌قاب مصالح بنایی ۱۰۰ میلی‌متر و قاب بتنی لرزه‌ای است. سه نمونه سوم و سه نمونه چهارم نیز به همین صورت با این تفاوت که ضخامت میان‌قاب مصالح‌بنایی ۵۰ میلیمتر است و ۴۸ نمونه موجود است. جدول (۳) چگونگی نامگذاری نمونه‌های تحلیلی و جدول (٤) نام نمونه‌ها ارائه شده است. شکل (۳) چگونگی آجر چینی نمونه‌ها نشان داده شده است.

جدول ۳. نامگذاری نمونه‌های تحلیلی.

Characteristic Sign	Explanation
NS	RC frame with non-seismic details
S	RC frame with seismic details
T	Thickness infill masonry 0 , 50 mm and 100 mm
P	Axial loads 0.1, 0. 2, 0.3 compressive capacity of the columns
EWO/ RWO/ LWO/ DO	Refer To Table 1

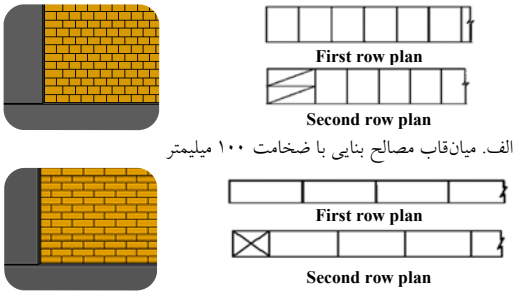
Table 3. Naming of analytical specimens.

جدول ٤. مشخصات نمونه تحلیلی قاب بتن مسلح با میان‌قاب مصالح بنایی دارای بازشو.

Name of non-seismic analytical specimens	Thickness (mm)	Axial load (N/mm²)
NS-T100-P0.1- EWO/ RWO/ LWO/ DO	100	2.19
NS-T100-P0.2- EWO/ RWO/ LWO/ DO	100	4.38
NS-T100-P0.3- EWO/ RWO/ LWO/ DO	100	6.57
NS-T50-P0.1- EWO/ RWO/ LWO/ DO	50	2.19
NS-T50-P0.2- EWO/ RWO/ LWO/ DO	50	4.38
NS-T50-P0.3-EWO/ RWO/ LWO/ DO	50	6.57
Name of seismic analytical specimens	**Thickness (mm)**	**Axial load (N/mm²)**
NS-T100-P0.1- EWO/ RWO/ LWO/ DO	100	2.19
NS-T100-P0.2- EWO/ RWO/ LWO/ DO	100	4.38
NS-T100-P0.3- EWO/ RWO/ LWO/ DO	100	6.57
S-T50-P0.1- EWO/ RWO/ LWO/ DO	50	2.19
S-T50-P0.2- EWO/ RWO/ LWO/ DO	50	4.38
S-T50-P0.3- EWO/ RWO/ LWO/ DO	50	6.57

Table 4. Specifications of infill-frame masonry with opening of analytical specimen.

شکل ۳. شمای آجر چینی میان‌قاب مصالح بنایی.



الف. میان‌قاب مصالح بنایی با ضخامت ۱۰۰ میلیمتر

ب. میان‌قاب مصالح بنایی با ضخامت ۵۰ میلیمتر

Fig. 3. Brick pattern of infill-frame masonry.
a. Infill with 100mm thickness b. Infill with 50mm thickness

٤- مدل‌سازی میان‌قاب‌های مصالح بنایی در نرم افزار اجزای محدود آباکوس

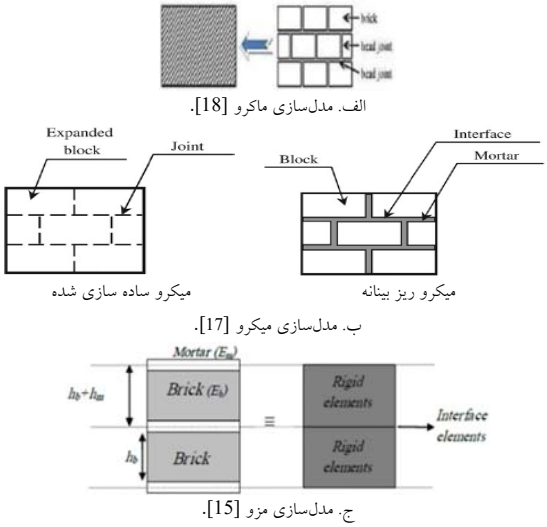
نرم‌افزاری که از آن برای مدل‌سازی ودرستی‌آزمایی نمونه‌های آزمایشگاهی استفاده شده، نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود ABAQUS است. در این مقاله از المان SOLID C3D8R برای مدل‌سازی قاب بتنی و آجر بنایی و از المان TRUSS T3D2 برای مدل‌سازی خاموت تیر و ستون و میلگردهای طولی و عرضی استفاده شده است، که مشابه کارهای تحقیقاتی گذشته، توسط پژوهشگران مختلف انتخاب شده است [15, 16].

٤-١- روش‌های مدل‌سازی ساختار مصالح بنایی

برای مدل‌سازی ساختار مصالح بنایی سه رویکرد وجود دارد: ١- رویکرد همگن ماکرو[14](درشت بینانه) [17]. ٢- رویکرد غیرهمگن میکرو[15](ریز بینانه) [18]. ٣- رویکرد مزو[16](بین مقیاس ماکرو و میکرو است) [15].

یکی از مزیت‌های روش مدل‌سازی ماکرو ساده‌سازی و حجم محاسبات کمتر در مقایسه با مدل‌سازی میکرو است، و از طرفی از معایب روش مدل‌سازی ماکرو این است که پژوهشگر توانایی تغییر پارامترهای مدل‌سازی، کلیه شرایط دخیل در نتایج تحلیل را در مقایسه با روش میکرو ندارد. در مدل‌سازی میکرو لازم است تا تمام مشخصات مکانیکی مصالح و مشخصات سطوح تماس بر اساس نتایج آزمایشگاهی کالیبره و درستی‌آزمایی شود، که این مورد در عمل هنگام تحقیقات آزمایشگاهی اتفاق نمی‌افتد بنابراین با توجه به مزایا و معایب هرکدام از روش‌های میکرو و ماکرو، برای مدل‌سازی واقع بینانه و دقیق میان‌قاب‌های مصالح بنایی و همچنین در نظر گرفتن پارامترهای مختلف در مدل‌سازی از مقیاس مزو استفاده شده است، (شکل ٤).

شکل ٤. روش‌های مدل‌سازی میان‌قاب مصالح بنایی.



الف. مدل‌سازی ماکرو [18].

میکرو ساده سازی شده

میکرو ریز بینانه

ب. مدل‌سازی میکرو [17].

ج. مدل‌سازی مزو [15].

Fig. 4. Modeling methods of masonry wall.
a. Macro modeling b. Micro modeling c. Meso modeling

٤-٢- روش‌های تحلیل مدل عددی مصالح بنایی

دو نوع تحلیل در نرم‌افزار ABAQUS برای میان‌قاب‌های مصالح بنایی وجود دارد: ١- تحلیل صریح[17]- تحلیل غیرصریح[18].

14. Macro Modeling
15. Micro Modeling
16. Meso Modeling
17. Dynamic Explicit
18. Dynamic Implicit

٤-۳- حالت شکست داخل صفحه قاب میان‌پر مصالح بنایی

شکست گوشه‌ها[19] بیشتر در قاب‌های میان‌پر با اعضای قوی و مصالح بنایی ضعیف رخ می‌دهد [19]. شکست لغزشی و برشی[20] بیشتر در میان‌قاب‌هایی با ملات ضعیف و قاب قوی اتفاق می‌افتد [19]. شکست قطری فشاری[21] به علت کمانش خارج از صفحه میان‌قاب که بیشتر در میان‌قاب نسبتاً لاغر اتفاق می‌افتد [19]. شکست ترک قطری[22] قاب‌های ضعیف با قاب‌هایی با اتصالات ضعیف و اعضای قوی و دارای میان‌قاب‌های نسبتاً قوی اتفاق می‌افتد و این شکست از نوع برشی است. شکست قاب[23] به صورت ایجاد مفاصل پلاستیک در ستون یا محل اتصال تیرها و ستون‌ها اتفاق می‌افتد،(شکل ۵).

شکل ۵. حالت‌های مختلف شکست قاب میان‌پر مصالح بنایی [19].

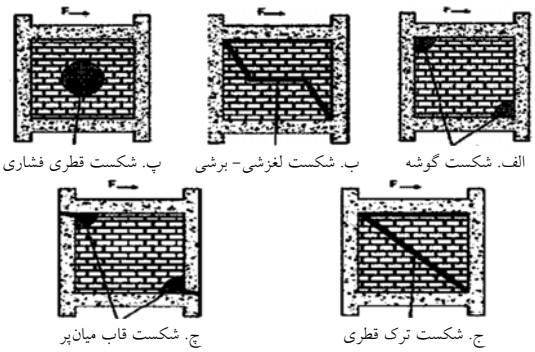


Fig. 5. Different failure modes of infill-frame masonry [19].
a. Corner crushing b. Sliding shear crushing c. Diagonal compression crushing . Diagonal cracking e. Frame failure

۵- معرفی مصالح در نرم افزار اجزای محدود آباکوس

برای تعریف مصالح بتنی و دیوار مصالح بنایی از بتن آسیب دیده پلاستیک[24] یا به عبارتی CDP استفاده شده است، مدل آسیب دیده پلاستیک قابل استفاده برای بتن و سایر مصالح ترد و شکننده تحت تأثیر بارگذاری یک‌طرفه و رفت و برگشتی؛ با توجه به نوع میان‌قاب انتخابی و شرایط بارگذاری در این مقاله گزینه مناسبی است. مدل بتن آسیب دیده پلاستیک تکنیکی است که قابلیت نشان دادن رفتار غیر خطی و ویژگی‌های بحرانی مواد شبه ترد مانند بتن را دارد، که برای هر دو تحلیل استاتیکی و دینامیکی قابل استفاده است، در این مدل فرض بر این است که ترک کششی و خردشدگی فشاری دو جبهه اصلی سازوکار گسیختگی بتن است،(شکل ٦).

شکل ٦. رفتار بتن در بارگذاری تک محوره [20].

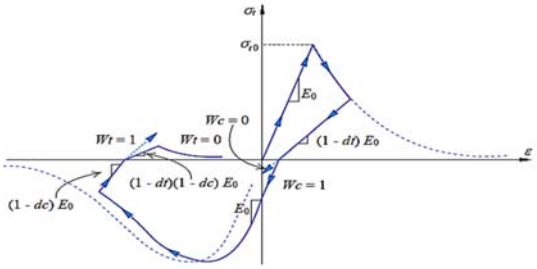


Fig. 6. Concrete behavior in uniaxial loading [20].

مشخصات اولیه مصالح بتنی و آجری ازجمله مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته، چگالی و ضریب پواسون بر اساس مقاله منصوری و همکاران انتخاب شده است [13]. به منظور درستی‌آزمایی بین نتایج تحلیلی و نتایج آزمایشگاهی برای تعریف رفتار بتن آسیب دیده پلاستیک در نرم‌افزار اجزای محدود ABAQUS پارامترهای مانند زاویه اتساع[25]، خروج از مرکزیت[26]، انرژی شکست در کشش و برش، سختی ملات در زاویه اتساع مقدار بلند شدگی در اثر تغییر شکل برشی را مشخص می‌کند [17]. خروج از مرکزیت، تابع پتانسیل جریان در ابتدا محور افقی تنش هیدرواستاتیک را با زاویهٔ ۹۰ درجه قطع می‌کند که تحت این شرایط، این تابع در واقع یک منحنی خواهد بود. σ_{b0}/σ_{c0} نسبت تنش فشاری حداکثر دو محوره به تک محوره است، مقدار این پارامتر بین ۱ تا ۱/۲۷ متغیر است [20]. پارامتر K در واقع شکل مقطع عرضی سطوح بارگذاری را تعیین می‌کند، مقدار این پارامتر بین ۰/۵ تا ۱ است. اگر مقدار این پارامتر برابر با یک در نظر گرفته شود، شکل مقطع عرضی سطح تسلیم شبیه دراکر-پراگر می‌شود [22]. پارامتر ویسکوزیته[27] در تحلیل اجزای محدود بر اساس تئوری بتن آسیب دیده پلاستیک دارای پتانسیل بسیار زیادی برای واگرایی زودرس است، که این مشخصات مکانیکی در جدول (۵) ارائه شده است. برای مدل‌سازی نمونه‌های تحلیلی در نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس از رویکرد

19. Corner Crushing Mode
20. Sliding Shear Mode
21. Diagonal Compression Mode
22. Diagonal Cracking
23. Frame Failure
24. Concrete Damage Plasticity
25. Dilation Angle
26. Eccentricity
27. Viscosity Parameter

مزو استفاده شده است. که در این رویکرد مدل‌سازی، ملات بین آجرها مدل نمی‌شود و تنها رفتار اندرکنشی[۲۸] بین آجرهای مجاور تعریف می‌شود. برای این منظور رفتار مماسی برشی آجرهای مجاور، مقدار ضریب اصطکاک ایستایی بین آجرها تعریف شد و سایر مشخصات مکانیکی المان در سطح تماس بین آجرها در جدول (٦) ارائه شده است [23] :

جدول ۵. مشخصات مکانیکی بتن آسیب دیده پلاستیک واحد بنایی نمونه‌های تحلیلی.

Reference Specimens	Material	Dilation Angle	Eccentricity	σ_{b0}/σ_{c0}	K	Viscosity Parameter
Bare Frame	Concrete	30	0.1	1.16	0.667	0.001
Infilled frame with opening and no opening	Concrete	30	0.1	1.16	0.667	0.001
	Unit Brick	10	0.1	1.16	0.67	0.001

Table 5Mechanical specification of concrete damaged plastic masonry unit analytical specimens.

جدول ٦. مشخصات مکانیکی المان رابط و ملات قاب میان‌پر مصالح بنایی.

Reference Specimens	Tension		Shear			Joint			
	G_f^{I} (Nmm/mm²)	f_t (N/mm²)	G_f^{II} (Nmm/mm²)	$C = 1.4 f_t$ (N/mm²)	$\mu = \tan\phi$	K_{nn} (N/mm³)	K_{ss} (N/mm³)	K_{tt} (N/mm³)	
SOLID	0.012	0.24	0.05	0.16	0.75	110	50	50	Hard
EWO	0.018	0.252	0.129	0.18	0.75	100	40	40	Hard
LWO	0.012	0.224	0.05	0.16	0.75	110	50	50	Hard
RWO	0.018	0.129	0.252	0.018	0.75	100	40	40	Hard
DO	0.018	0.15	0.129	0.11	0.75	200	140	140	Hard

Table.6. Mechanical specification of interface contact.

٦- کالیبره کردن و درستی‌آزمایی مدل تحلیلی

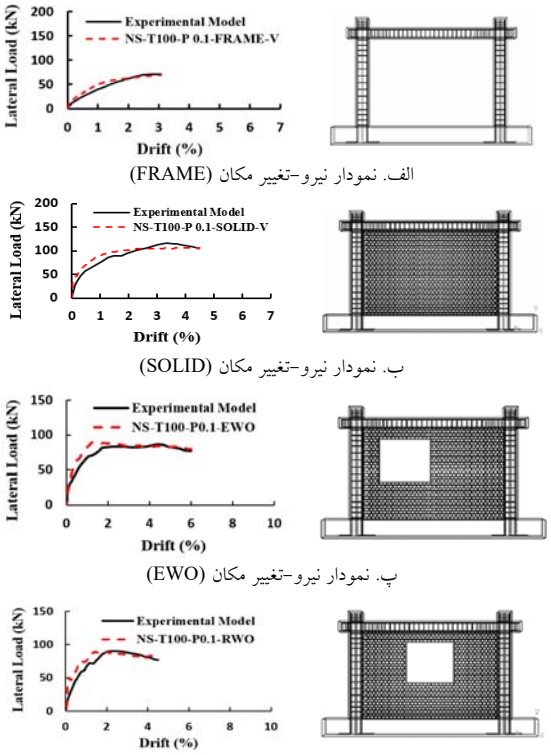
در این مقاله ابتدا درستی‌آزمایی و بررسی چگونگی رفتار قاب بتن مسلح غیرلرزه‌ای و یک قاب بتن مسلح لرزه‌ای و یک قاب بتن مسلح میان‌پر مصالح بنایی و بعد از آن میان‌قاب‌های دارای بازشو پنجره و درب، به عنوان نمونه شاهد پرداخته شده است [13]. در نمونه‌های آزمایشگاهی معیار تغییرمکان نهایی برای قاب بتن مسلح و قاب بتن مسلح میان‌پر و میان‌قاب‌های دارای بازشو بر اساس دستورالعمل ACI T1.1-01 انتخاب شده است [24]. قاب بتنی با استفاده از تحلیل استاتیکی غیر خطی و قاب میان‌پر و میان‌قاب دارای بازشو مختلف با استفاده از تحلیل دینامیکی صریح و مدل‌سازی مزو تحلیل شده و نتایج حاصل از کار عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده و دارای هماهنگی قابل قبولی به لحاظ پارامترهای رفتاری هستند. درصد اختلاف پارمترهای مقاومت نهایی، سختی موثر، شکل‌پذیری نمونه‌های تحلیلی و آزمایشگاهی در جدول (۷) و نمودار نیرو- تغییرمکان آزمایشگاهی و تحلیلی در شکل (۷) نشان داده شده است.

نمونه قاب بتن مسلح غیر لرزه‌ای (FRAME) تحت بارگذاری یکنواخت یک طرفه با بیشینه جابه‌جایی نسبی ۳٪ است. ابتدا مفصل پلاستیک در هر دو انتهای تیر و سپس در انتهای ستون‌ها ایجاد می‌شود که نشان دهنده رفتار خمشی اعضا است. نمونه قاب بتن مسلح میان‌پر (SOLID) که تحت بارگذاری یکنواخت یک طرفه با بیشینه جابه‌جایی نسبی ٤/۳٪ است، اولین ترک مرزی بین قاب و میان‌قاب در چهار گوشه دیوار در محل اتصال به قاب به وقوع پیوست؛ که نشان دهنده حاکم بودن مود لغزش در محل مرزهای ملات، بر رفتار کلی میان‌قاب بوده است. نمونه قاب دارای میان‌قاب با بازشو پنجره غیر مرکزی (EWO) تحت بارگذاری یکنواخت با جابه‌جایی نسبی ٦٪ مورد تحلیل قرار گرفته است. نخستین ترک‌خوردگی میان‌قاب به صورت ترک افقی که در محل درز ملات و در بالای بازشو تشکیل شده است. نمونه قاب دارای میان‌قاب مصالح بنایی با بازشو پنجره مرکزی (RWO) تحت بارگذاری یک طرفه و یکنواخت با جابه‌جایی نسبی ٤/۳٪ قرار گرفته است ترک‌های افقی در بالای بازشو و چندین ترک مورب در هر دو سمت بازشو دیده شد. نمونه قاب دارای میان‌قاب با بازشو و پنجره مرکزی بزرگ (LWO) تحت بارگذاری یک‌طرفه یکنواخت با جابه‌جایی نسبی ۱/۵٪ قرار گرفته و اولین ترک در انتهای پایین ستون‌ها و سرانجام منجر به تشکیل

2 . Interaction 8

مفصل پلاستیک در دو انتهای تیر و انتهای ستون شد. قاب دارای میان‌قاب مصالح بنایی با بازشوی درب غیر مرکزی (DO) تحت بارگذاری یک طرفه، یکنواخت با جابه‌جایی نسبی ۴٫/۳ مورد بررسی قرار گرفته و ترک‌های مرزی بین قاب و میان‌قاب و ترک افقی در محل درز ملات در قسمت بالای بازشو و ترک‌های مورب در سمت راست بازشو درب ایجاد شده است.

شکل ۷. درستی‌آزمایی نمونه‌های مرجع.

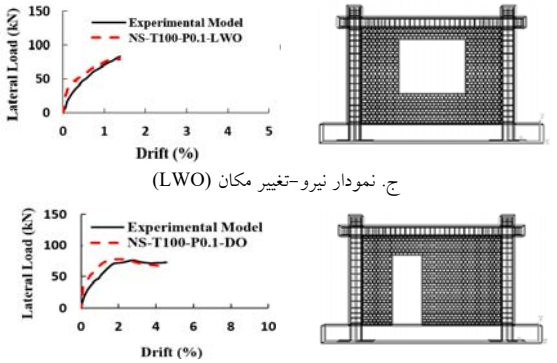


الف. نمودار نیرو–تغییر مکان (FRAME)

ب. نمودار نیرو–تغییر مکان (SOLID)

پ. نمودار نیرو–تغییر مکان (EWO)

ت. نمودار نیرو–تغییر مکان (RWO)



ج. نمودار نیرو–تغییر مکان (LWO)

چ. نمودار نیرو–تغییر مکان (DO)

Fig. 7. Verify of specimens reference.

۶-۱- درستی آزمایی نمونه قاب بتن مسلح با جزئیات لرزه‌ای

با توجه به اینکه این مقاله به دنبال بررسی اثر جزئیات لرزه‌ای و غیر لرزه‌ای در رفتار قاب‌های میان‌قابی است، برای مدل‌سازی قاب بتن مسلح با مشخصات لرزه‌ای مدل آزمایشگاهی زیگموند و همکاران در سال ۲۰۱٤ استفاده شد. درستی‌آزمایی نمونه تحلیلی با نمونه آزمایشگاهی در شکل (۸) مشاهده می‌شود.

شکل ۸. درستی‌آزمایی نمونه قاب بتن مسلح لرزه‌ای.

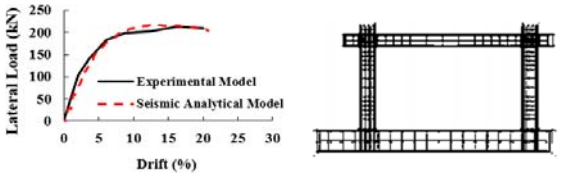


Fig. 8. Verify frame seismic specimen

جدول ۷. مقایسه نمونه شاهد آزمایشگاهی با نمونه تحلیلی.

Specimens	Kind Specimens	Lateral Load (kN)	Percentage difference	Effective Stiffness (kN/mm)	Percentage difference	Ductility	Percentage difference	Area below the chart (mm)	Percentage difference
FRAME	Experimental	70	0	2.6	21.4	1.65	16.27	1929	7.3%
	Analytical	67		3.7		2.6		2067	
SOLID	Experimental	115	7.14	7.2	6	4.16	6.97	5341.8	2.9%
	Analytical	106		9		5		5568.2	
EWO	Experimental	85	5.8	6.6	20	6.3	11.11	5899.3	3.6%
	Analytical	90		7.9		7		2662.219	
RWO	Experimental	89.7	-3	7.1	23	4.23	39	4331.453	5.3%
	Analytical	87		8.8		5.9		4561.3	
LWO	Experimental	84	-4.8	7.3	-27	2.4	-50	962.86	13.38%
	Analytical	80		5.3		1.2		1091.77	
DO	Experimental	77.2	1	4.9	32.65	4.28	12.15	3675.8	6.7%
	Analytical	78		6.5		4.8		3923.09	
Frame seismic	Experimental	194	4.1	32.34	-4.15	3.5	-8.3	3539.92	3.6%
	Analytical	202		31		3.23		3668.39	

Table 7. Comparison of experimental reference specimen and analytical specimen.

۷- بررسی تحلیلی اثر پارامترهای مختلف

با توجه نمونه‌های معرفی شده در بخش (۳) به بررسی نتایج و تأثیر پارامترهای مختلف، با استفاده از روش پریستلی و پائولی نمودارهای نیرو- تغییرمکان نمونه‌ها دو خطی شده است، که روش دوخطی بدین شرح است: مطابق با شکل (۹) ابتدا از رو نمودار تحلیلی بیشینه مقاومت را پیدا کرده پس از آن با استفاده از فرمول $0.75P_U$ عدد به دست آمده را روی نمودار نیرو- تغییرمکان مشخص کرده، پس از آن از نقطه P_U خطی به نقطه ۰/۸ حداکثر مقاومت سازه وصل شده است. نقطه P_U را جوری باید فرض شود که سطح بالا و پایین بعد از نقطه $0.75P_U$ یکسان شود. جابه‌جایی متناظر با مقاومت نهایی سازه δ_U، سختی مؤثر K_e، شکل‌پذیری μ به دست می‌آید [26]. برای محاسبه این پارامترها از رابطه (۱ و ۲) استفاده می‌شود:

$$K_e = P_U/\delta_y \quad (۱)$$

$$\mu = \delta_u/\delta_y \quad (۲)$$

P_U بیشینه مقاومت برحسب کیلونیوتن، δ_y جابه‌جایی متناظر با مقاومت تسلیم برحسب میلی‌متر و δ_u جابه‌جایی متناظر با حداکثر مقاومت سازه یا ۰/۸ حداکثر مقاومت سازه بر حسب میلی‌متر است [26]. نمونه‌های تحلیلی با روش پریستل و پائولی که در این بخش به طور کامل توضیح داده شد، دو خطی شده است و نتایج آن در جداول (۸، ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲) ارائه شده است.

شکل ۹. دوخطی سازی با روش پریستلی و پائولی [26].

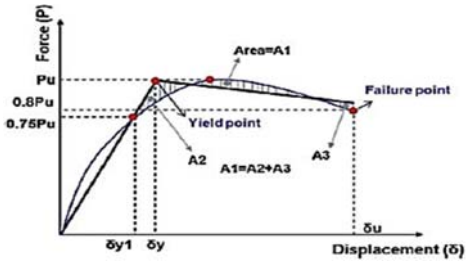


Fig 9. Bilinearization using priestly & Pauli method [26].

جدول ۸. نتایج دو خطی‌سازی نمونه‌های تحلیلی (FRAME).

Specimens	δ_y	δ_u	P_u	Lateral Load	Effective Stiffness	Ductility
NS-T100-P0.1-FRAME	16	78	72	72	4.5	4.87
NS-T100-P0.2-FRAME	16	51	77	77	4.81	3.18
NS-T100-P0.3-FRAME	14	39	78	78	5.49	2.75
S-T100-P0.1- FRAME	15	78	75	75	5	5.2
S-T100-P0.2- FRAME	15	59	82	82	5.46	3.93
S-T100-P0.3- FRAME	15	58	83	83	5.53	3.8

Table 8. Results of bilinearization of FRAME analytical specimens.

جدول ۹. نتایج دو خطی‌سازی نمونه‌های تحلیلی (EWO).

Specimens	δ_y	δ_u	P_u	Lateral Load (kN)	Effective Stiffness (kN/mm)	Ductility
NS-T100-P0.1-EWO	11.5	76	88	88	7.65	6.69
NS-T100-P0.2-EWO	10	60	99	99	9.9	6
NS-T100-P0.3-EWO	10.6	44	110	110	10.38	4.15
S-T100-P0.1- EWO	10.9	77	89	89	8.16	7.06
S-T100-P0.2- EWO	9.9	68	101	101	10.2	6.8
S-T100-P0.3- EWO	11	53	115	115	10.47	4.8
NS-T50-P0.1- EWO	11.2	62	84	84	7.5	5.54
NS-T50-P0.2- EWO	11	48	97	97	8.8	4.36
NS-T50-P0.3- EWO	11	39	105	105	9.55	3.54
S-T50-P0.1- EWO	11.5	77	87	87	7.56	6.7
S-T50-P0.2- EWO	11	59	98	98	8.9	5.36
S-T50-P0.3- EWO	10.5	46	110	110	10.45	4.38

Table 9. Results of bilinearization of EWO analytical specimens.

جدول ۱۰. نتایج دو خطی سازی نمونه‌های تحلیلی (RWO).

Specimens	δ_y	δ_u	P_u	Lateral Load (kN)	Effective Stiffness (kN/mm)	Ductility
NS-T100-P0.1-RWO	11	76	90	90	8.18	7
NS-T100-P0.2-RWO	13	77	115	115	8.85	5.92
NS-T100-P0.3-RWO	12	77	118	118	9.83	5
S-T100-P0.1- RWO	10.5	60	95	95	9	7.34
S-T100-P0.2- RWO	12	77	116	116	9.67	6.4
S-T100-P0.3- RWO	12.5	77	128	128	10.24	6.16
NS-T50-P0.1- RWO	11	58	89	89	8	5.45
NS-T50-P0.2- RWO	11	53	95	95	8.6	4.8
NS-T50-P0.3- RWO	11.21	50	108	108	9.6	4.46
S-T50-P0.1- RWO	10.9	58	92	92	8.45	5.32
S-T50-P0.2- RWO	10.5	53	103	103	9.6	5.04
S-T50-P0.3- RWO	11	50	109	109	9.9	4.54

Table 10. Results of bilinearization of RWO analytical specimens.

جدول ۱۱. نتایج دو خطی سازی نمونه‌های تحلیلی (LWO).

Specimens	δ_y	δ_u	P_u	Lateral Load (kN)	Effective Stiffness (kN/mm)	Ductility
NS-T100-P0.1-LWO	12	77	85	85	7.08	6.42
NS-T100-P0.2-LWO	11	60	97	97	8.81	5.45
NS-T100-P0.3-LWO	11	50	105	105	9.54	4.54
S-T100-P0.1- LWO	11.5	77	93	93	8.08	6.7
S-T100-P0.2- LWO	10.5	60	104	104	9.9	5.71
S-T100-P0.3- LWO	10	50	109	109	10.9	5
NS-T50-P0.1- LWO	14	77	84	84	6	5.5
NS-T50-P0.2- LWO	12	55	94	94	7.83	4.58
NS-T50-P0.3- LWO	11	48	97	97	8.82	4.36
S-T50-P0.1- LWO	13	77	87	87	6.69	5.9
S-T50-P0.2- LWO	11.8	65	95	95	8.05	5.5
S-T50-P0.3- LWO	11	53	100	100	9.09	4.8

Table 11. Results of bilinearization of LWO analytical specimens.

شکل ۱۰. مقایسه نمونه‌های تحلیلی با جزئیات لرزه‌ای و غیرلرزه‌ای.

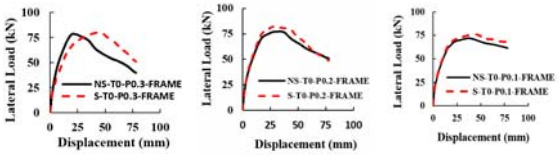


Fig. 10. Comparison of analytical samples with seismic details and non- seismic details.

جدول ۱۲. نتایج دو خطی سازی نمونه‌های تحلیلی (DO).

Specimens	δ_y	δ_u	P_u	Lateral Load (kN)	Effective Stiffness (kN/mm)	Ductility
NS-T100-P0.1-DO	10.5	76	78	78	7.43	7.24
NS-T100-P0.2-DO	11	50	92	92	8.36	4.55
NS-T100-P0.3-DO	10	40	102	102	10.2	4
S-T100-P0.1- DO	10	77	83	83	8.3	7.7
S-T100-P0.2- DO	9.5	60	93	93	9.79	6.32
S-T100-P0.3- DO	9.5	58	106	106	11.15	6.1
NS-T50-P0.1-DO	11.5	68	77	77	6.78	5.9
NS-T50-P0.2-DO	12	50	91	91	7.58	4.17
NS-T50-P0.3-DO	12.5	40	101	101	8.08	3.2
S-T50-P0.1- DO	10.5	78	80	80	7.62	7.43
S-T50-P0.2- DO	12	75	92	92	7.66	6.25
S-T50-P0.3- DO	10.5	50	102	102	9.71	4.78

Table 12. Results of bilinearization of DO analytical specimens.

۷-۱- بررسی نمونه‌های تحلیلی با جزئیات لرزه‌ای و غیر لرزه‌ای تحت سطوح بار محوری

در این بخش ابتدا نمونه قاب بتن مسلح با جزئیات لرزه‌ای و غیر لرزه‌ای و سپس نمونه‌های دارای میان‌قاب میان‌پر و بازشودار با ضخامت ۱۰۰ میلی‌متر که تحت سطوح مختلف بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ ظرفیت فشاری هر ستون است. به طور جداگانه بررسی می‌شود و در نهایت با یکدیگر مقایسه می‌شود.

۷-۱-۱- بررسی پارامتر سطوح بار محوری در نمونه‌ها با قاب بتن مسلح با جزئیات لرزه‌ای و غیر لرزه‌ای

با توجه به جدول (۸)، درصد اختلاف مقاومت نهایی، سختی مؤثر و شکل‌پذیری در قاب بتنی با جزئیات لرزه‌ای نسبت به قاب بتنی با جزئیات غیر لرزه‌ای در سطوح بار محوری ۰/۱ ظرفیت فشاری ستون‌ها به ترتیب برابر با ٤/۱٪ ، ۱۱/۱۲٪ ، ٦/۳٤٪ است، در سطوح بار محوری ۰/۲ ظرفیت فشاری ستون‌ها برابر با ٦/٥٪ ،۱۳/٥٪، ۲۳/٦٪ است و در سطوح بار محوری ۰/۳ ظرفیت فشاری ستون‌ها در قاب بتنی با جزئیات لرزه‌ای نسبت به جزئیات غیر لرزه‌ای برابر با ٦/٤٪ ، ۰/۷۲٪ ، ۳۸/۱۸٪ است. همانگونه که از شکل (۱۰) مشاهده می‌شود لرزه‌ای بودن قاب بتن مسلح نسبت به غیر لرزه‌ای بودن قاب بتن مسلح باعث افزایش مقامت نهایی، سختی مؤثر و شکل‌پذیری می‌شود، که علت این افزایش شکل‌پذیری، افزایش سختی و کاهش δ_y مانند جاری شدگی است. علاوه بر این با افزایش بار محوری ستون‌های قاب بتن مسلح نیز شکل پذیری کاهش می‌یابد.

۷-۱-۲- بررسی پارامتر سطوح بار محوری در نمونه‌ها با جزئیات آرماتوربندی لرزه‌ای

نمونه‌های تحلیلی (EWO) با توجه به جدول (۹)، نمونه S-T100-P0.1-EWO زمانی که تحت سطح بار محوری ۰/۱ قرار می‌گیرد، مقاومت نهایی آن برابر با ۸۹ کیلو نیوتن می‌شود، زمانی که سطوح بار محوری ۰/۲ و ۰/۳ ظرفیت فشاری ستون‌ها افزایش پیدا می‌کند، در نمونه‌های S-T100-P0.2-EWO و S-T100-P0.3-EWO مقاومت نهایی آن‌ها به ترتیب ۱۰۱ و ۱۱۵ کیلونیوتن و میانگین افزایش مقاومت نهایی ۱۳/٦۷٪ است. سختی مؤثر در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ به ترتیب برابر با ۸/۱٦ ، ۱۰/۲ و ۱۰/٤٥ است، میانگین افزایش سختی مؤثر ۱۳/۷۲٪ و شکل‌پذیری در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ برابر با ۷/۰٦ ، ٦/۸ و ٤/۸ است، میانگین کاهش شکل‌پذیری برابر ۱٦/٥٥-٪ است، (شکل ۱۱-الف).

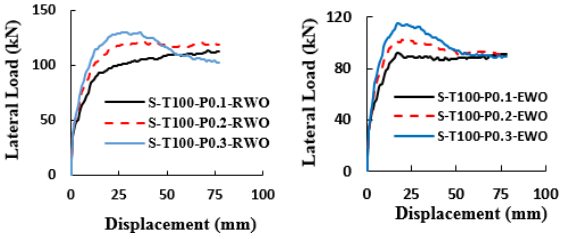
نمونه‌های تحلیلی (RWO) با توجه به جدول (۱۰)، نمونه S-T100-P0.1-RWO زمانی که سطح بار محوری ۰/۱ است، مقاومت نهایی آن برابر با ۹٥ کیلونیوتن می‌شود، زمانی که سطوح بار محوری ۰/۲ و ۰/۳ ظرفیت فشاری ستون‌ها افزایش پیدا می‌کند، در نمونه‌های S-T100-P0.2-RWO و S-T100-P0.3-RWO مقاومت نهایی آن‌ها به ترتیب ۱۱٦ و ۱۲۸ کیلونیوتن می‌شود، میانگین افزایش مقاومت ۱٦/۲۲٥٪ است. سختی مؤثر در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ به ترتیب برابر با ۹، ۹/٦۷ و ۱۰/۲٤ است، میانگین افزایش سختی مؤثر ٦/٦۷٪ است. شکل‌پذیری در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ برابر با ۷/۳٤ ، ٦/٤ و ٦/۱٦

است، میانگین کاهش شکل‌پذیری برابر ۸/۲۷۵-٪ است، (شکل ۱۱-ب).

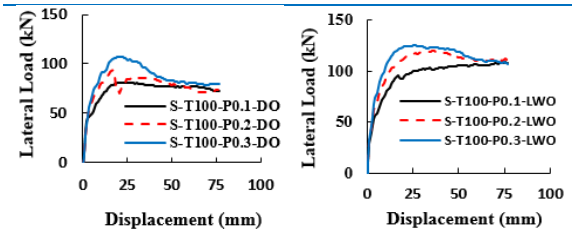
نمونه (LWO) با توجه به جدول (۱۱)، S-T100-P0.1-LW0 زمانی که سطح بار محوری ۰/۱ است مقاومت نهایی آن برابر با ۹۳ کیلونیوتن می‌شود، و زمانی که سطوح بار محوری ۰/۲ و ۰/۳ ظرفیت فشاری ستون‌ها افزایش پیدا می‌کند، در نمونه‌های S-T100-P0.2-LWO و S-T100-P0.3-LWO مقاومت نهایی آن‌ها به ترتیب ۱۰۴ و ۱۰۹ کیلونیوتن و میانگین افزایش مقاومت ۸٪/۳۷۵ است. سختی مؤثر در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ به ترتیب برابر با ۸/۰۸ ، ۹/۹ و ۱۰/۹ و میانگین افزایش سختی مؤثر ۱۶/۳۱۵٪ است. شکل‌پذیری در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ برابر با ۶/۷ ، ۵/۵۱ و ۵ است، میانگین کاهش شکل‌پذیری برابر ۸/۶۶-٪ است، (شکل ۱۱-پ).

نمونه تحلیلی (DO) با توجه به نتایج جدول (۱۲)، نمونه S-T100-P0.1-DO زمانی که تحت سطح بار محوری ۰/۱ قرار می‌گیرد، مقاومت نهایی آن برابر با ۸۳ کیلو نیوتن می‌شود، زمانی که سطوح بار محوری ۰/۲ و ۰/۳ ظرفیت فشاری ستون‌ها افزایش پیدا می‌کند، در نمونه‌های S-T100-P0.2-DO و S-T100-P0.3-DO و مقاومت نهایی آن‌ها به ترتیب ۹۳ و ۱۰۶ کیلونیوتن می‌شود، میانگین افزایش مقاومت نهایی ۱۳/۰۱۴٪ است. سختی مؤثر در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ به ترتیب برابر با ۷/۹ ، ۹/۷۹ و ۱۱/۱۵ است، میانگین افزایش سختی مؤثر ۱۸/۹٪ است. شکل‌پذیری در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ برابر با ۷/۳۴ ، ۶/۳۲ و ۶/۱ است، میانگین کاهش شکل‌پذیری برابر ۸/۶۴۵-٪ است، (شکل ۱۱-ت).

شکل ۱۱. نمونه‌های تحلیلی با جزئیات لرزه‌ای در سطوح مختلف بار محوری با ضخامت میانقاب ۱۰۰ میلی‌متر.



الف. EWO ب. RWO



پ. LWO ت. DO

Fig. 11. Analytical samples with seismic details at different axial load levels with thickness of 100 mm.

۷-۱-۳- بررسی پارامتر سطوح بار محوری در نمونه‌ها با جزئیات قاب غیر لرزه‌ای بتن مسلح

نمونه‌های تحلیلی (EWO) با توجه به جدول (۹)، نمونه NS-T100-P0.1-EWO زمانی که سطح بار محوری ۰/۱ است، مقاومت نهایی آن برابر با ۸۸ کیلو نیوتن می‌شود، زمانی که سطوح بار محوری ۰/۲ و ۰/۳ ظرفیت فشاری ستون‌ها افزایش پیدا می‌کند، نمونه‌های NS-T100-P0.2-EWO و NS-T100-P0.3-EWO مقاومت نهایی آن‌ها به ترتیب ۹۹ و ۱۱۰ کیلونیوتن و میانگین افزایش مقاومت ۱۱/۸٪ است. سختی مؤثر در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ به ترتیب برابر با ۷/۶۵، ۹/۹ و ۱۰/۳۸ است، میانگین افزایش سختی مؤثر ۱۷/۱۲۵٪ است. شکل‌پذیری سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ برابر با ۶/۶۹ ، ۶ و ۴/۱۵ است، میانگین کاهش شکل‌پذیری برابر ۶/۷-٪ است، (شکل ۱۲-الف).

نمونه‌های تحلیلی (RWO) با توجه به نتایج جدول (۱۰)، نمونه NS-T100-P0.1-RWO زمانی که تحت سطح بار محوری ۰/۱ قرار می‌گیرد، مقاومت نهایی آن برابر با ۹۰ کیلو نیوتن می‌شود، زمانی که سطوح بار محوری ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۳ ظرفیت فشاری ستون‌ها افزایش پیدا می‌کند، در نمونه‌های NS-T100-P0.2-RWO و NS-T100-P0.3-RWO مقاومت نهایی آن‌ها به ترتیب ۱۱۵ و ۱۱۸ کیلونیوتن می‌شود، میانگین افزایش مقاومت نهایی ۱۵٪/۲ است. سختی مؤثر در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ به ترتیب برابر با ۸/۱۸، ۸/۸۵ و ۹/۸۳ و میانگین افزایش سختی مؤثر ۷/۱۳٪ است. شکل‌پذیری در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ برابر با ۷ ، ۵/۹۲ و ۵ است، میانگین کاهش شکل‌پذیری برابر ۱۵/۴۸٪ است، (شکل ۱۲-ب).

نمونه‌های تحلیلی (LWO) با توجه به نتایج جدول (۱۱)، نمونه NS-T100-P0.1-LWO زمانی که تحت سطح بار محوری

۰/۱ است، مقاومت نهایی آن برابر با ۸۵ کیلو نیوتن می‌شود، زمانی که سطوح بار محوری ۰/۲ و ۰/۳ ظرفیت فشاری ستون‌ها افزایش پیدا می‌کند، در نمونه‌های NS-T100-P0.2-LWO و NS-T100-P0.3-LWO مقاومت نهایی آن‌ها به ترتیب ۹۷ و ۱۰۵ کیلونیوتن می‌شود، میانگین افزایش مقاومت نهایی ۱۱/۸۵٪ است. سختی مؤثر در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ به ترتیب برابر با ۷/۰۸ ، ۸/۸۱ و ۹/۵٤ است، میانگین افزایش سختی مؤثر ۱٦/۳۵٪ است. شکل‌پذیری در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ برابر با ٦/٤۲ ، ۵/٤۵ و ٤/۵٤ است، میانگین کاهش شکل‌پذیری برابر ۱۵/۸۹۵-٪ است، (شکل ۱۲–پ).

نمونه‌های تحلیلی (DO) با توجه به جدول (۱۲) نمونه NS-T100-P0.1-DO که تحت بار محوری ۰/۱ است، مقاومت نهایی آن برابر با ۷۸ کیلو نیوتن می‌شود، زمانی که سطوح بار محوری ۰/۲ و ۰/۳ ظرفیت فشاری ستون‌ها افزایش پیدا می‌کند، در نمونه‌های NS-T100-P0.2-DO و NS-T100-P0.3-DO مقاومت نهایی آن‌ها به ترتیب ۹۲ و ۱۰۲ کیلونیوتن و میانگین افزایش مقاومت ۱٤/٤۱٪ است. سختی مؤثر در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ به ترتیب برابر با ۷/٤۳ ، ۸/۳٦ و ۱۰/۲ و میانگین افزایش سختی مؤثر ۱۷/۲٦٪ است. شکل‌پذیری در سطوح بار محوری ۰/۱ ، ۰/۲ و ۰/۳ برابر با ۷/۲٤ ، ٤/۵۵ و ٤ و میانگین کاهش شکل‌پذیری برابر ۲٤/٦۱۵-٪ است، (شکل ۱۲–ت).

شکل ۱۲. نمونه‌های تحلیلی با جزئیات غیر لرزه‌ای در سطوح مختلف بار محوری با ضخامت میان‌قاب ۱۰۰ میلی‌متر.

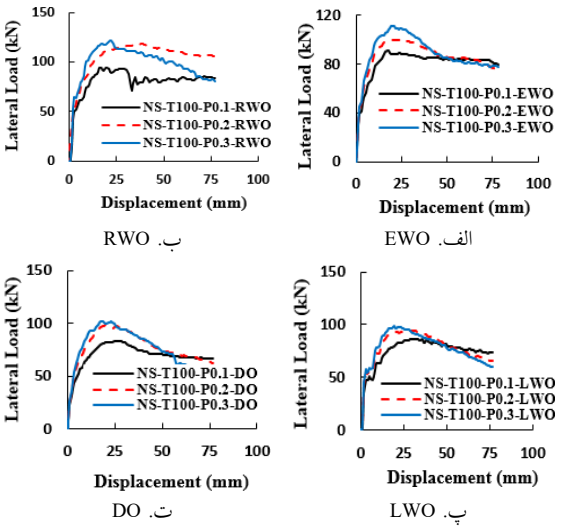


Fig. 12. Analytical samples with non-seismic details at different axial load levels with thickness of 100 mm.

همان‌گونه که در شکل (۱۱ و ۱۲) مشاهده می‌شود نمونه‌های دارای آرماتورهای لرزه‌ای نسبت به نمونه‌های دارای آرماتورهای غیر لرزه‌ای باعث افزایش مقامت نهایی، سختی مؤثر و شکل‌پذیری در نمونه‌های بازشودار می‌شود، علت این افزایش شکل‌پذیری، افزایش سختی و کاهش δ_y مانند جاری‌شدگی است. با مطالعه تحقیقات گذشته از جمله معرفت و همکاران [27]، در قاب‌های بتن مسلح در نمونه‌های لرزه‌ای و غیر لرزه‌ای با افزایش بار محوری مقاومت و سختی اولیه افزایش پیدا می‌کند، اما پس از نقطه حداکثر مقاومت به دلیلی ایجاد آثار *P-Δ* مقاومت و سختی کاهش پیدا می کند علاوه بر این با افزایش بار محوری شکل‌پذیری کاهش می‌یابد.

۷-۲- تاثیر ضخامت میان‌قاب‌های مصالح بنایی دارای بازشو درب و پنجره

در این بخش به بررسی ضخامت میان‌قاب مصالح بنایی در عملکرد لرزه‌ای قاب‌های دارای میان‌قاب مصالح بنایی دارای بازشو درب و پنجره با ابعاد مختلف پرداخته می‌شود.

۷-۲-۱- بررسی تأثیر ضخامت در نمونه‌های تحلیلی دارای قاب با جزئیات لرزه‌ای

زمانی که نمونه‌ها (EWO) با جزئیات لرزه‌ای ضخامت آن از ۵۰ میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد. مطابق با جدول (۹)، مقاومت نهایی، سختی مؤثر و شکل پذیری در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۱ به ترتیب ۲/۳٪ ، ۷/۹٤٪ و ۵/۳۷٪ افزایش می‌یابد. نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۲ به ترتیب ۳٪ ، ۱٤/٦٪ و ۳٦/۸٦٪ افزایش می‌یابد و در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۳ به ترتیب ٤/۵٤٪ ، ۰/۱۹٪ و۹/۵۹٪ افزایش می‌یابد، (شکل ۱۳–الف).

نمونه‌های (RWO) با جزئیات لرزه‌ای ضخامت آن از ۵۰ میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد با توجه به جدول (۱۰)، مقاومت نهایی، سختی مؤثر و شکل‌پذیری در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۱ به ترتیب ۳/۲٦٪ ، ٦/۵٪ و ۳۷/۹۷٪ افزایش می‌یابد. نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۲ به ترتیب ۱۲/۲٦٪ ، ۰/۷۲٪، ۲٦/۹۸ ٪ افزایش می‌یابد و در نمونه‌ها با سطح بار

محوری ۰/۳ به ترتیب ۱۷/۴۳ ٪، ۳/۴۳ ٪ و ۳۵/۶۸٪ افزایش می‌یابد، (شکل ۱۳–ب).

نمونه‌های (LWO) با جزئیات لرزه‌ای ضخامت آن از ۵۰ میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد مطابق با نتایج جدول (۱۱)، مقاومت نهایی، سختی مؤثر و شکل پذیری در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۱ به ترتیب ۶/۹٪ ، ۲۰/۷۸٪ و ۱۳/۶٪ افزایش می‌یابد. در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۲ به ترتیب ۹/۴۷٪ ، ۲۳٪.۲۳ ، ۳/۸۲ ٪ افزایش می‌یابد. در نمونه‌ها با سطح بار محوری۰/۳ به ترتیب ۹٪ ، ۱۹/۹۱٪ و۴/۱۷٪ افزایش می‌یابد، (شکل ۱۳–پ).

نمونه‌های (DO) با جزئیات لرزه‌ای ضخامت آن از ۵۰ میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد با توجه به نتایج جدول (۱۲)، مقاومت نهایی، سختی مؤثر و شکل‌پذیری در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۱ به ترتیب ۳/۷۵٪ ، ۳/۹٪ و ۳/۶۳٪ افزایش می‌یابد. در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۲ به ترتیب ۱/۰۸٪ ، ۲۷/۸٪ و ۱/۱۲٪ افزایش می‌یابد. در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۳ به ترتیب ۳/۹۲٪ ، ۱۴/۸۳٪ و ۲۷/۶٪ افزایش می‌یابد، (شکل ۱۳–ت).

شکل ۱۳. نمونه‌های تحلیلی با جزئیات لرزه‌ای در سطوح مختلف بار محوری با ضخامت میان‌قاب ۵۰ میلی‌متر.

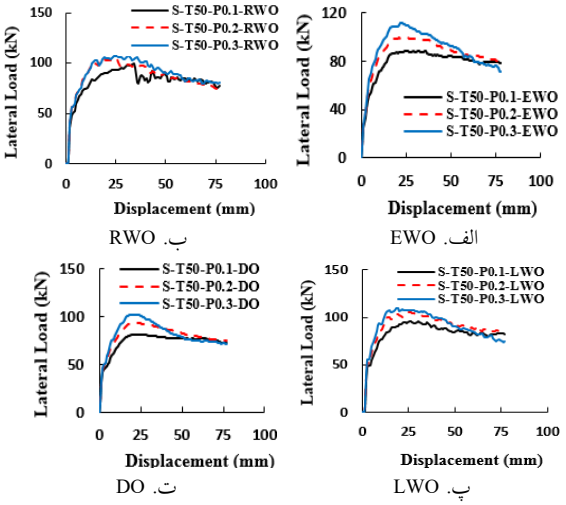


Fig. 13. Analytical samples with seismic details at different axial load levels with thickness of 50 mm.

۷–۲–۲– بررسی تأثیر ضخامت در نمونه‌های تحلیلی دارای قاب با جزئیات غیر لرزه‌ای

نمونه‌های (EWO) با جزئیات غیر لرزه‌ای مطابق با نتایج جدول (۹)، زمانی که نمونه ضخامت آن از ۵۰ میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد. مقاومت نهایی، سختی مؤثر و شکل‌پذیری در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۱ به ترتیب ۴/۷۶ ٪ ، ۲٪ و ۲۰/۷۶٪ افزایش می‌یابد. در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۲ به ترتیب ۲/۰۶ ٪ ، ۱۲/۵ ٪ و۳۷/۶ ٪ افزایش می‌یابد. در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۳ به ترتیب ۴/۷۶٪ ، ۸/۶۹ ٪ و۱۷/۲۳٪ افزایش می‌یابد، (شکل ۱۴–الف).

نمونه‌های (RWO) با جزئیات غیر لرزه‌ای مطابق با نتایج جدول (۱۰)، زمانی که نمونه ضخامت آن از ۵۰ میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد. مقاومت نهایی، سختی مؤثر و شکل پذیری در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۱ به ترتیب ۱/۱۲٪ ، ۱۰٪ و ۲۸٪/۴ افزایش می‌یابد. در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۲ به ترتیب ۲۱ ٪ ، ۲/۹ ٪ ، ۲۳/۴ ٪ افزایش می‌یابد، در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۳ به ترتیب ۹/۲۶٪ ، ۲/۴٪ و۱۲/۱٪ افزایش می‌یابد، (شکل ۱۴–ب).

نمونه‌های تحلیلی (LWO) با جزئیات غیر لرزه‌ای مطابق با جدول (۱۱) ، زمانی که نمونه ضخامت آن از ۵۰ میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد. مقاومت نهایی، سختی مؤثر و شکل‌پذیری در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۱ به ترتیب ۱/۱۹٪ ، ۱۸٪ و ۱۶/۷۳٪ افزایش می‌یابد. در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۲ به ترتیب ۳/۲٪ ، ۱۲/۵۲٪ و ۱۹٪ افزایش می‌یابد. در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۳ به ترتیب ۸/۲۵٪ ، ۸/۱۶٪ و۴/۱۳٪ افزایش می‌یابد، (شکل ۱۴–پ).

نمونه‌های تحلیلی (DO) با جزئیات غیر لرزه‌ای مطابق با توجه به جدول (۱۲)، زمانی که نمونه ضخامت آن از ۵۰ میلی‌متر به ۱۰۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد. مقاومت نهایی، سختی مؤثر و شکل پذیری در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۱ به ترتیب ۱/۳٪ ، ۹/۵۸٪ و ۲۲/۷۱٪ افزایش می‌یابد. در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۲ به ترتیب ۱٪ ، ۱۰/۳٪ ، ۹/۱۱٪ افزایش می‌یابد. در نمونه‌ها با سطح بار محوری ۰/۳ به ترتیب ۱٪ ، ۲۶/۲۴٪ و ۲۵٪ افزایش می‌یابد، (شکل ۱۴–ت).

شکل ۱۴. نمونه‌های تحلیلی با جزئیات غیر لرزه‌ای در سطوح مختلف بار محوری با ضخامت میان‌قاب ۵۰ میلی‌متر.

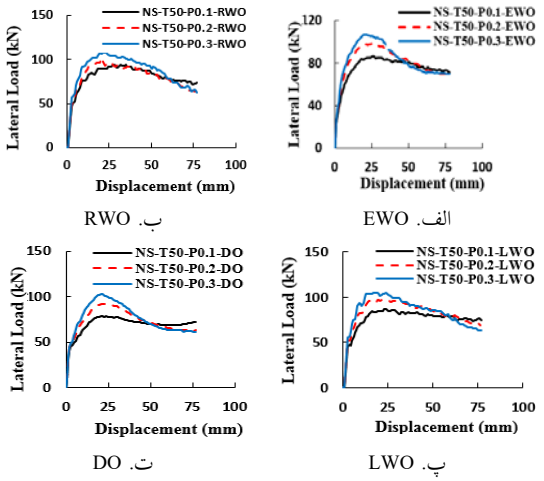


Fig. 14. Analytical samples with non-seismic details at different axial load levels with thickness of 50 mm.

۸- نتیجه گیری

در این مقاله ٤٨ نمونه قاب دارای میان‌قاب مصالح بنایی با بازشو با ابعاد مختلف درب و پنجره تحت بار جانبی داخل صفحه مدل‌سازی شده‌اند و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است:

۱- لرزه‌ای بودن قاب بتن مسلح نسبت به غیر لرزه‌ای بودن قاب بتن مسلح باعث افزایش مقامت نهایی، سختی مؤثر و شکل‌پذیری می‌شود، که علت این افزایش شکل‌پذیری، افزایش سختی و کاهش δ_y مانند جاری شدگی است. علاوه بر این با افزایش بار محوری ستون‌های قاب بتن مسلح نیز شکل پذیری کاهش می‌یابد.

۲- نمونه قاب‌های دارای میان‌قاب بازشودار مقاومت ترک خوردگی و مقاومت نهایی را به میزان قابل توجهی کاهش می‌دهند، البته هرچه بازشوها از مرکز میان‌قاب مصالح بنایی فاصله داشته باشد وجود بازشو باعث کاهش سختی نمونه شده، که میزان این کاهش در نمونه دارای بازشوی درب بیش از نمونه دارای بازشوی پنجره بوده است.

۳- در میان‌قاب‌های مصالح بنایی هرچه بازشو به کناره میان‌قاب مصالح بنایی نزدیک‌تر باشد، مقاومت نهایی بیشتر تحت تأثیر قرار می‌گیرند و هرچه بازشو به مرکز میان‌قاب مصالح بنایی نزدیک‌تر باشد، این تأثیر کمتر است.

٤- وجود بازشو درب در میان‌قاب منجر به کاهش بیشتری در مقاومت نهایی، سختی مؤثر، شکل‌پذیری نسبت به بازشو پنجره می‌شود.

۵- نمونه‌های تحلیلی دارای بازشو زمانی‌که قاب بتن مسلح آن به صورت لرزه‌ای است عملکرد لرزه‌ای بهتری از لحاظ مقاومت‌نهایی، سختی مؤثر و شکل پذیری دارد و خسارت کمتری وارد می‌شود.

٦- در نمونه‌های بازشودار EWO ، RWO ، LWO ، DO با ضخامت میان‌قاب ۱۰۰ میلیمتر و ۵۰ میلی‌متر و دارای جزئیات لرزه‌ای و غیر لرزه‌ای قاب بتن مسلح با افزایش بار محوری ستون‌های قاب‌های بتن مسلح، مقاومت و سختی مؤثر افزایش پیدا می‌کند، اما پس از نقطه بیشینه مقاومت به دلیلی ایجاد آثار P-Δ مقاومت و سختی کاهش پیدا می‌کند، علاوه بر این با افزایش بار محوری نیز شکل پذیری کاهش می‌یابد.

۹- مراجع

[1] Asteris PG, Cavaleri L, Di Trapani F, Tsaris AK. Numerical modelling of out-of-plane response of infilled frames: State of the art and future challenges for the equivalent strut macromodels. Engineering Structures. 2017 Feb 1; 132:110-22.

[2] Ozturkoglu O, Ucar T, Yesilce Y. Effect of masonry infill walls with openings on nonlinear response of reinforced concrete frames. Earthquakes and Structures. 2017 Mar 1; 12(3):333-47.

[3] Mosalam KM, White RN, Gergely P. Static response of infilled frames using quasi-static experimentation. Journal of Structural Engineering. 1997 Nov;123(11):1462-4169.

[4] Asteris PG. Lateral stiffness of brick masonry infilled plane frames. Journal of structural engineering. 2003 Aug; 129(8):1071-9.

[5] Kakaletsis D, Karayannis C. Experimental investigation of infilled R/C frames with eccentric openings. Structural Engineering and Mechanics. 2007 Jan 1; 26(3):231-50.

[6] Kakaletsis DJ, Karayannis CG. Influence of masonry strength and openings on infilled R/C frames under cycling loading. Journal of Earthquake Engineering. 2008 Feb 13; 12(2):197-221.

[7] Kakaletsis DJ, Karayannis CG. Experimental Investigation of Infilled Reinforced Concrete Frames with Openings. ACI structural journal. 2009 Mar 1; 106(2).

[8] Blackard B, Willam K, Mettupalayam S. Experimental observations of masonry infilled

reinforced concrete frames with openings. Special Publication. 2009 Oct 1; 265:199-22.

[9] Stavridis A. Analytical and experimental study of seismic performance of reinforced concrete frames infilled with masonry walls. University of California, San Diego; 2009.

[10] Tasnimi AA, Mohebkhah A. Investigation on the behavior of brick-infilled steel frames with openings, experimental and analytical approaches. Engineering Structures. 2011 Mar 1; 33(3):968-80.

[11] Zhai C, Kong J, Wang X, Chen Z. Experimental and finite element analytical investigation of seismic behavior of full-scale masonry infilled RC frames. Journal of Earthquake Engineering. 2016 Oct 2; 20(7):1171-98.

[12] Budiwati IA, Sukrawa M. Development of diagonal strut width formula for infill wall with reinforced opening in modeling seismic behavior of RC infilled frame structures. InAIP Conference Proceedings 2018 Jun 26 (Vol. 1977, No. 1, p. 020062). AIP Publishing LLC.

[13] Mansouri A, Marefat MS, Khanmohammadi M. Experimental evaluation of seismic performance of low-shear strength masonry infills with openings in reinforced concrete frames with deficient seismic details. The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2014 Oct 25; 23(15):1190-210.

[14] S. 9th, "The Design And Implementation Of Reinforced Concrete Buildings," *National Iranian Building Regulation,* vol. 2012. (In Pershian).

[15] Dolatshahi KM, Yekrangnia M. Out-of-plane strength reduction of unreinforced masonry walls because of in-plane damages. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 2015 Oct 25;44(13):2157-76.

[16] Dolatshahi KM. Computational, analytical and experimental modeling of masonry structures. State University of New York at Buffalo; 2012.

[17] Lourenço PJ. Computational strategies for masonry structures. 1997.

[18] Lourenço PB. A user/programmer guide for the micro-modeling of masonry structures. Report. 1996 Nov;3(1.31):35.

[19] Moretti ML. Seismic design of masonry and reinforced concrete infilled frames: a comprehensive overview. American Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015 Oct 1;8(4):748.

[20] ABAQUS I. ABAQUS Theory User Manual. 2011.

[21] Prestandard FE. commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA356). Washington, DC: Federal Emergency Management Agency. 2000;7(2).

[22] ACI Committee. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. American Concrete Institute. 2008.

[23] shahbazi R, Yekrangnia M. ABAQUS practical quide with civil engineering issues. srtuctural and geotechnical, vol. thired edition. 2016.

[24] A. I. T. G. 1. Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing (T1. 1-01) and Commentary (T1. 1R-01): An ACI Standard. 2001.

[25] Sigmund V, Penava D. Influence of openings, with and without confinement, on cyclic response of infilled rc frames—an experimental study. Journal of earthquake engineering. 2014 Jan 2;18(1):113-46.

[26] Shafaei J, Hosseini A, Marefat MS. Seismic retrofit of external RC beam–column joints by joint enlargement using prestressed steel angles. Engineering Structures. 2014 Dec 15;81:265-88.

[27] Marefat MS, Khanmohammadi M, Bahrani MK, Goli A. Experimental assessment of reinforced concrete columns with deficient seismic details under cyclic load. Advances in Structural Engineering. 2006 Jun;9(3):337-47.

نشانه‌ها و علائم

A_g	مساحت سطح مقطع ستون (mm^3)
E	مدول الاستیسیته مصالح بنایی، (N/mm^2)
f_t	مقاومت کششی درز ملات، (N/mm^2)
G_f^{I}	انرژی شکست در کشش، $(N.mm/mm^2)$
G_f^{II}	انرژی شکست در برش، $(N.mm/mm^2)$
K_{nn}	سختی ملات در جهت عمودی(کششی)، (N/mm^3)
K_{ss}	سختی ملات در جهت برشی محور۱، (N/mm^3)
K_{tt}	سختی ملات در جهت برشی محور ۲، (N/mm^3)
S OR NS-T-P-Model	Seismic Or Non Seismic-Thickness Infill (mm)- 0.1 , 0.2 & 0.3 Lateral Load- Frame Or Solid
ρ	چگالی مصالح بنایی، (Ton/mm^3)
ν	ضریب پواسون
μ	ضریب اصطکاک

Analytical study of the effect of different parameters on the seismic performance of masonry infill with opening in frames with seismic and non-seismic detailing

Delaram Ostad [1], Jalil Shafaei [2]

1.PhD student, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.
2. Assistant Professor, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran.

Abstract
Frames with masonry infill are the most common type of structures used to build multi-storey structures in developing countries. Masonry infill are caused to increase the initial stiffness and strength of reinforced concrete buildings. On the other hand, placing door and window in masonry infill will be inevitable. Current RC structures having the most concrete frame system with masonry infill, are located in the middle and surrounding part of the buildings. So studying the effect of masonry infill on structure behavior during an earthquake is an important subject. Nowadays, the impact of the frame and infill on structure is one of the major challenges in engineering researches; because engineers ignore infill in designing of the building; and consider it as non-structural part and just consider its weight. When the masonry infill is placed in the concrete frame, significantly changes its mechanical properties, the stiffness and strength of the structure increase and ductility of the concrete frame reduce. There is interaction between masonry infill and it's frame, so, the frames with infill behave differently than those frames without infill. Disregarding the effect of masonry infill, they can be safe and reliable in terms of resistance in design, since the increasing strength around frame has a positive effect on earthquake strength and overall structural stability, however, it should also be considered that masonry infill will increase the stiffness of the infill-frame and larger portion of the lateral load would attracted by frames. This can be a negative factor when ignore the infill masonry in the design. In the present study, by numerical modeling by nonlinear finite element method, the effect of the presence of masonry infill with different door and window openings on the behavior of concrete frames with seismic and non-seismic details at different axial load levels and different masonry infill thicknesses in seismic performance of frames concrete has been examined. For this purpose, the proposed models are first validated using laboratory results in ABAQUS finite element software. The results of the analysis show that increasing the axial load increases the final strength, effective stiffness and reduces ductility in specimens with masonry infill with different opening of doors and windows and reinforced concrete frame with seismic characteristics. The ultimate strength in specimens with reinforced concrete frame with seismic characteristics shows a slight increase compared to similar samples with reinforced concrete frame with non-seismic characteristics, which can be ignored. Increasing the thickness of the specimens increased the ultimate strength and effective stiffness of the specimens with seismic and non-seismic details. The results of these studies show that the different positions of the openings have significant effects on the behavior of the frames. If the opening is large or moves away from the center of the masonry infill, the final strength drop and reduction of effective stiffness will be more

Keyword: Masonry infill, Opening, Monotonic loading, Seismic performance, Finite element analysis.
.