



# Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



## Comparison of Analytical Methods for Modelling Masonry Infill by Considering In-Plane and Out-of-Plane Interaction

Delaram Ostad<sup>1</sup>, Jalil Shafaei<sup>2\*</sup>

1- MSc student, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

### ABSTRACT

Masonry infilled reinforced concrete frame buildings built prior to the introduction of modern seismic provisions have been observed to undergo damage in and around the masonry infill walls during most recent moderate to severe earthquakes. Considering interaction between masonry infill and frame is one of the challenges in the field of engineering research. Observation of past earthquake indicates that in the pre-damaged infill wall in the in-plane mode, the probability of out-of-plane failure of infill walls will increase. However various studies have shown that if the infill wall correctly restrained by the frame, there is a significant capacity, in terms of force and displacement against the out-of-plane demands. The prediction of interaction and effect of in-plane behavior on the out-of-plane behaviour of infill, is one of the new issues in the field of seismic evaluation of masonry infills. This paper present comparative parametric review of the strength and displacement capacity models that predict the infills out-of-plane responses. Also, models that consider influence of in-plane damage on the out-of-plane capacity, it has also been investigated. The parametric comparison of different models in the capacity estimation of masonry infills in out-of-plane mode is shown that interaction of in-plane and out-of-plane behaviour of infills has a significant effect on capacity reduction of infills in out-of-plane mode and the model presented in FEMA360 for out-of-plane capacity of infills has a conservative results.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 10 February 2019

**Revise Date:** 29 April 2019

**Accept Date:** 08 June 2019

### Keywords:

Infilled frames

In-plane

Out-of-plane

Arching action

Seismic response

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2019.171512.1782

\*Corresponding author: Jalil Shafaei

Email address: jshafaei@shahroodut.ac.ir

## مقایسه روش‌های مدل‌سازی میان‌قاب‌های مصالح بنایی با رویکرد تأثیر اندرکنش رفتار درون صفحه بر رفتار برون صفحه میان‌قاب‌ها

دلارام استاد<sup>۱</sup>، جلیل شفائی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

### چکیده

در نظر گرفتن اندرکنش قاب و میان‌قاب یکی از چالش‌های مهم در زمینه‌ی تحقیقات مهندسی سازه می‌باشد. مشاهده آسیب‌های زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که، آسیب دیدگی و خسارت میان‌قاب‌ها در داخل صفحه و کاهش سطح تماس میان‌قاب و قاب پیرامونی منجر به افزایش آسیب پذیری در خارج از صفحه میان‌قاب می‌شود. تجربیات زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که اگر میان‌قاب‌ها به درستی توسط قاب پیرامونی مهار شوند، ظرفیت قابل ملاحظه‌ای، به لحاظ نیرویی و تغییرشکلی در برابر تقاضاهای خارج از صفحه میان‌قاب را دارا می‌باشند. پیش‌بینی اندرکنش و تأثیر رفتار داخل صفحه میان‌قاب، بر روی رفتار خارج از صفحه میان‌قاب‌ها، یکی از موضوعات جدید، در زمینه‌ی ارزیابی رفتار لرزه‌ای میان‌قاب‌های بنایی می‌باشد. در این مقاله ضمن بررسی روش‌های مدل‌سازی رفتار میان‌قاب‌ها در خارج از صفحه، مدل‌های رفتاری و ظرفیتی مختلف در برآورد پاسخ خارج از صفحه میان‌قاب‌ها مقایسه شده‌اند. همچنین، مدل‌هایی که تأثیر خسارت داخل صفحه میان‌قاب را، بر روی ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب در نظر می‌گیرند، نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مروری بر مدل‌های مختلف در برآورد ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب‌های بنایی نشان می‌دهد، که اندرکنش رفتار داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در کاهش ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب دارد. مدل ارائه شده در نشریه ۳۶۰ برای ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب‌های بنایی به دلیل عدم در نظر گرفتن اندرکنش رفتار داخل و خارج از صفحه میان‌قاب، نتایج محافظه کارانه‌ای دارد.

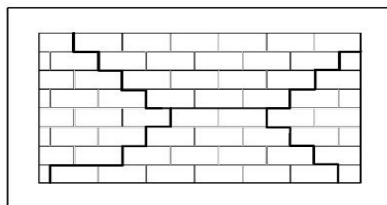
کلمات کلیدی: قاب و میان‌قاب، رفتار داخل صفحه، رفتار خارج از صفحه، عملکرد قوسی، پاسخ لرزه‌ای

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2019.171512.1782	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2019.171512.1782	۱۴۰۰/۰۳/۳۰	۱۳۹۸/۰۳/۱۸	۱۳۹۸/۰۳/۱۸	۱۳۹۸/۰۲/۰۹	۱۳۹۷/۱۱/۲۱
				*نویسنده مسئول:		
				پست الکترونیکی:		
				جلیل شفائی		
				shahroodut.ac.ir		

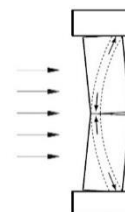
۱- مقدمه

مطالعه اندرکنش میان قاب‌های بنایی<sup>۱</sup> و سازه‌های قابی<sup>۲</sup> اعم از بتن مسلح و فولادی، به مدت ۶۰ سال است که به علت نقش مهم میان قاب‌ها، در عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها، مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. مدل‌های رفتاری که برای پیش‌بینی ظرفیت مقاومتی و جابه‌جایی میان قاب در داخل صفحه و خارج از صفحه ارائه شده است؛ به طور مداوم توسط محققین مختلف بروز می‌شوند و در برنامه‌های اجزای محدود، مورد استفاده قرار می‌گیرند. پاسخ نهایی سازه، ارتباط مستقیمی با رفتار اندرکنشی<sup>۳</sup> قاب و میان قاب دارد. میان قاب‌ها باعث افزایش شدید سختی، نسبت به سازه‌هایی که میان قاب ندارند، می‌شوند؛ و به طور قابل ملاحظه‌ای پاسخ‌های دینامیکی سازه را تغییر می‌دهند [۱، ۲]. افزایش همزمان سختی به صورت نامتعادل و مقاومت ناپایدار سازه ناشی از حضور میان قاب، زمینه را برای فروپاشی و یا آسیب به اجزای سازه‌ای و غیر سازه‌ای فراهم می‌کند [۳، ۴].

مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی بسیار زیادی، به منظور پیش‌بینی و فهم رفتار داخل صفحه میان قاب‌ها، انجام شده است. اما این مطالعات، در واقع هیچ کدام همزمانی تأثیر رفتار درون صفحه<sup>۴</sup> را بر رفتار خارج از صفحه<sup>۵</sup> میان قاب، یا به عبارتی اثرات اندرکنشی رفتار داخل صفحه و خارج از صفحه را بر روی میان قاب لحاظ نکرده‌اند. مشاهده آسیب‌های زلزله‌های گذشته نشان می‌دهد که، آسیب دیدگی و خسارت میان قاب‌ها در داخل صفحه و کاهش سطح تماس میان قاب و قاب پیرامونی منجر به افزایش آسیب‌پذیری در خارج از صفحه میان قاب می‌شود. در بعضی از مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی، محققین گذشته نشان داده‌اند که، انهدام خارج از صفحه میان قاب، نتیجه تأثیر خسارت‌های داخل صفحه میان قاب می‌باشد. به دلیل سختی بالای میان قاب در داخل صفحه، مقدار قابل توجهی از برش طبقه توسط میان قاب جذب می‌شود که منجر به خسارت و ترک خوردگی‌های قطری در میان قاب می‌شود. ترک خوردگی میان قاب در داخل صفحه می‌تواند شرایط گسیختگی و آسیب‌پذیری میان قاب در تقاضاهای خارج از صفحه میان قاب را ایجاد کند. علیرغم این توضیحات، میان قاب‌ها در ساختمان‌های قدیمی یا ساختمان‌های موجود، خیلی لاغر نیستند، و با توجه به اینکه میان قاب‌ها در قاب‌های مرزی پیرامونی میان قاب به خوبی مهار شده‌اند، بنابراین به اندازه کافی سخت هستند و می‌توانند مقاومت قابل توجه و ظرفیت جابه‌جایی خوبی را در مقابل نیروهای عمود بر صفحه از خود نشان بدهند. مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی متعددی نشان داده است، که میان قاب‌های بنایی در صورتی که عملکرد قوسی در خارج از صفحه داشته باشند، شکل (الف) ظرفیت قابل توجهی را به لحاظ نیرویی و تغییر مکانی در خارج از صفحه از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این‌ها شکل ترک خوردگی میان قاب‌ها به دلیل عملکرد آنها در خارج از صفحه نشان می‌دهد، که قاب محیطی میان قاب، نقش مهمی در عملکرد قوسی میان قاب دارد. که این عملکرد همان‌طور که در شکل (ب) نشان داده شده است، در دو راستای طولی و عرضی میان قاب شکل گرفته است. در تئوری‌های مختلف رفتار دو بعدی خمشی میان قاب‌های بنایی در خارج از صفحه، برای اکثر موارد پذیرفته شده است. با این حال، نتایج کارهای محققین مختلف، اغلب با یکدیگر در تناقض می‌باشد. که این تناقض را می‌توان در پاره‌ای از موارد به مشخصات قاب آزمایشگاهی مرجع، در کارهای آزمایشگاهی آنها اختصاص داد [۵].



ب) شمایی از ترک خوردگی میان قاب در خارج از صفحه



الف) نمایش عملکرد قوسی میان قاب در خارج از صفحه

شکل ۱: عملکرد مکانیسم میان قاب در خارج از صفحه

<sup>1</sup> Infill Masonry Frames

<sup>2</sup> Frame Structures

<sup>3</sup> Interaction

<sup>4</sup> In-Plane

<sup>5</sup> Out-Of-Plane

مطالعات *Dizhur* و همکاران [۶، ۷] که بر روی شش ساختمان مصالح بنایی برای ارزیابی لرزه‌ای انجام شده بود، نشان داد که عملکرد خمشی دو طرفه در مقایسه با خمشی یک طرفه دیوارهای غیر مسلح مصالح بنایی، ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب‌ها را افزایش می‌دهد. به علاوه آسیب‌های داخل صفحه، مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب‌ها را به میزان ۴۰٪ کاهش می‌دهد. و این اثرات در زلزله‌های سال‌های اخیر در ایتالیا، نیوزلند، نپال قابل مشاهده است. برخی از شکست‌های خارج از صفحه میان‌قاب‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است.



پ) Kathmandu نپال، سال ۲۰۱۵ [۷]



ب) Christchurch نیوزلند، سال ۲۰۱۱ [۷]



الف) L'Aquila ایتالیا، سال ۲۰۰۹ [۶]

شکل ۲: آسیب دیدگی خسارت داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب در زلزله‌های گذشته

و نتایج آزمایشات *Palieraki* و همکاران [۸] که بر روی قاب‌های بتنی که با میان‌قاب‌هایی که از مصالح آجری و بتنی پر شده بودند، نشان داد سختی در قاب و میان‌قاب در داخل صفحه کاهش پیدا می‌کند، پیش از آن‌که آسیب در خارج از صفحه رخ بدهد. در آزمایشات انجام شده توسط *Hak* و همکاران [۹] که بر روی یک قاب تک دهانه که با میان‌قاب مصالح بنایی پر شده بود، نشان می‌دهد کاهش سختی و مقاومت در خارج از صفحه مربوط به خسارت‌ها در داخل صفحه است.

مشاهدات موجود از زلزله‌های گذشته در کشور ایران مانند زلزله اخیر، در شهرستان کرمانشاه که در ۲۱ آبان ماه سال ۱۳۹۶ رخ داد نشان داد که، عمده‌ترین آسیب‌های وارده در مناطق زلزله‌زده خرابی میان‌قاب‌ها به عنوان یک جز غیرسازه‌ای در ساختمان‌ها می‌باشد. این میان‌قاب‌ها برای جداسازی فضای داخلی ساختمان به‌عنوان تیغه یا جداگر به کار برده می‌شود، این دیوار سهمی در تحمل بارهای قائم ندارد و صرفاً می‌بایست بار جانبی ناشی از وزن خود را تحمل نمایند. بطور کلی بیشترین آسیب‌های وارده به ساختمان‌ها در منطقه بازدید شده در زلزله کرمانشاه، بر میان‌قاب‌ها و اجزای غیرسازه‌ای است که بخاطر عدم اجرای وال پست و نبود مهار اجزای غیرسازه‌ای به قاب خمشی است. در شکل (۳) تخریب میان‌قاب به دلیل عدم اجرای مناسب مشاهده می‌شود.



شکل ۳: عدم مهار مناسب میان‌قاب‌ها و اجزای غیرسازه‌ای و آسیب‌های آن در زلزله ۲۱ آبان ماه کرمانشاه ۱۳۹۶

هدف از این مقاله بررسی مدل‌های موجود، برای پیش‌بینی رفتار خارج از صفحه میان‌قاب‌ها است. در این مقاله مسیر تحولی روش‌های مدل‌سازی رفتار خارج از صفحه میان‌قاب، از مدل‌های مبتنی بر خمش، تا مدل‌هایی که بر مبنای نظریه عملکرد قوسی میان‌قاب

هستند، ارائه شده است. نتایج حاصل از مدل‌های تحلیلی مختلف با کارهای آزمایشگاهی گذشته و مدل‌های آیین‌نامه‌ای مقایسه و درصد خطای هر یک از مدل‌ها محاسبه شده است.

## ۲- مدل‌های پیش‌بینی ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب‌های بنایی

### ۲-۱- مدل‌های مبتنی بر عملکرد خمشی<sup>۶</sup> میان‌قاب در خارج از صفحه

در مدل‌های مبتنی بر عملکرد خمشی، ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب به وسیله حداکثر فشار جانبی یکنواخت عمود بر صفحه، که باعث فروپاشی میان‌قاب می‌گردد، محاسبه می‌شود. اکثر فرمول‌های تحلیلی که در ادبیات فنی برای این مدل مطرح شده است، بر اساس عملکرد خمشی است، که ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب را تعیین می‌کنند. نظریه *Timoshenko* [۱۰] برای تعیین حداکثر فشار جانبی عمود ( $q_u$ ) بر صفحه میان‌قاب، اولین راه‌حلی بود که توسط محققین ارائه شد. فرضیاتی که نظریه *Timoshenko* بر آن استوار است، عبارتند از: ۱- مصالح الاستیک و خطی هستند. ۲- مصالح همگن و هموزن و ایزوتروپ هستند. که با این فرضیات اگر ( $f_t$ ) مقاومت کششی مصالح بنایی باشد، حداکثر فشار جانبی خارجی عمود بر صفحه میان‌قاب را، می‌توان بر اساس رابطه (۱) تعیین کرد:

$$q_u = \frac{f_t}{6\beta_1\left(\frac{h}{l}\right)^2} \quad (1)$$

$f_t$ : مقاومت کششی که به صورت خطی و ایزوتروپیک، یکنواخت است.

$\beta_1$ : این ضریب به نسبت ابعاد میان‌قاب و شرایط مرزی میان‌قاب بستگی دارد.

با توجه به اینکه رفتار واقعی میان‌قاب، حتی در مراحل اولیه بارگذاری خارج از صفحه میان‌قاب یک رفتار غیرخطی شدید می‌باشد. بر اساس رابطه (۱) که *Timoshenko* با فرض الاستیک خطی مصالح ارائه داده است، که سختی و مقاومت دیوار دست بالا برآورد می‌شود. محققین دیگری از جمله *Hendry* و *Haseltine* [۱۱-۱۵] روش‌های دیگری را بر مبنای تئوری خطوط گسیختگی و عملکرد قوسی دو جهته مشابه دال‌های دوطرفه پیشنهاد دادند، که از میان این محققین، *Haseltine* [۱۳، ۱۴] روشی را پیشنهاد داد، که حداکثر بار خارج از صفحه میان‌قاب را، بر مبنای مقاومت خمشی عمود بر درز ملات محاسبه می‌کند. *Haseltine* رابطه (۲) را برای مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب ارائه کرد:

$$q_u = \frac{f_{kx}}{6a\left(\frac{h}{l}\right)^2} \quad (2)$$

$f_{kx}$ : مقاومت خمشی عمود بر درز ملات است.

a: ضریب خمشی بر اساس شکل میان‌قاب است. (برای آزمایش *Haseltine*: a=0.081 بود.)

*Hendry* و همکاران [۱۱، ۱۲] برای ارزیابی مقاومت خمشی خارج از صفحه میان‌قاب یک واحد طول یا یک نوار یک متری از صفحه میان‌قاب را در نظر گرفتند، و رابطه (۳) را برای مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب ارائه دادند:

$$q_u = \frac{8\sigma_0}{\left(\frac{h}{l}\right)^2} \quad (3)$$

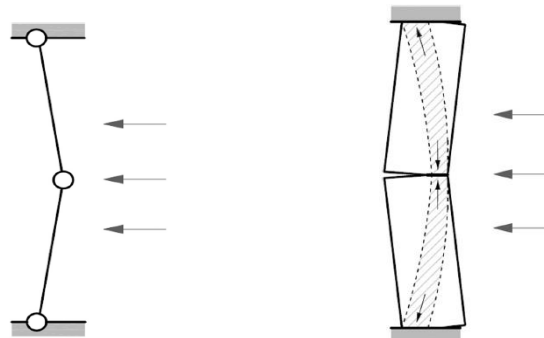
در این رابطه،  $\sigma_0$ : مقاومت خارج از صفحه است، که به صورت فشاری بر روی صفحه عمل می‌کند.

<sup>6</sup> Flexural Action

محدودیت واقعی که در سه مدل اشاره شده فوق وجود دارد، این مسئله است که در هر سه مدل، برای محاسبه ظرفیت خارج از صفحه میان قاب، صرفاً رفتار خمشی است که رفتار میان قاب را کنترل می کند. بر اساس این تئوری، محدودیت های کششی مرتبط با مقاومت کششی و یا مقاومت کششی ناشی از خمش، مبنای مدل های فوق در برآورد ظرفیت خارج از صفحه میان قاب قرار گرفته است. با این حال، نتایج آزمایشگاهی نشان داده است که، مکانیزم مقاومتی غالب در خارج از صفحه میان قاب، ناشی از عملکرد قوسی میان قاب می باشد. در واقع مکانیزم عملکرد قوسی یک مسیر جدید انتقال بار را برای باربری در خارج از صفحه میان قاب، بین قاب ترک خورده و میان قاب ترک خورده، تعیین می کند. بنابراین نیاز به ارائه فرمولاسیون های جدید، برای مدل تحلیلی بر مبنای عملکرد قوسی داریم. در بخش بعد، مدل های مبتنی بر عملکرد قوسی ارائه شده است.

## ۲-۲- مدل های مبتنی بر عملکرد قوسی<sup>۷</sup> میان قاب در خارج از صفحه

مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیلی محققین گذشته نشان می دهد، که عملکرد قوسی میان قاب بعد از ترک خوردگی میان قاب در خارج از صفحه می تواند یک مسیر نیروی جایگزین برای تحمل تقاضاهای نیرویی و جابه جایی خارج از صفحه میان قاب باشد. به این ترتیب که بعد از ظهور اولین ترک در میانه ارتفاع میان قاب، میان قاب به صورت یک جسم صلب در حول انتهای تکیه گاهی خود دوران کرده و نیروهای خارج از صفحه میان قاب توسط یک میدان فشاری همان طور که در شکل (۴) نشان داده است، به تکیه گاه های خود که در واقع قاب ها هستند، منتقل می شود. عملکرد قوسی میان قاب در خارج از صفحه را می توان توسط مدل محاسباتی و ایده آل شده به صورت یک قوس سه مفصله همان طور که در شکل (۴ب) نشان داده شده است، بیان کرد. بر اساس مدل عملکرد قوسی میان قاب، گسیختگی در خارج از صفحه میان قاب بر اساس یکی از دو حالت که: خردشدگی<sup>۸</sup> مصالح بنایی و ایجاد فاصله ای<sup>۹</sup> بین قاب و میان قاب است، اتفاق می افتد.



ب) شمایی از سه نقطه ایده آل برای مکانیزم عملکرد قوسی

الف) شکل گیری قوس در عملکرد خارج از صفحه میان قاب

شکل ۴: مکانیزم عملکرد قوسی میان قاب در خارج از صفحه

اولین مطالعاتی که عملکرد قوسی میان قاب در خارج از صفحه را به صورت رفتار یک جهت در یک نوار میان قابی و تکیه گاه صلب در نظر گرفتند، توسط McDowell و همکاران [۱۶، ۱۷] انجام شد. دو قسمت دیوار به اندازه ای می توانند دوران بکنند، که قاب یا میان قابها به مرز گسیختگی و انهدام برسد. بر مبنای این تئوری ظرفیت نهایی میان قاب در خارج از صفحه توسط McDowell و همکاران به صورت رابطه (۴) ارائه شده است:

$$q_u = \frac{\gamma f'_m}{2 \left(\frac{h}{t}\right)^2} \quad (4)$$

در این رابطه ضریب  $(\gamma)$  به ضخامت و نسبت ارتفاع به ضخامت میان قاب  $(h/t)$  بستگی دارد. برای نسبت ارتفاع به ضخامت میان قاب  $(h/t)$  برابر ۱۰، ضریب  $(\gamma)$  حدوداً برابر با ۱ است. رابطه ای را که McDowell ارائه داده است به لحاظ شکل کلی، مشابه رابطه هایی

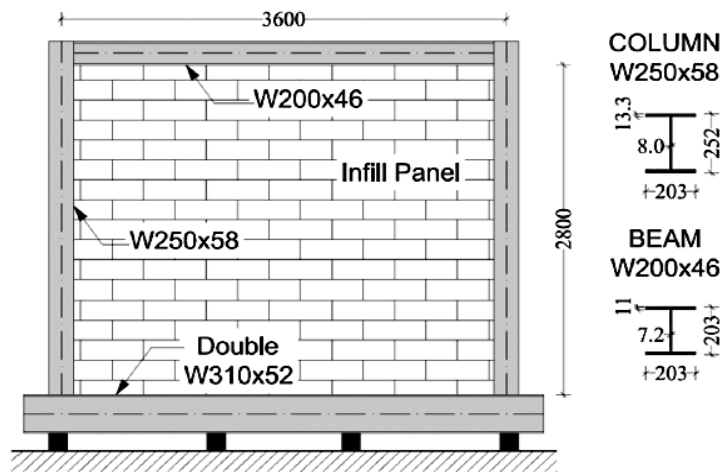
<sup>7</sup> Arc Action

<sup>8</sup> Crushing

<sup>9</sup> Gap

است که بر اساس تئوری مبتنی بر خمش بیان شده است. اگرچه که در رابطه عملکرد قوسی میان قاب، مقاومت فشاری مصالح بنایی ( $f'_m$ ) برای اولین بار جایگزین ( $f_t$ ) مقاومت کششی مصالح بنایی میان قاب شده است.

تئوری‌های مختلفی بر مبنای عملکرد قوسی میان قاب در خارج از صفحه محققین ارائه شده است. با در نظر گرفتن تئوری عملکرد قوسی در رفتار خارج از صفحه میان قاب‌ها، مطالعات دیگری بر اساس نظریه [18] Thomas انجام شد، که تأیید کرد پس از ترک خوردگی، مقاومت افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند؛ اما این نکته را هم اشاره کردند که شرایط مرزی قاب پیرامونی، نقش اساسی در ظرفیت خارج از صفحه میان قاب دارد. مدل‌های قبلی، عمدتاً بر مبنای عملکرد یک جهته خمشی بودند. اما رفتار واقعی میان قاب، مبتنی بر عملکرد قوسی در دو راستای طولی و عرضی میان قاب در خارج از صفحه می‌باشد. Colville و همکاران [19]، Seah و همکاران [20] یک تئوری مقاومتی را توسعه دادند، که بر مبنای کار مجازی بود. که در آن عملکرد قوسی دوطرفه در میان قاب لحاظ شده بود. در مطالعه Seah و همکاران تأثیر انعطاف پذیری تکیه‌گاه‌ها نیز وارد محاسبات شد. فرمول‌بندی محاسباتی آنها، بعد از یک برنامه آزمایشگاهی جامع، بر روی قاب‌های فولادی، که پر شده بودند به وسیله بلوکهای بتنی توخالی، که در شکل (5) نشان داده شده است، ارائه شد.



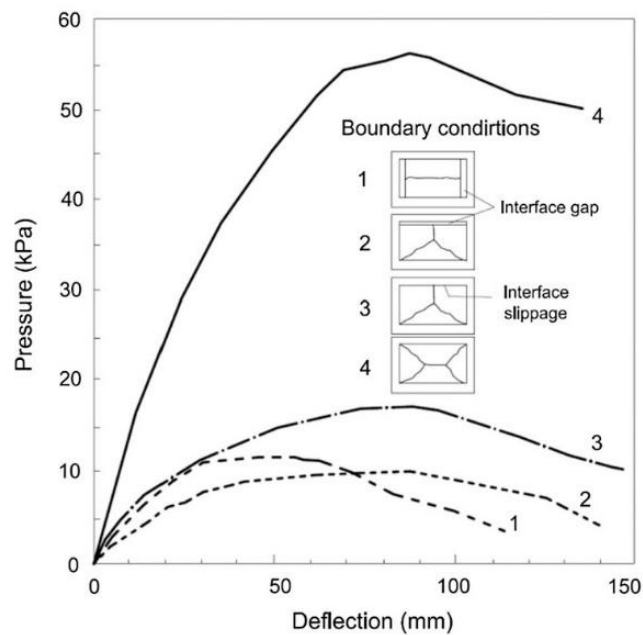
شکل ۵: جزئیات نمونه آزمایشگاهی Seah و همکاران [20]

به منظور مطالعه مکانیزم‌های مختلف گسیختگی، این محققین در کار آزمایشگاهی خود شرایط زیر را در نظر گرفتند:

۱- اتصال کامل بین قاب و میان قاب برقرار باشد. ۲- فاصله بین قاب و میان قاب در دو جهت قائم یا افقی باشد. ۳- حضور صفحه لغزشی<sup>۱۰</sup> در جهت افقی باشد. نیروهای اینرسی زلزله به وسیله اعمال یک فشار خارج از صفحه یکنواخت توسط کیسه هوا شبیه‌سازی شده بود. برای مدل تحلیلی، میان قاب را به نوارهای افقی و قائم تقسیم کردند. با این کار مدهای مختلف گسیختگی را می‌توانند مشاهده کنند. مد گسیختگی که کمترین ظرفیت خارج از صفحه میان قاب را ارائه می‌دهد، به عنوان مد حاکم، در نظر گرفته می‌شود. نتایج کار آزمایشگاهی در شکل (۶) نشان می‌دهد که شرایط مرزی، بر نتایج آزمایشگاهی تأثیر قابل توجهی دارد.

همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، میان قاب کاملاً مقید، ظرفیت باربری آن در خارج از صفحه چهار تا پنج برابر بیشتر است، نسبت به میان قابی که دارای فاصله بوده از قاب پیرامونی، یا یک صفحه لغزش در مرز بین قاب و میان قاب قرار گرفته است.

<sup>10</sup> Slip Page



شکل ۶: تأثیر شرایط مرزی بر پاسخ رفتار خارج از صفحه میان قاب در مدل آزمایشگاهی Seah و همکاران [۲۰]  
Seah و همکاران [۲۰] یک رابطه تجربی بر اساس بار نهایی نتایج کارهای آزمایشگاهی، به صورت زیر ارائه کردند:

$$q_u = 4.5 (f'_m)^{0.75} t^2 \frac{\alpha}{l^{2.5}} \quad (۵) \quad \text{از سه جهت میان قاب با قاب متصل است:}$$

$$q_u = 4.5 (f'_m)^{0.75} t^2 \left( \frac{\alpha}{l^{2.5}} + \frac{\beta}{h^{2.5}} \right) \quad (۶) \quad \text{از چهار جهت میان قاب با قاب متصل است:}$$

$$\alpha = \frac{1}{h} (EI_c h^2 + GJ_c t h)^{0.25} \ll 50 \quad (۷)$$

$$\beta = \frac{1}{l} (EI_b l^2 + GJ_b t l)^{0.25} \ll 50 \quad (۸)$$

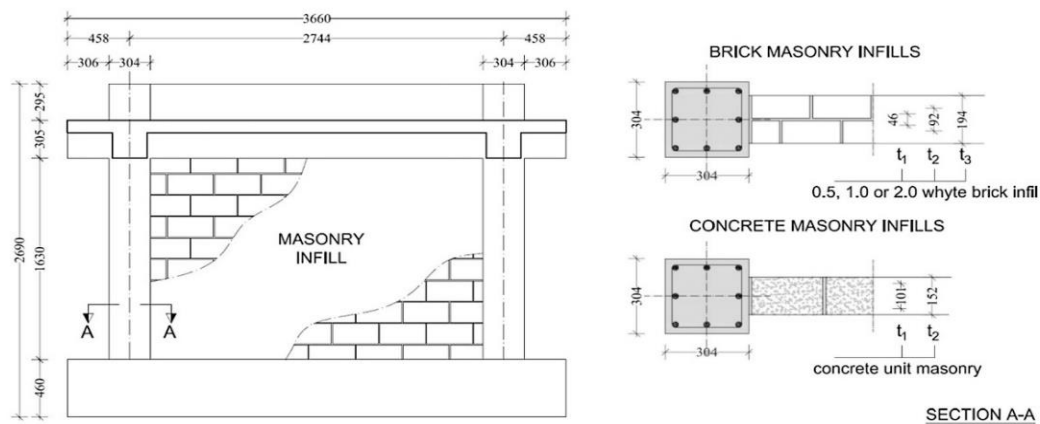
در این روابط: بار نهایی ( $q_u$ ) بر حسب کیلوپاسکال بیان می‌شود. در حالی که  $L$  طول میان قاب بر حسب میلیمتر و  $h$  ارتفاع میان قاب بر حسب میلیمتر و  $E$  مدول یانگ و  $G$  مدول برشی است.  $I_b$  و  $I_c$  لنگرهای ستون و تیرهای داخلی هستند.  $J_b$  و  $J_c$  به ترتیب ثابت‌های پیچشی ستون‌ها و تیرها هستند. بار نهایی بستگی به انعطاف‌پذیری قاب دارد، که توسط ضرایب  $\alpha$  و  $\beta$  (عمدتاً مربوط به قاب‌های فولادی هستند) معرفی می‌شود و به طور درجه دو با ضخامت میان قاب افزایش می‌یابد.

کار تحلیلی و آزمایشگاهی جامعی توسط Angel و همکاران [۲۱] در زمینه رفتار میان قاب‌ها انجام شد. این محققین، ۸ تا قاب بتن مسلح تمام مقیاس را که توسط دو نوع میان قاب آجری و بتنی پر شده بودند را، آزمایش کردند. در این آزمایش، یک خسارت کنترل شده در داخل صفحه به میان قاب‌ها اعمال شد، تا شرایط ترک خوردگی داخل صفحه ایجاد شود. سپس بارگذاری خارج از صفحه توسط یک کیسه هوا انجام شد. در انتهای آزمایش نمونه‌های خسارت دیده، با استفاده از پلاسترهای سیمانی<sup>۱۱</sup> و مقداری فایبرهای<sup>۱۲</sup> مش و پیچ‌های فولادی تعمیر شدند، و نمونه‌ها را به منظور تأثیر فایبرمش‌ها دوباره آزمایش کردند. آرایش نمونه‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. نتایج بار-تغییر مکان رفتار خارج از صفحه میان قاب، آزمایش‌های Angel و همکاران در شکل (۸) گزارش شده است.

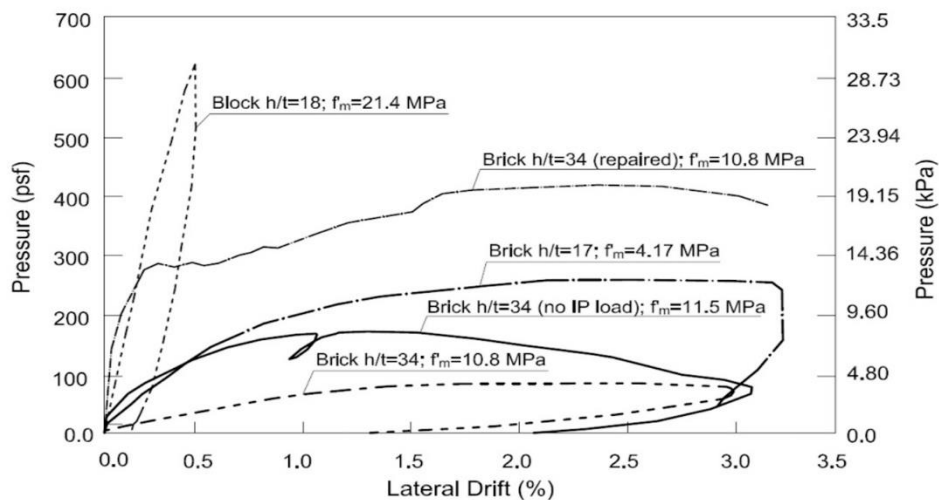
<sup>11</sup> Plaster Cement

<sup>12</sup> Fiber Section





شکل ۷: جزئیات طراحی نمونه‌های آزمایشگاهی Angel و همکاران [۲۱]



شکل ۸: نتایج آزمایشگاهی رفتار بار-تغییر مکان خارج از صفحه میان قاب Angel و همکاران [۲۱]

نتایج آزمایشگاهی Angel و همکاران [۲۱] نشان می‌دهد، که میان قاب‌هایی که به طور کامل در تمام لبه‌ها مهار شده‌اند، شمای گسیختگی یا ترک خوردگی آن‌ها، مشابه شکل گسیختگی یک دال دو طرفه است. برای میان قاب‌هایی که نسبت ارتفاع به ضخامت میان قاب ( $h/t$ ) بزرگی دارند، عملکرد قوسی در نتایج آزمایشگاهی کاهش پیدا می‌کند. اگرچه نقش مقاومتی در میان قاب‌ها حاکم است، خسارت در داخل صفحه میان قاب، مقاومت در خارج از صفحه میان قاب را کاهش می‌دهد. مقدار ظرفیت خارج از صفحه میان قاب، وابسته است به مقدار خسارتی که قبلاً نمونه در داخل صفحه تجربه کرده است. نتایج نشان می‌دهد، که ظرفیت نهایی نمونه‌های تعمیر شده با ضریب برابر پنج افزایش پیدا می‌کند. و این افزایش مقاومت، به خسارت‌های تجمعی وابسته نیست.

Angel و همکاران [۲۱] بعد از کار آزمایشگاهی خود، یک مدلی بر مبنای تئوری قوسی توسعه دادند، که یک نوار میان قاب بین دو تا مهاربند تکیه‌گاهی صلب قرار گرفته است، که مد گسیختگی در این روش به صورت زیر تعریف می‌شوند: اولین گسیختگی مصالح بنایی که به دلیل عملکرد قوسی اتفاق می‌افتد، و فشار در نمونه‌هایی است که نسبت ارتفاع به ضخامت میان قاب ( $h/t$ ) کمی دارند. دومین گسیختگی بر اثر یک ضربه محکم و ناگهانی است، یا اینکه نسبت ارتفاع به ضخامت میان قاب ( $h/t$ ) بحرانی، دو تا گسیختگی را از هم جدا می‌کند. مقاومت خارج از صفحه میان قاب بر اساس رابطه (۹) محاسبه می‌شود:

$$q_u = 2 \frac{f'_m}{\left(\frac{h}{t}\right)} R_1 R_2 \lambda \quad (9)$$

در این رابطه ضرایب  $R_1$  و  $R_2$  و  $\lambda$ ، به ترتیب، برای لحاظ کردن اثر بارگذاری قبلی در داخل صفحه، انعطاف پذیری و شرایط مرزی و نسبت ارتفاع به ضخامت میان قاب، تعریف می شود و بر اساس این، رابطه های (۱۰)، (۱۱)، (۱۲) زیر محاسبه می شوند:

$$R_1 = (1.08 + \left(\frac{h}{t}\right)^2) \left\{ -0.015 + \left(\frac{h}{t}\right)^2 \left[ -0.00049 + 0.000013 \left(\frac{h}{t}\right)^2 \right] \right\}^{\frac{4}{24\sigma}} \quad (10)$$

$$R_2 = 0.357 + 2.49 * 10^{-14} EI \leq 1.0 \quad (11)$$

$$\lambda = 0.154 e^{-0.0985 \left(\frac{h}{t}\right)} \quad (12)$$

در روابط فوق :

$\Delta$ : حداکثر جابه جایی داخل صفحه میان قاب است.  $\Delta_{cr}$ : جابه جایی متناظر با ترک خوردگی است.  
EI: سختی خمشی کوچکترین عضو تشکیل دهنده قاب پیرامونی میان قاب است.

رابطه (۹) که توسط *Angel* و همکاران ارائه شد، توسط استانداردهای *FEMA 356* [۲۲] و نشریه ۳۶۰ [۲۳] مورد استفاده قرار گرفته است. یک رابطه دیگر که عملکرد قوسی را پیشنهاد می دهد، توسط *Bashandy* و همکاران [۲۴]، *Klingner* و همکاران [۲۵] ارائه شده است. و این رابطه، توسط *Cohen* و همکاران [۲۶] توسعه داده شد. و رابطه زیر را برای ارزیابی ظرفیت نهایی خارج از صفحه میان قاب پیشنهاد دادند:

$$q_u = \frac{8}{h^2 t} \left\{ M_{yv} [(l-h) + h \cdot \ln(2)] + M_{yh} \left( \frac{M_{yv}}{x_{yh}} \right) \ln \left( \frac{l}{l-\frac{h}{2}} \right) l \right\} \quad (13)$$

در این رابطه  $M_{yh}$  و  $M_{yv}$  لنگرهای نوار یک متری در راستاهای  $y$  و  $x$  بر حسب N.mm/mm می باشد که، از فرمول های (۱۴) و (۱۵) محاسبه می شوند:

$$M_{yv} = \frac{0.85 f'_m}{4} (t - x_{yv})^2 \quad (14)$$

$$M_{yh} = \frac{0.85 f'_m}{4} (t - x_{yh})^2 \quad (15)$$

و در این رابطه  $x_{yh}$  و  $x_{yv}$  جابجایی نهایی خارج از صفحه میان قاب بر حسب میلی متر است که از رابطه های (۱۶) و (۱۷) به دست می آید:

$$x_{yv} = \frac{t f'_m}{1000 E_m \left[ 1 - \frac{h}{2 \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + t^2}} \right]} \quad (16)$$

$$x_{yh} = \frac{t f'_m}{1000 E_m \left[ 1 - \frac{l}{2 \sqrt{\left(\frac{h}{2}\right)^2 + t^2}} \right]} \quad (17)$$

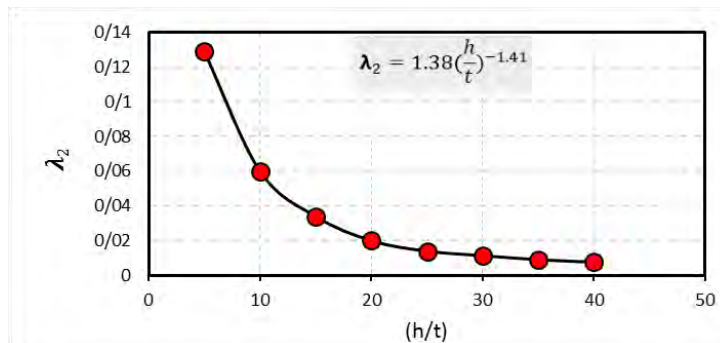
( $E_m$ ) مدول الاستیسیته مصالح بیان شده بر حسب مگاپاسکال است. آیین نامه *FEMA356* و نشریه ۳۶۰ از یک فرمول ساده تر و کاربردی تر از معادله (۹) برای ارزیابی مقاومت خارج از صفحه میان قاب استفاده کرده اند. در آیین نامه *FEMA356* اشاره شده است، که اگر عملکرد قوسی میان قاب در خارج از صفحه در نظر گرفته شود، حد پایین مقاومت میان قاب در خارج صفحه را می توان به صورت رابطه (۱۸) تعیین کرد:

$$q_u = \frac{0.7 f'_m \lambda}{\left(\frac{h}{t}\right)} \quad (18)$$

در اینجا  $\lambda_2$  به نسبت ارتفاع به ضخامت میان قاب ( $h/t$ ) بستگی دارد که در جدول (۱) مقادیر  $\lambda_2$  گزارش شده است. دیاگرام تغییرات مقادیر  $\lambda_2$  به ازای مقادیر مختلف نسبت ارتفاع به ضخامت میان قاب ( $h/t$ ) در شکل (۹) نشان داده شده است.

جدول ۱: مقادیر  $\lambda_2$  به نسبت ثابت ارتفاع به ضخامت میان قاب ( $h/t$ ) بستگی دارد [۲۳، ۲۲].

$\frac{h}{t}$	۵	۱۰	۱۵	۲۰
$\lambda_2$	۰/۲۹	۰/۶۰	۰/۳۴	۰/۱۳

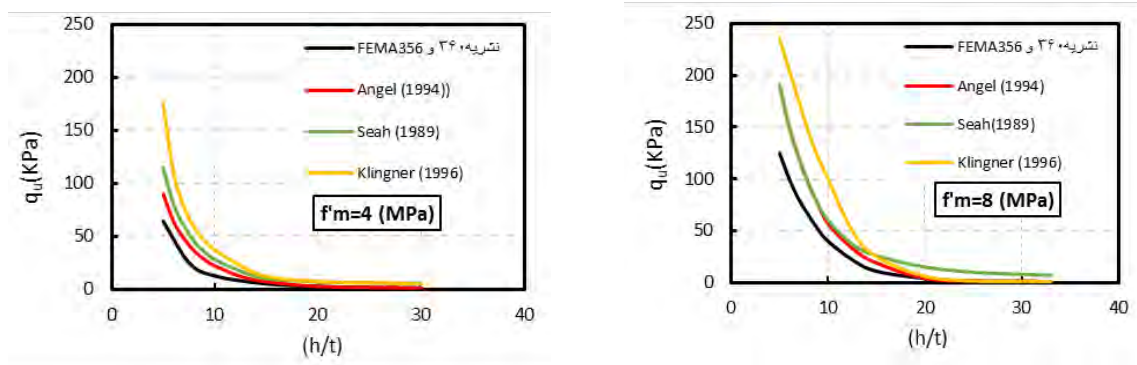


شکل ۹: منحنی مقادیر  $\lambda_2$  نسبت به ارتفاع به ضخامت میان قاب ( $h/t$ ) در آیین نامه FEMA 356 و نشریه ۳۶۰ [۲۳، ۲۲]

بر اساس نتایج آزمایشگاهی، عملکرد قوسی میان قاب را تنها می توان برای میان قاب هایی که در تماس کامل با قاب اطرافشان هستند، در نظر گرفت. اجزای قاب بایستی دارای سختی و مقاومت کافی باشند، که از حرکت تکیه گاه میان قاب ها در خارج از صفحه جلوگیری کنند. و همچنین نسبت ارتفاع به ضخامت میان قاب ( $h/t$ ) را کمتر یا برابر ۲۵ در نظر گرفته می شود، اگر امکان استفاده از عملکرد قوسی میان قاب در خارج از صفحه براساس شرایط فوق نباشد، مقاومت خارج از صفحه میان قاب براساس مقاومت کششی-خمشی میان قاب تعیین می شود. آیین نامه FEMA 356 و نشریه ۳۶۰ رابطه (۱۹) را برای میزان تغییر مکان وسط میان قاب، عمود بر صفحه میان قاب در خارج از صفحه، که به ارتفاع میان قاب نرمال شده است را پیشنهاد داده است:

$$\frac{\Delta_{inf}}{h} = \frac{0.002 \left(\frac{h}{t}\right)}{1 + \sqrt{1 - 0.002 \left(\frac{h}{t}\right)^2}} \quad (19)$$

در شکل (۱۰) مقایسه ظرفیت بارنهایی میان قاب خارج از صفحه بر حسب نسبت ارتفاع به ضخامت میان قاب ( $h/t$ ) بر مبنای مدل های Angel و همکاران [۲۱]، Seah و همکاران [۲۰]، Klingner و همکاران [۲۵] و FEMA 356 [۲۲] و نشریه ۳۶۰ [۲۳] برای دو مقدار مختلف از مقاومت فشاری ( $f_m$ ) ارائه شده است.



شکل ۱۰: مقایسه ظرفیت خارج از صفحه میان قاب با نسبت ارتفاع به ضخامت میان قاب ( $h/t$ ) برای مدل های مختلف

در این مقایسه هندسه میان قاب و قاب، مشابه مدل های *Angel* و همکاران [۲۱] در نظر گرفته شده است (شکل ۷). مدول الاستیسیته بتن و مصالح بنایی (میان قاب) به ترتیب برابر با ۲۵۰۰۰ و ۴۰۰۰ مگاپاسکال لحاظ شده است. برای همه ی مدل های تحلیل شده، مقاومت خارج از صفحه میان قاب با افزایش نسبت ارتفاع به ضخامت میان قاب ( $h/t$ ) یا لاغری میان قاب به شدت کاهش پیدا می کند. مدل *FEMA356* و نشریه ۳۶۰ پیش بینی محافظه کارانه ای از ظرفیت خارج از صفحه میان قاب را نسبت به سایر مدل ها ارائه می دهد. مدل های *Angel* و همکاران، *Seah* و همکاران نتایج مشابهی را برای نسبت ارتفاع به ضخامت میان قاب ( $h/t$ ) بالای ۱۵ داشته اند، و از این نقطه به بعد در مقایسه با مدل *Klingner* و همکاران غیر محافظه کارانه بوده است. خصوصیات هندسی و مکانیکی نمونه های استفاده شده برای مقایسه ظرفیت خارج از صفحه میان قاب در جدول (۲) ارائه شده است. نتایج مقایسه مدل های مختلف در جدول (۳) گزارش شده و شکل گرافیکی این مقایسه در شکل (۱۱ الف) نشان داده شده است.

جدول ۲: خصوصیات هندسی و مکانیکی نمونه های استفاده شده برای مقایسه ظرفیت خارج از صفحه میان قاب

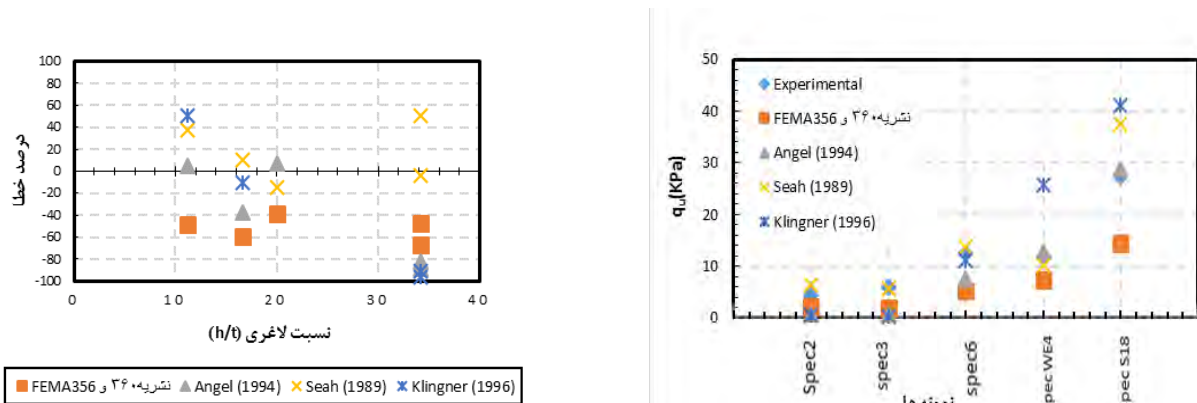
نمونه	نوع میان قاب	نوع قاب	نوع آزمایش بارگذاری	L (mm)	h (mm)	$E_m$ (MPa)	$f_m$ (MPa)	(h/t)	t (mm)
نمونه [۲۱]۲	آجر	بتن مسلح	خارج از صفحه: پوش آور داخل صفحه: چرخه ای	۲۴۴۰	۱۶۳۰	۸۰۴۰	۱۱/۵	۳۴/۲	۴۷/۶
نمونه [۲۱]۳	آجر	بتن مسلح	خارج از صفحه: پوش آور داخل صفحه: چرخه ای	۲۴۴۰	۱۶۳۰	۵۲۰۸	۱۰/۱۳	۳۴/۲	۴۷/۶
نمونه [۲۱]۶	آجر	بتن مسلح	خارج از صفحه: پوش آور داخل صفحه: چرخه ای	۲۴۴۰	۱۶۳۰	۲۱۶۳	۴/۶	۱۶/۶	۹۸/۴
نمونه [۲۰]WE4	بتن	فولاد	خارج از صفحه: پوش آور داخل صفحه: ندارد	۳۶۰۰	۲۸۰۰	۲۸۰۰	۱۴/۱	۲۰	۱۴۰
نمونه [۲۷]S18	آجر گلی	فولاد	خارج از صفحه: پوش آور داخل صفحه: ندارد	۲۲۴۰	۲۲۴۰	۵۰۰۰	۵	۱۱/۲	۲۰۰

جدول ۳: نتایج مقایسه مدل های تجربی و تحلیلی و درصد خطای آنها

نمونه	FEMA356 و نشریه ۳۶۰ [۲۲, ۲۳]			Angel و همکاران [۲۱]		Seah و همکاران [۲۰]		Klingner و همکاران [۲۵]	
	$q_u$ [kPa]	$q_u$ [kPa]	خطا [%]	$q_u$ [kPa]	خطا [%]	$q_u$ [kPa]	خطا [%]	$q_u$ [kPa]	خطا [%]
نمونه [۲۱]۲	۴/۲	۲/۲۳	-۴۷٪	۰/۷۵	-۸۲٪	۶/۳۴	۵۱٪	۰/۳۷	-۹۱٪
نمونه [۲۱]۳	۵/۹۸	۱/۹۶	-۶۷٪	۰/۶۶	-۸۹٪	۵/۷۶	-۴٪	۰/۲۴	-۹۶٪
نمونه [۲۱]۶	۱۲/۴	۵/۱۲	-۵۹٪	۷/۶۵	-۳۸٪	۱۳/۶۶	۱۰٪	۱۱/۱۴	-۱۰٪
نمونه [۲۰]WE4	۱۱/۹	۷/۲۱	-۳۹٪	۱۲/۷۲	۷٪	۱۰/۱۱	-۱۵٪	۲۵/۷۴	۱۱۶٪
نمونه [۲۷]S18	۲۷/۴	۱۴/۳	-۴۸٪	۱۲/۸۳	۵٪	۳۷/۴۱	۳۷٪	۴۱/۱۵	۵۰٪

همانطور که انتظار می‌رود مدل FEMA356 و نشریه ۳۶۰ برای میان‌قاب‌هایی که لاغری کمی دارند، یک تخمین محافظه‌کارانه از ظرفیت باربری خارج از صفحه میان‌قاب ارائه می‌کند. همه‌ی مدل‌ها برای میان‌قاب‌های لاغر خطای پیش‌بینی زیادی دارند؛ این خطا احتمالاً ناشی از آن است که برای نسبت‌های ارتفاع به ضخامت میان‌قاب ( $h/t$ ) های بزرگ، عملکرد خمشی بر رفتار میان‌قاب حاکم می‌شود. همانطور که در شکل (۱۱) نشان داده شده است، هنگامی که نسبت ارتفاع به ضخامت میان‌قاب ( $h/t$ ) کاهش می‌یابد، درصد خطا کم می‌شود. برای نسبت لاغری بالای ۲۰ خطا معمولاً کمتر از ۵۰٪ نیست. مدل Angel و همکاران، Seah و همکاران نشان می‌دهند، که برای همه مقادیر نسبت ارتفاع به ضخامت میان‌قاب ( $h/t$ ) قابل اطمینان هستند. برای مدل Angel و همکاران دقت پیش‌بینی به امکان در نظر گرفتن خسارت‌های داخل صفحه میان‌قاب و انعطاف‌پذیری قاب وابسته است. مدل Seah و همکاران اثر سختی پیچشی را بر بار نهایی لحاظ می‌کنند، ولی ظرفیت پیش‌بینی شده خارج از صفحه میان‌قاب با استفاده از این مدل نشان می‌دهد که، مقدار ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب برای خسارت‌های قابل توجه‌ای که دارند، کمتر است.

### ۳- اندرکنش داخل و خارج از صفحه میان‌قاب

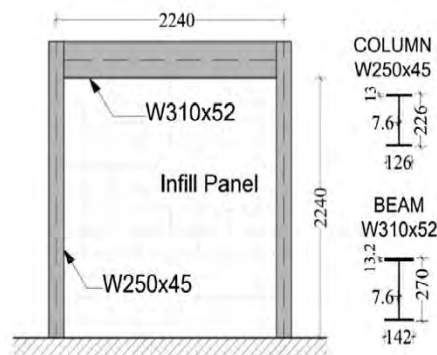


ب) مقایسه درصد خطای نمونه‌های تحلیلی

الف) مقایسه بار نهایی نمونه آزمایشگاهی با نمونه‌های تحلیلی

شکل ۱۱: مقایسه نتایج تجربی و پیش‌بینی‌های تحلیلی با استفاده از مدل‌های مختلف

Komaraneni و همکاران [۲۸] در یک کار آزمایشگاهی به بررسی تأثیر اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب‌های بنایی پرداختند. در این مطالعه، یک قاب فولادی با میان‌قابی از جنس آجرهای گلی که ضخامت آن بین ۱۰۰ تا ۳۳۰ میلی‌متر بود، مورد بررسی قرار گرفت. شکل میان‌قاب در شکل (۱۲) نشان داده است.

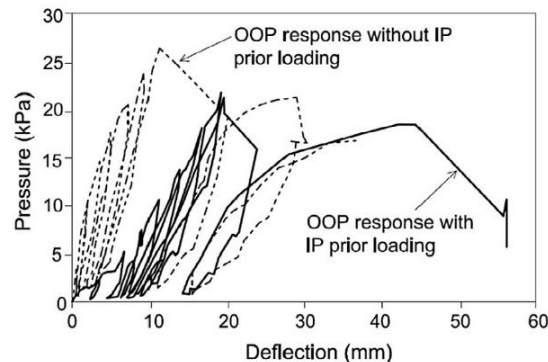


شکل ۱۲: جزئیات قاب و میان‌قاب در مدل آزمایشگاهی Komaraneni و همکاران [۲۸]، جزئیات نمونه بر حسب میلی‌متر

Komaraneni و همکاران [۲۸] برای تست میان‌قاب‌های مورد مطالعه سه نوع مختلف از پروتکل بارگذاری آزمایش را ارائه دادند:

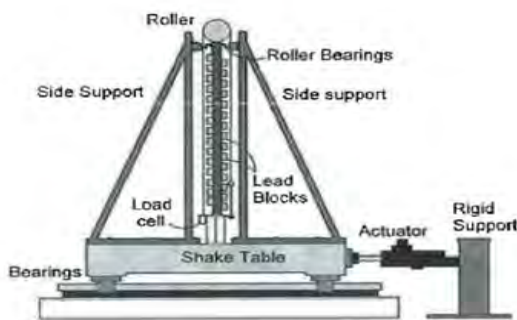
- ۱- بارگذاری خارج از صفحه میان قاب بعد از بارگذاری داخل صفحه میان قاب.
- ۲- بارگذاری داخل صفحه میان قاب بعد از بارگذاری خارج از صفحه میان قاب.
- ۳- ترکیب بارگذاری همزمان خارج از صفحه و داخل صفحه میان قاب.

بر اساس نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، برای همه نمونه‌ها تحت سه بارگذاری فوق پایداری قابل توجهی مشاهده می‌شود، حتی بعد از خسارت‌های زیادی که میان قاب در داخل صفحه تجربه می‌کند. همانطور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است، پاسخ خارج از صفحه میان قاب بعد از بارگذاری در داخل صفحه نشان می‌دهد که افت سختی میان قاب در خارج از صفحه به شدت افت مقاومت میان قاب در خارج از صفحه کاهش می‌یابد.

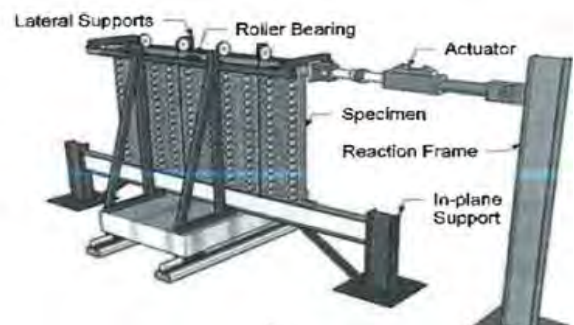


شکل ۱۳: مقایسه پاسخ خارج از صفحه میان قاب بدون بارگذاری در داخل صفحه میان قاب Komaraneni و همکاران [۲۸]

نتایج آزمایشگاهی بارگذاری در داخل از صفحه میان قاب بعد از بارگذاری شدید در خارج از صفحه میان قاب نشان می‌دهد که سختی داخل صفحه افت می‌کند، اما مقاومت داخل صفحه میان قاب افت چندانی را تجربه نمی‌کند. و اگر هم زمان نمونه‌ها هم در داخل صفحه و هم در خارج از صفحه بارگذاری شوند، میان قاب رفتار پایداری با ظرفیت خارج از صفحه کافی را از خود نشان می‌دهد. Komaraneni و همکاران سه قاب با مقیاس نیم که از آجرهای گلی پر شده‌اند، و دارای نسبت‌های ارتفاع به ضخامت میان قاب  $11(h/t)$  و  $22/7$  بودند، را در آزمایشات خود در نظر گرفتند. نمونه‌ها در بارگذاری داخل صفحه و خارج از صفحه میان قاب، آزمایش شدند. همانطور که در شکل (الف) و (ب) نشان داده شده است، بارهای داخل صفحه توسط جک هیدرولیکی اعمال می‌شود. آزمایش با حرکت میز لرزشی برای بارگذاری در خارج از صفحه میان قاب آغاز می‌شود، سپس یک بارگذاری چرخه‌ای شبه استاتیکی به نمونه اعمال می‌گردد. بارهای داخل صفحه میان قاب و خارج از صفحه میان قاب با یک پروتکل بارگذاری تا سطح گسیختگی ادامه پیدا می‌کند، (شکل ۱۵) ترک خوردگی میان قاب در جابه‌جایی ۱٪ تا گسیختگی کامل را نشان می‌دهد.

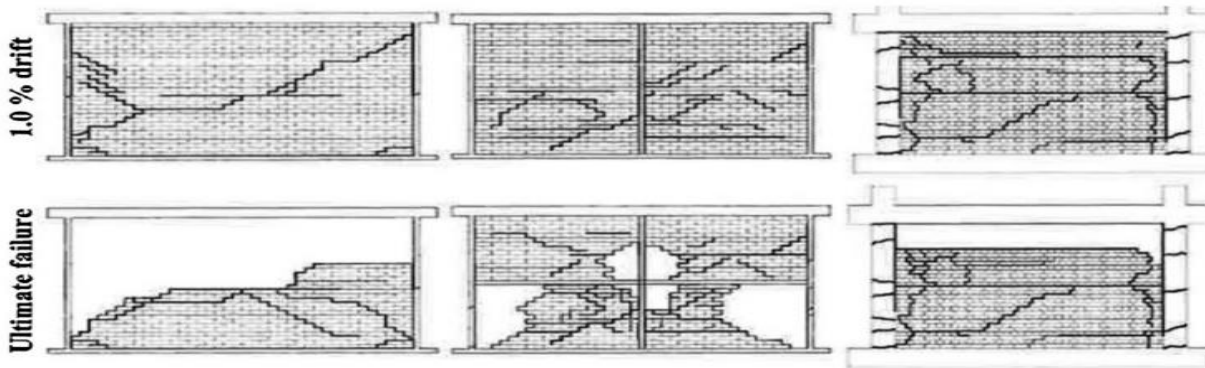


ب) اعمال بارگذاری در خارج از صفحه میان قاب



الف) اعمال بارگذاری در داخل صفحه میان قاب

شکل ۱۴: جزئیات نمونه‌های آزمایشگاهی Komaraneni و همکاران [۲۸]



شکل ۱۵: شمای ترک خوردگی در نمونه‌های komaraneni در جابه‌جایی ۱٪ [۲۸]

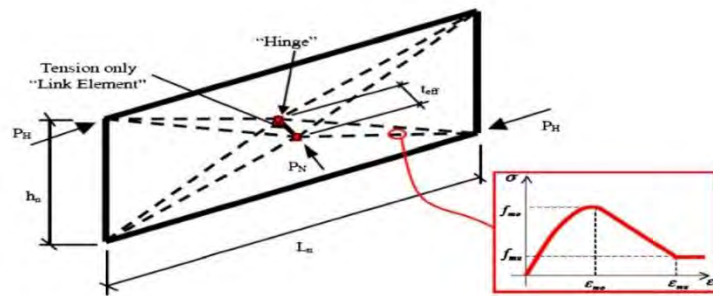
همان‌طور که نتایج محققین گذشته از جمله *Angel* و همکاران نشان داده بود، میان‌قاب با لاغری زیاد در برابر تقاضاهای خارج از صفحه، مقاومت باقی مانده قابل توجهی دارند. لازم به ذکر است، مقاومت خارج از صفحه میان‌قاب همان‌طور که در (شکل ۱۱) نشان داده شده است. عمدتاً توسط مدل‌های موجود *FEMA356* و نشریه ۳۶۰ محافظه کارانه محاسبه می‌شوند. از طرف دیگر نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که گسیختگی خارج از صفحه میان‌قاب، به دلیل ناپایداری ناشی از تغییر شکل‌های بزرگ در خارج از صفحه می‌باشد، نه به دلیل ظرفیت مقاومتی که میان‌قاب در خارج از صفحه دارد.

#### ۴- مدل‌های مبتنی بر دستک‌های فشاری و کششی (ماکرومدل) برای مدل‌سازی خارج از صفحه میان‌قاب

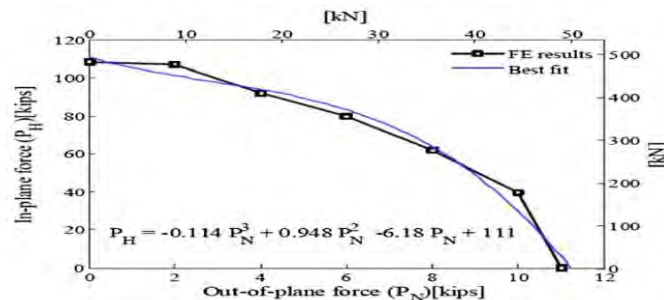
همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد، مدل‌های مکانیکی، تجربی و تحلیلی که برای پیش‌بینی ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب‌های بنایی ارائه شده است، کاربرد و قابلیت اطمینان محدودی دارند. عمده استفاده از این مدل‌ها در واقع به منظور بررسی و تعیین ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب‌ها می‌باشد. و با استفاده از این مدل‌ها، نمی‌توانیم یک مدل سازه میان‌قابی را به طور همزمان برای ارزیابی لرزه‌ای و شبیه‌سازی آنها در داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب استفاده کرد. اخیراً با گسترش کامپیوترهای پرسرعت و استفاده از تحلیل‌های تاریخچه زمانی می‌توان برای ارزیابی لرزه‌ای سازه‌ها به یک تعریف سه‌بعدی که اثرات اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب‌ها را در نظر می‌گیرد، پرداخت. احساس می‌شود هدف اصلی این مدل‌ها بروزسانی روش دستک فشاری معادل داخل صفحه می‌باشد، که بتواند این امکان را به کاربر به منظور شبیه‌سازی رفتار در داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب را بدهد.

یکی از روش‌های مناسب برای مدل‌سازی در میان‌قاب‌ها، استفاده از دستک‌های فشاری به صورت قطری در اعضا قاب می‌باشد، که شبیه‌سازی پاسخ داخل صفحه را ممکن می‌کند. مشکل اصلی این روش در مدل‌سازی میان‌قاب‌ها، در نظر نگرفتن اندرکنش رفتار همزمان در داخل و خارج از صفحه میان‌قاب‌ها می‌باشد. برای رفع این محدودیت‌ها *Mosalam & Hashemi* [۲۹، ۳۰] یک ماکرومدل سه بعدی دستک فشاری و کششی <sup>۱۳</sup>SAT پیشنهاد کردند. که در این مدل پیشنهادی عملکرد قوسی رفتار میان‌قاب در خارج از صفحه را، با انتقال گره میانه از هر دستک فشاری عمود بر صفحه میان‌قاب در نظر گرفتند. این مدل از هشت دستک فشاری که قانون تنش و کرنش مشخصی دارد، تشکیل شده است. گره وسط دهانه به وسیله یک اتصال صلب که فقط در کشش مقاومت می‌کند، وصل شده است. صحت‌سنجی و کالیبره کردن مدل بر اساس تعریف سطوح گسیختگی که نماینده خسارت‌ها در داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب‌ها است، در شکل (۱۶) نشان داده شده است.

<sup>13</sup>Sat And Tie



الف) شمایی از مدل



ب) اندرکنش داخل صفحه و خارج از صفحه میان قاب

شکل ۱۶: مدل ارائه شده توسط Mosalam & Hashemi [۲۹, ۳۰]

مدل دستک فشاری اصلاح شده را می‌توان برای مدل‌سازی رفتار میان‌قاب در داخل از صفحه و خارج از صفحه در مدل‌های سه بعدی سازه در نظر گرفت. وضعیت این مدل نسبت به مدل دستک فشاری متداول لحاظ کردن اثرات خارج از صفحه میان‌قاب در رفتار داخل صفحه میان‌قاب می‌باشد.

## ۵- نتیجه گیری

در این مقاله مقایسه‌ی انواع روش‌های مدل‌سازی میان‌قاب‌های مصالح بنایی در ارزیابی و محاسبه ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب ارائه شد. در این مقایسه مدل‌های اولیه مبتنی بر خمش تا مدل‌هایی که بر مبنای رفتار یک پارچه داخل صفحه و خارج از صفحه میان‌قاب‌ها هستند را شامل می‌شود. این مدل‌ها قادر هستند، همزمان عملکردهای قوسی و خسارت‌های رفت و برگشتی داخل و خارج از صفحه را لحاظ کنند. بر مبنای مقایسه‌ی مدل‌های موجود نتایج را به صورت زیر می‌توانیم خلاصه کنیم:

- قاب‌هایی که با میان‌قاب پر شده‌اند، ظرفیت نیرویی غیر قابل صرف نظر کردن برای مقاومت در خارج از صفحه و در داخل صفحه دارند.
- پاسخ خارج از صفحه میان‌قاب‌ها و بنایی وابستگی بیشتری به مقاومت فشاری مصالح در مقایسه با مقاومت کششی مصالح دارد.
- رفتار کلی میان‌قاب در خارج از صفحه توسط عملکرد و مکانیسم قوسی کنترل می‌شود، اما میزان تغییر شکل خارج از صفحه میان‌قاب به انعطاف‌پذیری قاب‌های مرزی آن وابسته است.
- میان‌قاب‌هایی که به وسیله قاب مقید شده‌اند، مشابه یک صفحه عمل می‌کند، که ظرفیت نهایی میان‌قاب توسط یک عملکرد قوسی در راستای X, Y محقق می‌شود.
- ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب با افزایش نسبت ارتفاع به ضخامت میان‌قاب (h/t) سریعاً کاهش پیدا می‌کند.
- روابط داده شده در FEMA356 و نشریه ۳۶۰ برای ظرفیت خارج از صفحه میان‌قاب‌های بنایی حاشیه ایمنی محافظه‌کارانه‌ای دارند.



- میان قاب‌ها ضعیف شده به وسیله خسارت‌های داخل صفحه، مقاومت کافی در خارج از صفحه از خود بروز می‌دهند و در نهایت گسیختگی آنها به تغییر شکل‌های بزرگ خارج از صفحه وابسته می‌باشند.

### علائم، نشانه‌ها

ضریب خمشی بر اساس شکل میان قاب	a
مدول الاستیسیته، MPa	E
مدول الاستیسیته مصالح بنایی، MPa	$E_m$
سختی خمشی قاب، $N.mm^2$	EI
مقاومت کششی مصالح بنایی، MPa	$f_t$
مقاومت خمشی مصالح بنایی، MPa	$f_{lx}$
مقاومت فشاری مصالح بنایی، MPa	$f'_m$
مدول برشی، MPa	G
ارتفاع میان قاب، mm	h
لنگر تیرهای داخلی، $mm^4$	$I_b$
لنگر ستون‌های داخلی، $mm^4$	$I_c$
ثابت پیچشی تیر، $mm^4$	$J_b$
ثابت پیچشی ستون، $mm^4$	$J_c$
طول میان قاب، mm	L
لنگر نوارهای یک متری، N.mm/mm	$M_{yh}, M_{yv}$
بار نهایی میان قاب، KPa	$q_u$
اثر بارگذاری قبلی در داخل صفحه	$R_1$
ضریب مربوط به انعطاف پذیری	$R_2$
ضخامت میان قاب، mm	t
جابه‌جایی خارج از صفحه میان قاب، mm	$X_{yh}, X_{yv}$
ضریب مربوط به قاب فولادی	$\alpha$
ضریب مربوط به قاب فولادی	$\beta$
انعطاف پذیری میان قاب	$\gamma$
مقاومت خارج از صفحه فشاری، MPa	$\sigma_o$
حداکثر جابه‌جایی داخل از صفحه میان قاب، mm	$\Delta$
جابه‌جایی متناظر با ترک خوردگی میان قاب، mm	$\Delta_{cr}$
این ضریب به ابعاد میان قاب و شرایط مرزی میان قاب وابسته است.	$\beta_1$

### مراجع

- [1] Fiore, A., Netti, A. and Monaco, P. (2012). The influence of masonry infill on the seismic behaviour of RC frame buildings. Engineering structures, 44, 133-145.
- [2] Papia, M., Cavaleri, L. and Fossetti, M. (2003). Infilled frames: developments in the evaluation of the stiffening effect of infills. Structural engineering and mechanics, 16(6), 675-694.
- [3] Fiore, A., Spagnoletti, G. and Greco, R. (2016) On the prediction of shear brittle collapse mechanisms due to the infill-frame interaction in RC buildings under pushover analysis. Engineering Structures, 121, 147-159.

- [4] Fiore, A., Porco, F., Raffaele, D. and Uva, G. (2012) .About the influence of the infill panels over the collapse mechanisms actived under pushover analyses: two case studies. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 39, 11-22.
- [5] Asteris, P., Cavaleri, L., Di Trapani, F. and Tsaris, A. (2017). Numerical modelling of out-of-plane response of infilled frames: State of the art and future challenges for the equivalent strut macromodels. *Engineering Structures*, 132, 110-122.
- [6] Dizhur, D., Walsh, K., Giongo, I., Derakhshan, H. and Ingham, J. (2018) Out-of-plane proof testing of masonry infill walls. Elsevier, City,(15), 244-258.
- [7] Walsh, K., Dizhur, D., Giongo, I., Derakhshan, H. and Ingham, J. (2018) Predicted versus experimental out-of-plane force-displacement behaviour of unreinforced masonry walls. Elsevier, City, 15 , 292-306.
- [8] Palieraki, V., Zeris, C., Vintzileou, E. and Adami, C.-E.(2018). In-plane and out-of plane response of currently constructed masonry infills. *Engineering Structures*, 177, 103-116.
- [9] Hak, S., Morandi, P. and Magenes, G. (2014). Out-of-plane experimental response of strong masonry infills.
- [10] Timoshenko, S. P. and Woinowsky-Krieger, S. (1959) Theory of plates and shells. McGraw-hill.
- [11] Hendry, A. W. (1973). The lateral strength of unreinforced brickwork. *The Structural Engineer*, 51(2) , 43-50.
- [12] Hendry, A. and Kheir, A. (1976). The lateral strength of certain brickwork panels.
- [13] Haseltine, B., West, H. and Tutt, J. (1977). DESIGN OF WALLS TO RESIST LATERAL LOADS. *STRUCTURAL ENGINEER*, 55(10) , 422-430.
- [14] Haseltine, B. A., West, H. and Tutt, J. (1978) .Design of laterally loaded wall panels: II.
- [15] Drysdale, R. G. and Essawy, A. S. (1988). Out-of-plane bending of concrete block walls. *Journal of Structural Engineering*, 114(1), 121-133.
- [16] McDowell, E., McKee, K. and Sevin, E. (1956). Arching action theory of masonry walls. *Journal of the Structural Division*, 82 (2), 1-8.
- [17] Cohen, E. and Laing, E. (1956). Discussion to ‘Arching action theory of masonry walls. *Journal of Structural Division*, ASCE, 82(5) , 1067-1028.
- [18] EG, T. (1953). The strength of brickwork. *Struct Eng*, 31(Part 32):35-41.
- [19] Lefter, J. 1974.Reinforcing existing buildings to resist earthquake forces. University of Maryland,
- [20] Dawe, J. and Seah, C. (1989). Out-of-plane resistance of concrete masonry infilled panels. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 16(6), 854-864.
- [21] Angel, R., Abrams, D. P., Shapiro, D., Uzarski, J. and Webster, M. (1994) . Behavior of reinforced concrete frames with masonry infills. University of Illinois Engineering Experiment Station. College of ...,
- [22] Council, B. S. S. FEMA 356-Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington DC: Federal Emergency Management Agency (2000).
- [23] orgnization, M. a. p. Journal No.360 (1392).
- [24] Bashandy, T., Rubiano, N. R. and Klingner, R. E. (1991) .Evaluation and analytical verification of infilled frame test data. Phil M. Ferguson Structural Engineering Laboratory, University of Texas at ....
- [25] Klingner, R., Rubiano, N., Bashandy, T. and Sweeney, S. (1996) . Evaluation and analytical verification of shaking table data from infilled frames. Part 2: Out-of-plane behavior. The Masonry Society, Longmont, CO, City.
- [26] Eremin, A., Cohen, E. and Laing, E. (1956). Discussion of “Arching Action Theory of Masonry Walls,”. *Journal of the Structural Division*, 27-40.
- [27] Flanagan, R. D. and Bennett, R. M. (1999). Arching of masonry infilled frames: Comparison of analytical methods. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 4(3), 105-110.
- [28] Komaraneni, S., Rai, D. C. and Singhal, V. (2011). Seismic behavior of framed masonry panels with prior damage when subjected to out-of-plane loading. *Earthquake Spectra*, 27(4), 1077-1103.
- [29] Hashemi, A. and Mosalam, K. M. (2006). Shake-table experiment on reinforced concrete structure containing masonry infill wall. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 35(14) , 1827-1852.
- [30] Hashemi, S. A. (2007) .Seismic evaluation of reinforced concrete buildings including effects of masonry infill walls. University of California, Berkeley.