

## تأثیر چرخش پایین ستون بر مقاومت و سختی قاب فلزی میان‌پر

سید محمد متولی امامی

دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
[sm.emami@iiees.ac.ir](mailto:sm.emami@iiees.ac.ir)

مجید محمدی

استادیار پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران  
[m.mohmmadigh@iiees.ac.ir](mailto:m.mohmmadigh@iiees.ac.ir)

کلید واژه‌ها: میان‌قاب، چرخش ستون، قاب فلزی، سختی جانبی، مقاومت

### چکیده

برای مدل کردن میان‌قاب‌ها در سازه‌ها فارغ از اینکه میان‌قاب در کدام طبقه است، فرض می‌شود که رفتار آن در طبقات مختلف یکسان است. اما در این مقاله نشان داده می‌شود که مقاومت و سختی قاب میان‌پر در طبقه پایینی سازه‌هایی که اتصال ستون به فونداسیون به صورت گیردار است، بیشتر از میان‌قاب‌هایی است که در سایر طبقات قرار دارند و اتصال پایین ستون قادر به چرخش است. این نتیجه از مطالعه آزمایشگاهی یک قاب فلزی میان‌پر یک طبقه و یک دهانه به دست آمد. قاب مذکور تحت بارگذاری رفت و برگشتی درون صفحه قرار گرفت. نمونه‌ی آزمایشگاهی به طریقی ساخته شده بود که پایین ستون‌ها در نیروی کششی به صورت گیردار عمل کند و در نیروی فشاری اعمال شده از طرف جک قادر به چرخش باشد. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مقاومت حداکثر نمونه در حالت کششی ۵۰ درصد بیشتر از حالت فشاری است. همچنین سختی جانبی قاب میان‌پر در حالت با قابلیت چرخش پایین ستون نسبت به پایین ستون گیردار ۲۷ درصد کاهش پیدا می‌کند.

### مقدمه

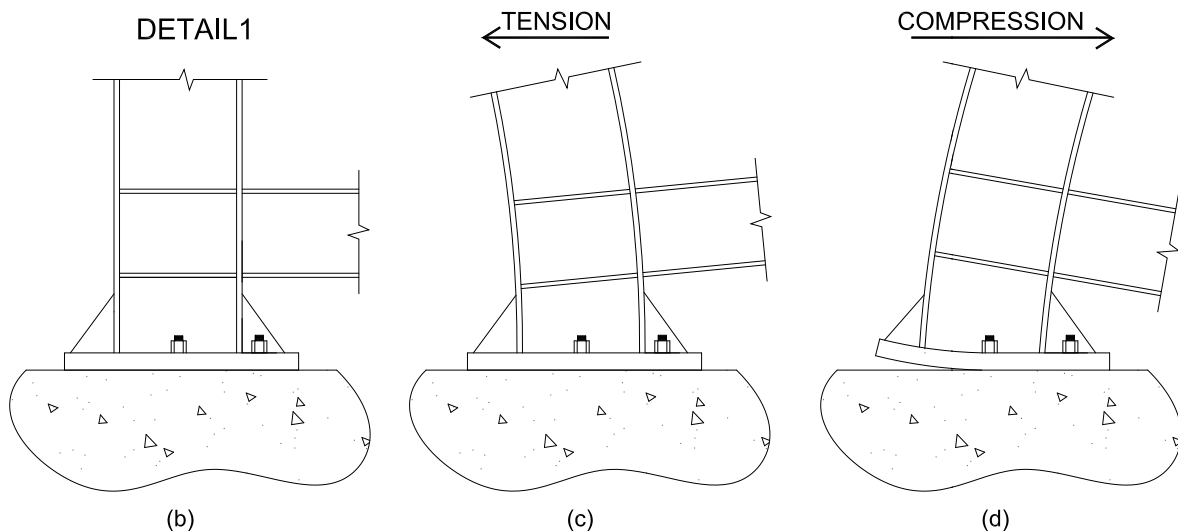
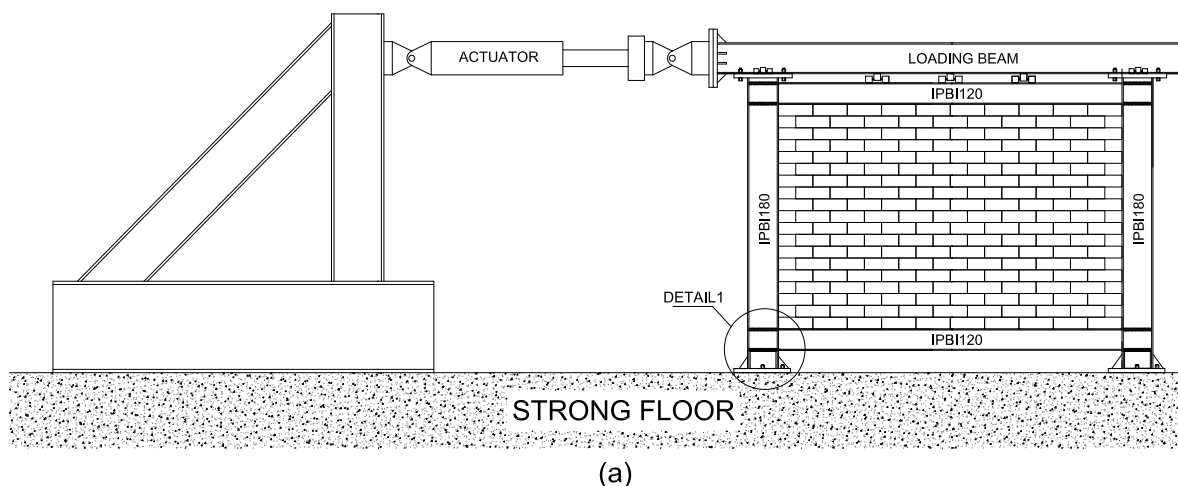
به قابهای ساختمانی که درون آنها با دیوارهای بنائی پر شده باشد قاب میان‌پر گفته می‌شود، مصالح پرکننده ممکن است از نوع آجری و یا بتنی باشند که به آنها میان‌قاب نیز گفته می‌شود. مشاهدات انجام شده در طی زلزله‌های گذشته، و همچنین تحقیقات صورت پذیرفته در سالهای اخیر نشان دهنده آن است که قابهای میان‌پر باعث افزایش چشم‌گیر سختی و مقاومت و همچنین تغییر در شکل‌پذیری سازه نسبت به سازه بدون میان‌قاب شده و در نتیجه موجب تغییر در پاسخ لرزه‌ای این گونه سازه‌ها می‌شود. وجود میان‌قاب‌ها بهنجویکه در زلزله‌ها مشاهده شده، اثرات مطلوب و یا نامطلوبی بر روی رفتار لرزه‌ای سازه‌ها داشته است. بنابراین مدل کردن میان‌قاب در سازه برای در نظر گرفتن اثرات آن اجتناب ناپذیر است. روش‌های متنوعی در ادبیات فنی برای مدل‌سازی میان‌قاب در سازه‌هایی که مرکب وجود دارد که این مدل‌ها را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم کرد: روش‌های محلی یا مبتنی بر ریزمدل‌سازی و روش‌های ساده‌شده یا مبتنی بر درشت‌مدل‌سازی. گروه اول مشتمل بر مدل‌هایی است که در آنها برای نشان دادن دقیق اثرات محلی، سازه به تعداد بسیار زیادی المان تقسیم می‌گردد؛ درحالی‌که گروه دوم شامل روش‌های ساده‌شده‌ای است که بر پایه فهم فیزیکی از رفتار قاب مرکب بنا شده‌اند. در این حالت، از تعداد کمی المان برای در نظر گرفتن اثر میان‌قاب به صورت یک‌جا استفاده می‌شود (راحی ۱۳۹۳). یکی از روش‌های ساده‌ی ریزمدل‌سازی که در دستورالعمل بهسازی سازه‌های موجود (۱۳۸۵) و همچنین FEMA356 (۲۰۰۰) و ASCE41-06 (۲۰۰۷) برای در نظرگیری اثرات میان‌قاب در سازه پیشنهاد شده است، روش پیشنهادی مینستن (۱۹۷۱) است. در این مدل میان‌قاب توسط یک قید قطری فشاری معدل جایگزین می‌شود. در حال حاضر در مدل‌سازی میان‌قاب در سازه در طبقات مختلف یک ساختمان فرض بر آن است که رفتار میان‌قاب در همه طبقات به شرط یکی بودن دیوار و قاب پیرامونی یکسان است. همچنین در مدل‌های کاربردی موجود، تفاوتی در سختی و مقاومت قاب‌های میان‌پر که اتصال ستون‌های آن به فونداسیون گیردار و یا مفصلی است قائل



نمی‌شود. در این مطالعه، برای بررسی اثر چرخش احتمالی پایین ستون قاب میان‌پر بر رفتار آن یک قاب فلزی میان‌پر مورد آزمایش قرار گرفت. قاب مذکور تحت بارگذاری رفت و برگشتی درون صفحه واقع شد. نمونه‌ی آزمایشگاهی به طریقی ساخته شده بود که پایین ستون‌ها در نیروی کششی به صورت گیردار عمل کند و در نیروی فشاری اعمال شده از طرف جک قادر به چرخش باشد.

## نمونه آزمایشگاهی

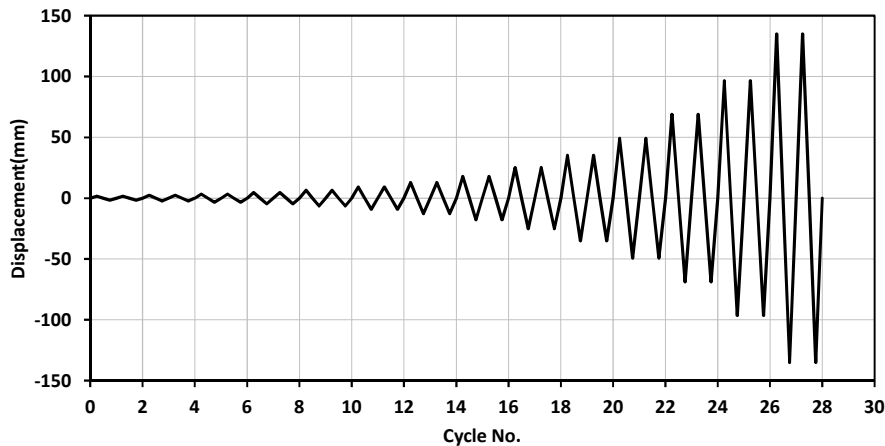
یک نمونه آزمایشگاهی برای بررسی اثر چرخش پایین ستون بر رفتار قاب میان‌پر مورد مطالعه قرار گرفت. این نمونه یک قاب خمشی فلزی یک طبقه به ارتفاع ۱/۵ متر، یک دهانه به طول ۲/۲۵ متر با مقیاس یک‌دوم بود. این قاب از طبقه‌ی اول یک ساختمان ۴ طبقه که بر طبق آیین‌نامه AISC-ASD89 (۱۹۸۹) و استاندارد ۲۸۰۰ (۱۳۸۵) ویرایش سوم طراحی شده بود، استخراج گردید. نمونه‌ی آزمایشگاهی شامل دو ستون با مقطع IPB180 و دو تیر با مقطع IPB120 بود. فولاد استفاده شده در تیرها و ستون‌ها از رده ST37 بوده که مقاومت تسلیم میانگین به دست آمده پس از آزمایش کشش فولاد ۳۰۰ مگاپاسکال به دست آمد. میان قاب از نوع آجری با ملات ماسه سیمان و ابعاد آجر به کار رفته ۵×۱۰×۲۰ سانتی‌متر بود. مقاومت نمونه آجرکاری شامل سه عدد آجر و دو لایه ملات بین آن‌ها ۹/۵ مگاپاسکال به دست آمد. بارگذاری به صورت رفت و برگشتی به نمونه وارد شد. برای بررسی اثر چرخش پایین ستون بر مقاومت و سختی قاب فلزی میان‌پر، اتصال ستون نمونه‌ی آزمایشگاهی به کف قوی به صورتی ساخته شده بود که در جهت کششی اتصال ستون به کف قوی آزمایشگاه به صورت گیردار عمل کند؛ و در جهت فشاری جک، اتصال ستون به کف قادر به چرخش باشد. در حقیقت همان‌طور که در شکل‌های (b) و (c) مشخص است صفحه کف ستون به گونه‌ای که کف قوی آزمایشگاه بسته شده که در جهت کششی، پیچ‌ها مانع از بلند شدن کف ستون می‌شوند و در جهت فشاری، عدم وجود پیچ در یک طرف صفحه زیر ستون سبب بلند شدن آن و در نتیجه چرخش ستون می‌شود.



شکل ۱: (a) آرایش نمونه‌ی آزمایشگاهی و نحوه بارگذاری، (b) جزئیات اتصال ستون و کف ستون به کف قوی آزمایشگاه، (c) عدم چرخش و گیردار بودن پای ستون در نیروی کششی، (d) نحوه‌ی چرخش پای ستون در نیروی فشاری.

## بارگذاری

بارگذاری رفت و برگشتی داخل صفحه به صورت جابجایی به نمونه وارد شد. پروتکل بارگذاری بر طبق پیشنهاد FEMA461 (۲۰۰۷) بود که شامل ۲۸ چرخه است و از جابجایی ۱/۷ میلی‌متر شروع شد. هر چرخه دوبار تکرار می‌شود و تا جابجایی ۱۳۵ میلی‌متر ادامه پیدا می‌کند. تاریخچه بارگذاری وارد بر نمونه در شکل ۲ نشان داده شده است. بار توسط یک جک با قابلیت بارگذاری رفت و برگشتی به ظرفیت حداکثر ۵۰ تن به نمونه وارد شد. طبق شکل ۱ (a) یک طرف جک به سازه‌ی نسبتاً صلبی که به کف قوی آزمایشگاه متصل بود، وصل شده است و طرف دیگر آن به یک تیربارگذاری که بر روی قاب می‌باشد، متصل است. تیربارگذاری توسط ۵ کلید برشی که سه تای آن بر روی تیر بالایی قاب و دو عدد دیگر بر روی سرستون‌ها قرار دارد، بار را از جک به نمونه منتقل می‌کند. نمای کلی نمونه و تیربارگذاری و همراه کلیدهای برشی در شکل ۳ نشان داده شده است. در حقیقت این شیوه‌ی بارگذاری موجب می‌شود که بار وارده بر قاب حتی‌الامکان شبیه واقعیت که نیروی جانبی توسط سقف در طول قاب وارد می‌شود، به صورت گسترده در طول نمونه پخش شود.



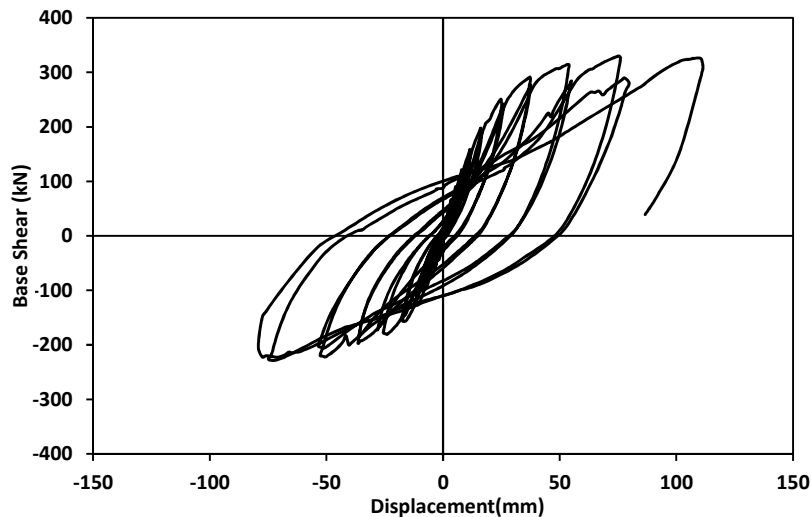
شکل ۲: تاریخچه بارگذاری وارد شده بر نمونه



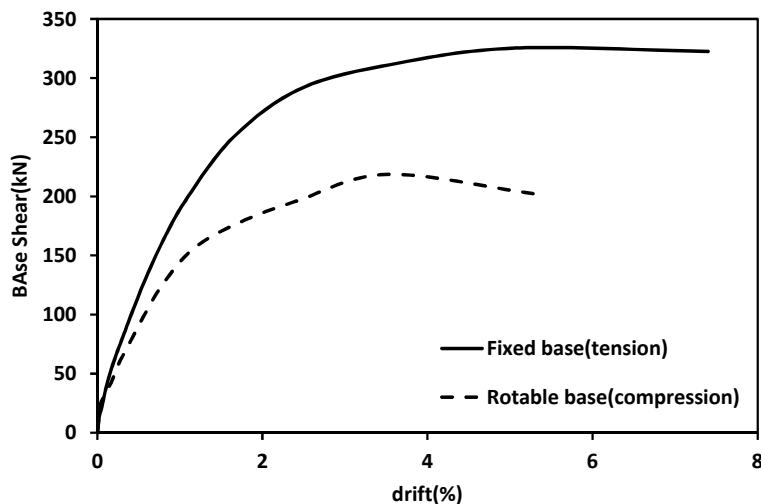
شکل ۳: شکل کلی نمونه آزمایشگاهی قبل از شروع تست به همراه تیر بارگذاری و کلیدهای برشی برای انتقال نیروی جانبی از جک به نمونه که در بیضی‌های توپر نشان داده شده است.



منحنی چرخه‌ای نیرو- تغییرمکان در شکل ۴ نشان داده شده است. سختی عملی ( $K_{exp}$ ) نمونه در کشش برابر  $12/97 \text{ kN/mm}$  و در فشار با کاهش ۲۷ درصدی برابر  $9/43 \text{ kN/mm}$  به دست آمد. سختی عملی که توسط محمدی (۲۰۰۷) پیشنهاد شد، برابر است با شیب خطی که از نقاط شروع ترک‌خردگی مرزی و اولین ترک‌خردگی میان‌قاب می‌گذرد. از این‌جا به بعد در این مقاله، منظور از سختی همان سختی عملی است مگر آن‌که غیر از این ذکر شده باشد. مقاومت نهایی ( $F_{exp}$ ) قاب میان‌پر در کشش و فشار به ترتیب  $325 \text{ kN}$  و  $218 \text{ kN}$  ثبت شد. این بدین معناست که مقاومت قاب میان‌پر وقتی که پای ستون گیردار باشد ۵۰ درصد بیشتر از حالتی است پایین ستون قاب قادر به چرخش باشد. پوش منحنی چرخه‌ای نمونه در کشش و فشار در شکل مقایسه شده است. همان‌طور که مشخص است چرخش پای ستون سبب کاهش قابل توجهی در سختی و مقاومت نمونه‌ی مورد بررسی می‌شود.



شکل ۴: منحنی چرخه‌ای نمونه آزمایشگاهی



شکل ۵: پوش منحنی چرخه‌ای در کشش و فشار

همان‌طور در شکل‌های ۴ و ۵ ملاحظه شد، رفتار قاب میان‌پر تحت اثر بارگذاری چرخه‌ای به وضوح در کشش و فشار متفاوت است. همان‌طور که ذکر شد علت عدم یکسان بودن رفتار نمونه در کشش و فشار گیردار بودن اتصال ستون به کف در جهت کششی و بلند شدن یک طرف ورق اتصال کف ستون و در نتیجه چرخش چشمه‌ی اتصال تیر به ستون، در هنگام اعمال نیروی فشاری است. شکل ۶ بلند شدگی ورق کف ستون را در جابجایی نسبی  $7/4\%$  در جهت فشاری نشان می‌دهد.



شکل ۶: بلندشدگی ورق کف ستون در جابجایی نسبی ۷/۴ درصد

## مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی

در این قسمت سختی و مقاومت به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی با مقادیر محاسبه شده از رابطه پیشنهادی مینستن مقایسه گردید. برای محاسبه سختی ( $K_{ani}$ ) و مقاومت ( $F_{ani}$ ) به روش تحلیلی در جهت کششی، اتصال ستون‌ها به فونداسیون گیردار در نظر گرفته شد و در جهت فشاری این اتصال به صورت مفصلی فرض شد. در جدول ۱ سختی و مقاومت آزمایشگاهی و تحلیلی مقایسه شده‌اند.

جدول ۱: مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی به روش مینستن

جهت اعمال بار	سختی ( $kN/mm$ )			مقاومت ( $kN$ )		
	آزمایشگاهی	تحلیلی	$K_{ani}/K_{exp}$	آزمایشگاهی	تحلیلی	$F_{ani}/F_{exp}$
کششی (اتصال گیردار ستون به پی)	۱۳	۱۹	۱/۴۵	۳۲۵	۲۵۲/۸	۰/۷۸
فشاری (اتصال مفصلی ستون به پی)	۹/۴	۱۳/۴	۱/۴۲	۲۱۸	۲۵۲/۸	۱/۱۶

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد مقدار سختی در هر دو حالت کششی و فشاری در حدود ۴۰ درصد دست بالا تخمین زده شده است. ولی در تخمین مقاومت حداکثر نمونه به روش مینستن در حالتی که اتصال ستون به پی گیردار است ۱۲ درصد دست پایین گزارش داده می‌شود ولی در حالت که پای ستون قابلیت چرخش دارد، مقدار مقاومت تحلیلی ۱۶ درصد بیشتر از مقاومت آزمایشگاهی تخمین زده شده است.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر چرخش احتمالی پایین ستون بر سختی و مقاومت قاب‌های فلزی میان‌پر بررسی شده است. بدین منظور یک مدل آزمایشگاهی با مقیاس یک‌دوم با میان‌قاب آجری مورد آزمایش قرار گرفت. بار جانبی به قاب به صورت رفت و برگشتی در جهت درون صفحه اعمال شد. اتصال ستون به کف قوی به صورتی ساخته شده بود که در هنگام اعمال نیروی کششی اتصال به صورت گیردار عمل کند و موقع اعمال نیروی فشاری ورق اتصال ستون به کف قابلیت بلندشدگی داشته باشد. در نتیجه این بلندشدگی ورق کف ستون، پایین ستون و در نتیجه چشمه اتصال تیر به ستون قابلیت چرخش پیدا می‌کند.

نتایج آزمایشگاهی نشان داد که مقاومت حداکثر نمونه در حالت کششی ۵۰ درصد بیشتر از حالت اعمال نیروی فشاری است. سختی جانبی قاب میان‌پر نیز در حالت با چرخش پایین ستون نسبت به پای ستون گیردار ۲۷ درصد کاهش پیدا می‌کند. همچنین سختی و مقاومت آزمایشگاهی با مقادیر نظیر محاسبه شده از رابطه مینستن مقایسه گردید. نتایج نشان داد که سختی تحلیلی در هر دو حالت فشاری و کششی، ۴۰



درصد بیشتر از سختی آزمایشگاهی تخمین زده می‌شود. ولی مقاومت تحلیلی علی‌رغم اینکه در حالت اتصال گیردار ستون به پی، دست پایین گزارش شده است، عنگامی که پایین ستون قابلیت چرخش دارد به صورت دست بالا تخمین زده می‌شود.

## فهرست مراجع

آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰)، (۱۳۸۵)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ویرایش سوم

دستورالعمل بهسازی ساختمان های موجود (نشریه شماره ۳۶۰)، (۱۳۸۵)، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور

راحی، محمد امیر (۱۳۹۳) ارائه مدل رفتاری میانقابهای دارای بازشو برای تحلیل غیرخطی لرزه ای قابهای بتن مسلح رساله دکتری، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

American Institute of Steel Construction (1989) Manual of steel construction: allowable stress design. *American Institute of Steel Construction*

American Society of Civil Engineers (2007) Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. *American society of civil engineers*

Federal Emergency Management Agency (2000) Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings: FEMA-356

Federal Emergency Management Agency (FEMA 461) (2007) *Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components*

Mainstone RJ (1971) On the Stiffness and Strengths of Infilled Frames. In *ICE Proceedings* 49(2): 230 Thomas Telford

MohammadiM (2007) Stiffness and damping of infilled steel frames. *Proceedings of the ICE-Structures and Buildings*, 160(2), 105-118

MotamedH (2012) Determination of indices and criteria of urban seismic safety against earthquake, Ph.D. Thesis, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran

