

منحنی رفتاری دیوارهای بنایی محصور شده با کلاف‌های بتن مسلح

مسعود عموزاده تبریزی^۱، مسعود سلطانی محمدی^۲، عباسعلی تسنیمی^۳

- ۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی زلزله، دانشگاه تربیت مدرس
۲- دانشیار مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس
۳- استاد سازه، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

msoltani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۷/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۰۶/۲۹

چکیده- ضوابط موجود در آیین‌نامه‌های مختلف در مورد دیوارهای بنایی کلاف‌دار عموماً بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی و مشاهده خسارت‌های وارد بر این دسته از سازه‌ها در زلزله‌های گذشته می‌باشد. از این رو این ضوابط اغلب به صورت تجویزی بوده و روابط تحلیلی مناسبی برای ارزیابی مقاومت لرزه‌ای آن‌ها وجود ندارد.

در این تحقیق با استفاده از روش اجزای محدود غیرخطی به بررسی رفتار درون صفحه‌ای دیوارهای بنایی کلاف‌دار پرداخته می‌شود. پس از اعتبارسنجی مدل عددی و مدل‌های رفتاری استفاده شده، اثر وجود بازشو و هم‌چنین چیدمان دیوارهای بنایی مجاور هم بر رفتار لرزه‌ای هر کدام از دیوارها به صورت عددی مطالعه می‌شود. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که با افزایش مساحت بازشو در قسمت میانی پانل دیوار، حداکثر مقاومت دیوار به صورت لگاریتمی کاهش پیدا می‌کند. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد که دیوارهای مجاور سبب افزایش نیروهای اندرکنشی بین کلاف‌های بتنی و دیوار بنایی شده است، در نتیجه ظرفیت باربری هر کدام از دیوارها به صورت مجزا افزایش پیدا می‌کند. در ادامه با بررسی پاسخ‌های به‌دست آمده از نمونه‌های تحلیلی، یک منحنی جامع سه خطی برای به‌دست آوردن ظرفیت دیوارهای بنایی کلاف‌دار پیشنهاد می‌شود.

واژگان کلیدی: کلاف، دیوار آجری، ریز مدل سازی، مدل رفتاری.

۱- مقدمه

محدود می‌باشد. لزوم توسعه روش‌های مناسب به‌خصوص برای تحلیل و ارزیابی ساختمان‌های بنایی کلاف‌دار موجود از آن جهت اهمیت دارد که بسیاری از ساختمان‌های ساخته شده در گذشته بنایی بوده و در ساخت آن‌ها عموماً ضوابط تجویزی آیین‌نامه‌ای به نحو مناسبی رعایت نشده‌اند. اگر چه اعمال ضوابط تجویزی آیین‌نامه‌ها در طرح و اجرای ساختمان‌های تازه احداث به‌راحتی قابل اعمال

دیوارهای بنایی کلاف‌دار شامل دیوارهای بنایی به‌عنوان عضو اصلی باربر لرزه‌ای و المان‌های بتنی و یا فولادی می‌باشند که در گوشه‌ها، نقاط تقاطع دیوارها و در اطراف بازشوها اجرا می‌شوند. ضوابط موجود در مورد دیوارهای بنایی کلاف‌دار اغلب به صورت تجویزی بوده و روش‌های محاسباتی برای ارزیابی رفتار این گونه دیوارها بسیار

است. اما تأمین این ضوابط در بهسازی ساختمان‌های موجود بدون شبیه‌سازی رفتار لرزه‌ای آن در وضعیت فعلی و شناخت ضعف‌های آن و صرفاً بر مبنای ضوابط تجویزی، امری دشوار و بسیار پرهزینه می‌باشد که البته تجربیات بهسازی در سال‌های اخیر خود نشان‌دهنده این موضوع می‌باشد، از این رو لزوم توجه به چگونگی ارزیابی عملکرد لرزه‌ای آن‌ها ضروری است.

به‌طور کلی کلاف‌ها در هنگام وارد شدن نیروهای جانبی از فروپاشی دیوارها جلوگیری کرده و شکل‌پذیری سازه را افزایش می‌دهند. به‌طور معمول مقطع کلاف‌های قائم بتنی مستطیلی بوده که ابعاد آن‌ها وابسته به ضخامت دیوار می‌باشد. در مورد کلاف‌های افقی نیز ابعاد متأثر از دو عامل ضخامت دیوار و نوع سقف طبقات می‌باشد. میزان آرماتور مصرفی در داخل کلاف‌های بتنی به‌طور قراردادی و تجربی تعیین می‌شود که به‌طور معمول وابسته به ابعاد و ارتفاع ساختمان است.

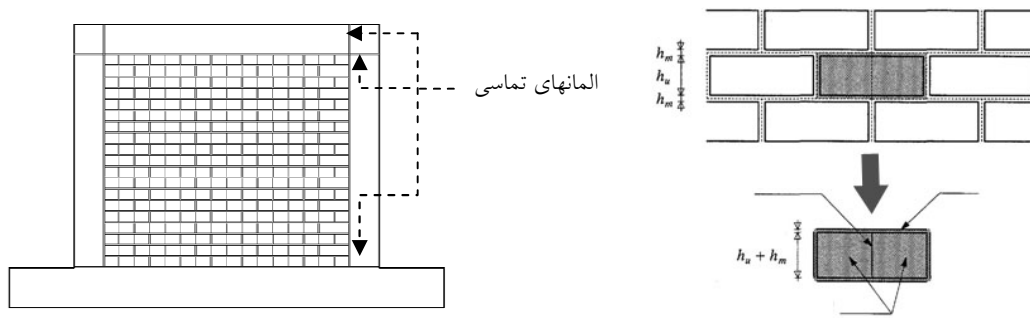
رفتار لرزه‌ای دیوارهای بنایی کلاف‌دار از گذشته مورد توجه مطالعات آزمایشگاهی بوده و در سال‌های اخیر نیز موضوع مطالعات تحلیلی قرار گرفته است. در سال ۱۹۹۲، کاتو [۱] به‌منظور بررسی عملکرد کلاف‌های قائم در دیوارهای بنایی کلاف‌بندی شده تعداد چهار نمونه دیوار آجری با ویژگی‌های متفاوت را مورد مطالعه آزمایشگاهی قرار داد. با بررسی نتایج بیش از ۵۰ نمونه آزمایشگاهی انجام شده در آمریکای لاتین [۲]، مورونی در سال ۱۹۹۴ یک مدل ساده برای پیش‌بینی رفتار غیر ارتجاعی دیوارهای کلاف‌دار، براساس مطالعات آماری روی نتایج آزمایشگاهی ارائه کرد. تومازویچ و کلمنک [۳] در سال ۱۹۹۶ با بررسی نتایج سه نمونه آزمایشگاهی و مطالعات تحلیلی، یک منحنی رفتاری سه خطی برای دیوارهای بنایی کلاف‌دار پیشنهاد دادند، در همین سال فلورز و آلکاور [۴] با استفاده

از نتایج آزمایشگاهی، منحنی لرزه‌ای دیوارهای کلاف‌دار را در دو حالت مسلح و غیرمسلح بررسی کرده و مدل سه خطی دیگری برای این دسته از دیوارها ارائه کردند. در سال ۲۰۰۰ حاج اسماعیلی [۵] دو ساختمان آجری دو طبقه غیرمسلح و کلاف‌بندی شده را در مقیاس ۱:۲ که بر مبنای توصیه‌های آیین نامه ۲۸۰۰ ساخته شده بود، مورد آزمایش قرار داد، هم‌چنین به موازات کار آزمایشگاهی صورت گرفته، مدل‌سازی تحلیلی این ساختمان‌ها نیز انجام شد. در سال ۲۰۰۴ یانز و همکارانش [۶] برای بررسی تأثیر وجود بازشو در رفتار دیوارهای بنایی محصور شده، شانزده نمونه دیوار را مورد آزمایش قرار دادند.

نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که حتی با وجود بازشوهای بزرگ این دسته از دیوارها ظرفیت شکل‌پذیری بالایی داشته و نیز اندازه بازشو و نوع واحد‌های بنایی منحنی رفتاری آن‌ها را کنترل می‌کند. کاستیلا و مارلینی [۷] در سال ۲۰۰۶ سه دسته دیوار را با نسبت ابعادی مختلف و تحت تنش‌های ثقلی گوناگون مورد بررسی آزمایشگاهی قرار دادند و با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به ارائه روابط تجربی برای تخمین مقاومت برشی این دسته از دیوارها پرداختند.

در سال ۲۰۰۹، ریاحی [۸] با جمع‌آوری نتایج آزمایشگاهی انجام شده در سراسر دنیا و انجام مطالعات آماری روی آن‌ها توانست یک منحنی رفتاری برای ارزیابی عملکرد لرزه‌ای دیوارهای بنایی کلاف‌دار ارائه دهد.

اگر چه مطالعات آزمایشگاهی زیادی به‌منظور بررسی رفتار دیوارهای بنایی کلاف‌دار در سالیان گذشته صورت گرفته است اما به‌طور معمول این تحقیقات روی دیوارهای مجزا و فاقد بازشو بوده یا تعداد پارمترهای بررسی شده به حدی نبوده است که امکان توسعه و معرفی یک مدل جامع مقدور شود.



شکل (۱) نحوه مدل‌سازی دیوارهای آجری کلاف‌دار

افقی و قائم و محل تماس دیوار بنایی و کلاف‌ها بیش‌ترین احتمال جداشدگی را دارند، از این رو همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود در مدل‌های تحلیلی ساخته شده در این نواحی از المان‌های تماسی استفاده شده است. هر آجر به‌وسیله دو المان صفحه‌ای که بین آن‌ها یک المان تماسی قرار داده می‌شود مدل شده و مشخصات آن بر مبنای خواص مصالح آجر تعریف می‌شود به‌منظور مدل‌سازی رفتار لغزش و بازشدگی آجر و ملات از مدل اصلاح شده چگالی تماسی [۹] که به‌وسیله صالحی و همکاران [۱۰] برای سطح تماس ملات با آجر توسعه داده شد، استفاده شده است.

در این مدل انتقال تنش بین سطوح تماس به‌گونه‌ای اصلاح شده است که سطح تسلیم المان تماسی با توجه به ضریب اصطکاک و چسبندگی سطح تماس آجر و ملات حاصل شود.

در ادامه نخست با شبیه‌سازی عددی رفتار دیوارهای بنایی فاقد کلاف و کلاف‌دار، دقت مدل‌سازی و مدل‌های رفتاری که مبنای مطالعات پارامتریک و توسعه مدل مورد نظر بوده است، بررسی می‌شود.

۳- شبیه‌سازی عددی رفتار دیوارهای بنایی غیر مسلح فاقد کلاف

به منظور بررسی رفتار دیوارهای بنایی غیرمسلح، آبرامز و شاه [۱۱] در سال ۱۹۹۲ چند نمونه دیوار را مورد آزمایش

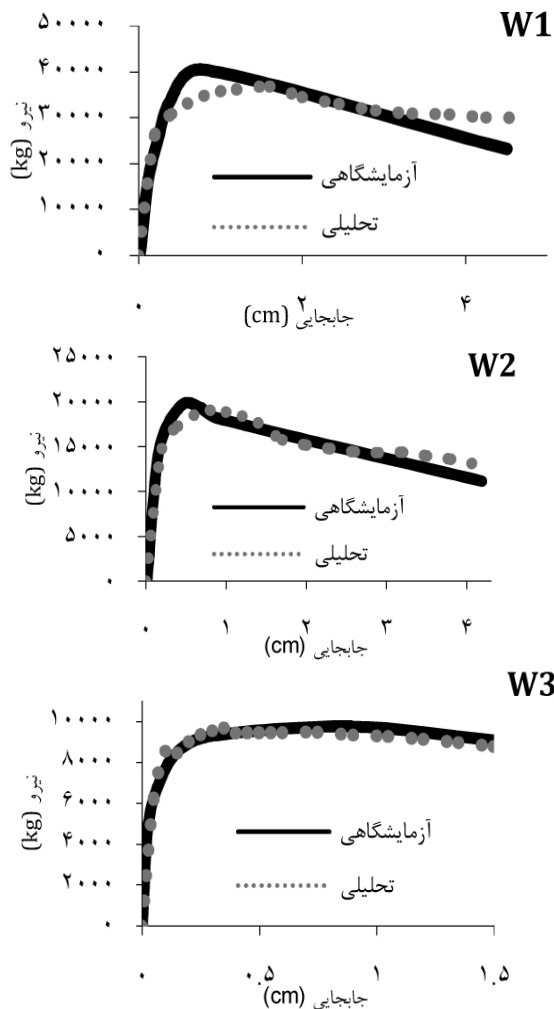
با توجه به موارد ذکر شده، در این تحقیق سعی بر آن است تا با مطالعه عددی پاسخ دیوارهای بنایی محصور شده در کلاف‌های بتنی، تأثیر وجود بازشو و هم‌چنین آثار اندرکنشی دیوارهای مجاور بررسی شده و بر مبنای آن یک مدل رفتاری ۳ خطی با اعمال آثار فوق ارائه شود.

۲- شیوه مدل‌سازی

برای مدل‌سازی دیوارهای بنایی کلاف‌دار از برنامه WCOMD-SJ که یک نرم‌افزار اجزای محدود غیر خطی است و در آزمایشگاه بتن دانشگاه توکیو توسعه یافته، استفاده شده است [۹].

این نرم افزار به‌وسیله صالحی و همکاران [۱۰] برای استفاده از دیوارهای آجری اصلاح شده است. در این نرم‌افزار برای مدل‌سازی گسترش ترک از ترکیب روش ترک پخشی و ترک منفرد استفاده می‌شود، تکنیک مدل‌سازی به کار رفته در این تحقیق، روش ریز مدل ساده شده است که در آن آجرها و ملات بین آن‌ها به صورت مجزا مدل شده است که بازشدگی و لغزش بین آجر و ملات با استفاده از المان تماسی (Interface) شبیه‌سازی می‌شود. المان‌های کلاف بتنی با استفاده از المان‌های صفحه‌ای به روش ترک پخشی چندجهته مدل‌سازی می‌شوند. با مشاهده خسارت‌های وارد شده در زلزله‌های گذشته می‌توان گفت که محل اتصال‌ها به‌ویژه محل اتصال کلاف قائم با فوندانسیون، نواحی اتصال کلاف‌های

همان طور که دیده می‌شود نتایج تحلیلی انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.



شکل (۳) مقایسه منحنی‌های تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی دیوار

۴- شبیه‌سازی عددی رفتار دیوارهای بنایی کلاف‌دار

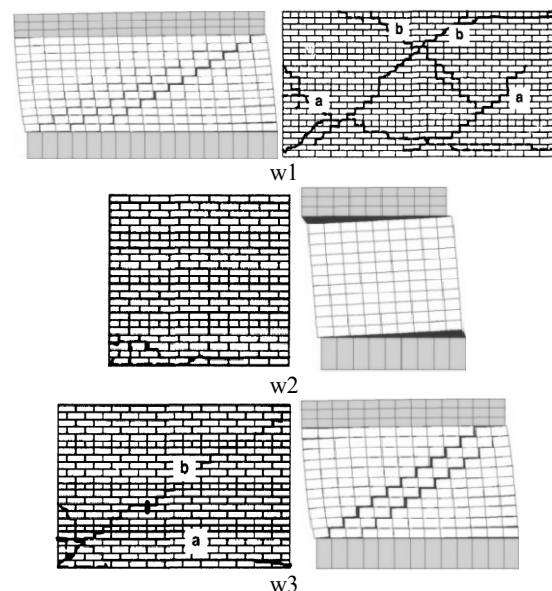
کاستیلا و ماریلینی [۷] در سال ۲۰۰۴ برای بررسی میزان تأثیر نسبت ابعاد دیوار و بار ثقلی روی مد شکست و منحنی رفتاری دیوارهای بنایی کلاف‌دار، ۹ نمونه آزمایشگاهی را مورد مطالعه قرار دادند [۷].

قرار دادند. این دیوارها نسبت ابعادی l/h ۲، ۱.۵ و ۱ دارند. آجرهای مصرفی ابعاد اسمی ۲۰ cm طول، ۹ cm عرض و ۵.۶ cm ارتفاع داشته و ضخامت اسمی ملات ۱ cm است. مقاومت فشاری آجرهای مصرفی به‌طور میانگین برابر 245 kg/cm^2 با انحراف معیار ۶ درصد می‌باشد. در جدول ۱ ابعاد و تنش قائم وارد بر دیوار ذکر شده است.

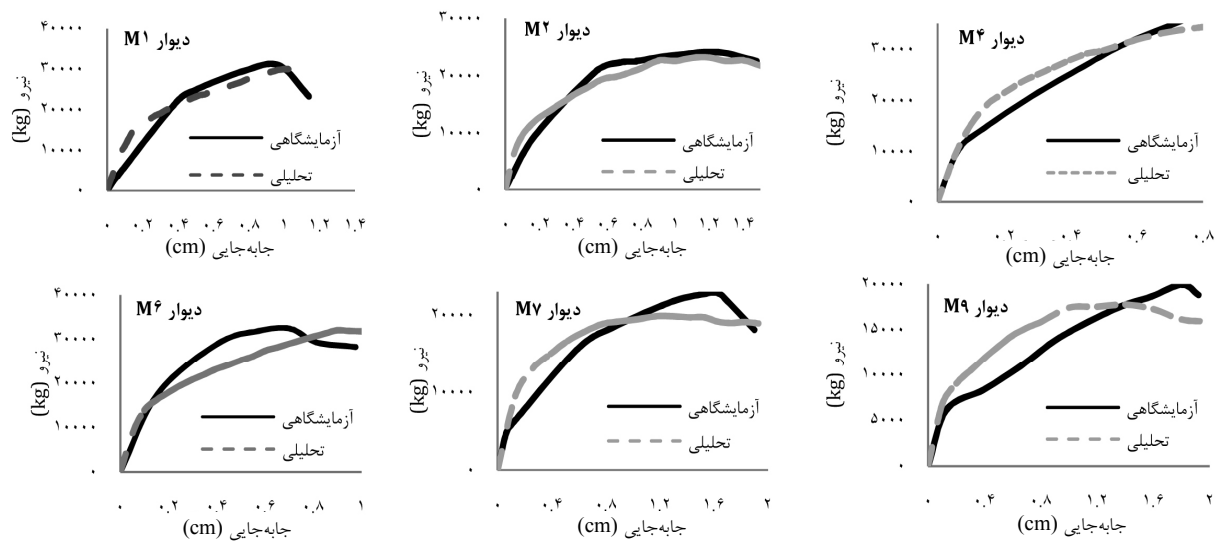
جدول ۱ مشخصات نمونه‌ها

نمونه	$L \text{ (m)}$	L/h	$A_g \text{ (m}^2\text{)}$	$f_a \text{ (kg/cm}^2\text{)}$
W1	3.7	2	0.7	5.3
W2	2.7	1.5	0.5	3.5
W3	1.8	1.0	0.4	3.5

بارگذاری انجام شده روی نمونه‌های آزمایشگاهی به صورت رفت و برگشتی انجام شده است ولی در مدل‌سازی‌های انجام شده، بارگذاری با اعمال جابه‌جایی در یک نقطه (بار افزون) به مدل صورت گرفته است. نحوه شکست مدل‌های آزمایشگاهی و تحلیلی در شکل ۲ مقایسه شده است. نتایج تحلیل در مقایسه با منحنی بار تغییر مکان آزمایشگاهی در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل (۲) مقایسه نحوه ترک‌خوردگی نمونه‌های آزمایشگاهی آبرامز و شاه با نمونه‌های تحلیلی

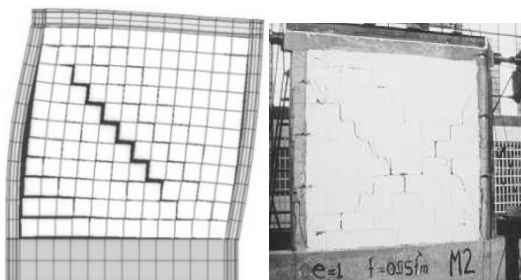


شکل (۴) مقایسه منحنی‌های تحلیلی با نتایج آزمایشگاهی کاستیلا و ماریلینی [۷]

جدول (۳) مشخصات مصالح مصرفی

$f_p = 135 \text{ kgf/cm}^2$	مقاومت فشاری آجر
$f_m = 70.1 \text{ kgf/cm}^2$	مقاومت فشاری ملات
$f_c = 360 \text{ kgf/cm}^2$	مقاومت فشاری بتن
$f = 80 \text{ kgf/cm}^2$	مقاومت فشاری واحد آجرکاری
$f_y = 4200 \text{ kgf/cm}^2$	مقاومت کششی آرماتور

تفاوت اندک موجود بین نتایج، با توجه به عدم قطعیت‌های زیاد موجود در مشخصات مصالح و رفتار دیوارهای بنایی قابل توجه می‌باشد. یک نمونه الگوی ترک‌خوردگی مربوط به نمونه M2 در شکل ۵ نشان داده شده است که تطابق خوبی با الگوی خرابی نمونه آزمایشگاهی دارد.



شکل (۵) تغییر شکل و ترک‌خوردگی در دیوار شماره ۲ و مقایسه آن با تغییر شکل آزمایشگاهی کاستیلا و همکاران

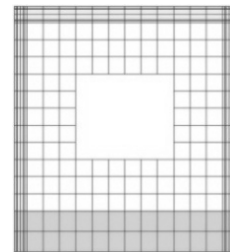
در این قسمت به منظور بررسی صحت مدل‌سازی‌های انجام شده در این تحقیق، از نتایج حاصل از این نمونه‌ها استفاده شده است. مشخصات ابعادی و مصالح مصرفی در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است. کلاف عمودی و افقی به ترتیب ابعادی برابر 15×15 و 15×20 دارند که در هر کدام از آن‌ها از چهار آرماتور نمره ۴ استفاده شده است. بارگذاری انجام شده در نمونه‌های تحلیلی به صورت یکنواخت بوده و از راه وارد کردن جابه‌جایی به تیر فوقانی انجام می‌شود، مقایسه بین نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی در شکل ۴ ارائه شده که نشان‌دهنده دقت خوب مدل‌سازی صورت گرفته است.

جدول (۲) نسبت ابعادی و بار ثقیل دیوارها

دیوار	ارتفاع (m)	طول (m)	h/l	$\sigma_0 (\text{kg/cm}^2)$
M1	2.30	2.36	0.97	8.00
M2	2.30	2.36	0.97	4.00
M3	2.30	2.36	0.97	0.00
M4	2.30	3.12	0.74	6.00
M5	2.30	3.12	0.74	0.00
M6	2.30	3.12	0.74	4.00
M7	2.30	1.81	1.27	8.00
M8	2.30	1.81	1.27	0.00
M9	2.30	1.81	1.27	4.00

۵- بررسی تأثیر وجود بازشوها در مقاومت جانبی دیوارهای آجری کلاف‌دار

نتایج آزمایشگاهی و مشاهدات خسارت‌های وارد به ساختمان‌ها بعد از وقوع زلزله نشان می‌دهد که ترک‌های برشی معمولاً از گوشه‌های بازشوها آغاز می‌شوند و به طرف قسمت‌های میانی پانل گسترش پیدا می‌کنند. اندازه، شکل و موقعیت بازشوها تأثیر بسیاری در عملکرد لرزه‌ای دیوارهای بتایی محصور شده دارد. برای ارزیابی میزان تأثیر اندازه بازشو در مقاومت دیوارهای بتایی کلاف‌دار با ایجاد و افزایش مساحت بازشو در سه نمونه دیوار معرفی شده در قسمت قبل (دیوارهای ۲، ۴ و ۷)، به بررسی تأثیر بازشوها در کاهش مقاومت دیوار پرداخته می‌شود. به‌عنوان نمونه مدل اجزی محدود دیوار کلاف‌دار شماره ۲ با بازشو در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل (۶) ایجاد بازشو در نمونه‌های تحلیلی

بازشوها در مرکز دیوار قرار گرفته و بدون هرگونه چهارچوبی فرض شده است. تحلیل دیوارها تحت بار ثقلی ثابت و بار افزایش‌دهنده یکپارچه انجام شد. نسبت مساحت بازشو به مساحت دیوار و حداکثر مقاومت جانبی دیوار و سختی اولیه در جدول ۴ ذکر شده است.

همان‌طور که در شکل ۷-ب دیده می‌شود، با افزایش مساحت بازشو نسبت به سطح دیوار مقاومت حداکثر به صورت لگاریتمی و با الگوی مشابهی در هر سه دیوار بررسی شده کاهش پیدا می‌کند. با بررسی پاسخ‌های به‌دست آمده می‌توان رابطه ساده زیر را برای تخمین میزان کاهش مقاومت دیوار به دلیل وجود بازشو پیشنهاد داد:

$$\frac{P_{\max(\text{opening})}}{P_{\max}} = -0.23 \times \ln \left(\frac{A(\text{opening})}{A(t)} \right) \quad (۱)$$

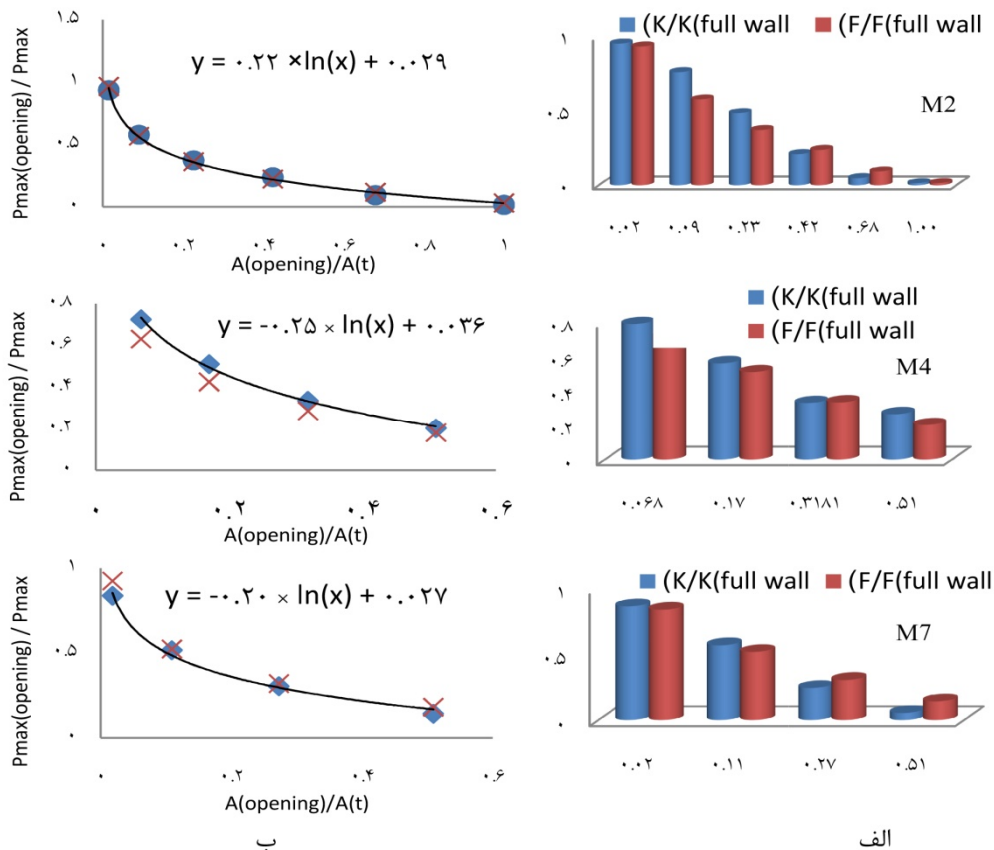
جدول (۴) مشخصات دیوارها با بازشو در مرکز

نام دیوار	نسبت سطح بازشو به سطح دیوار	مقاومت نهایی (kg)	سختی اولیه cm/kg
دیوار M2	0.00	24400	63800
	0.02	22820	60900
	0.09	14120	48670
	0.23	9092	31025
	0.42	5808	13420
	0.68	2280	3126.5
	1.00	385.5	968
دیوار M4	0.00	36480	149700
	0.068	26420	118200
	0.17	18650	84170
	0.3181	12240	49620
	0.51	7381	39940
دیوار M7	0.00	20950	72584.62
	0.02	17550	62669.23
	0.11	10830	41215.38
	0.27	6368	17676.92
	0.51	2977	3873.08

در رابطه بالا پارامترهای $P_{\max}$ ، $P_{\max(\text{opening})}$ و $A(\text{opening})$ به ترتیب نشانگر حداکثر مقاومت دیوار دارای بازشو، حداکثر مقاومت دیوار فاقد بازشو، سطح مقطع بازشو و سطح مقطع دیوار در حالت فاقد بازشو می‌باشد.

۶- بررسی تأثیر دیوارهای مجاور بر یکدیگر

هنگام تأثیر نیروهای جانبی در یک ساختمان بتایی کلاف‌دار، مقاومت داخل صفحه به‌وسیله مجموعه‌ای از دیوارهای بتایی که در فواصل معینی به‌وسیله کلاف‌های قائم محصور شده است، تأمین می‌شود. تاکنون در بیش‌تر تحقیقات انجام شده به‌صورت آزمایشگاهی یا تحلیلی، رفتار دیوارها به صورت منفرد و بدون در نظر گرفتن تأثیر دیوارهای مجاور روی منحنی رفتاری بررسی شده است. حتی در دستورالعمل‌های ارزیابی لرزه‌ای هم‌چون نشریه‌های ۳۶۰ [۱۲] و ۳۷۶ [۱۳] رفتار دیوارهای بتایی بدون اعمال آثار اندرکنشی بین دیوارها ارزیابی می‌شود.



شکل (۷) الف: مقاومت و سختی اولیه دیوار نسبت به دیوار بدون بازشو؛ ب: میزان تأثیر بازشوها در کاهش مقاومت دیوار

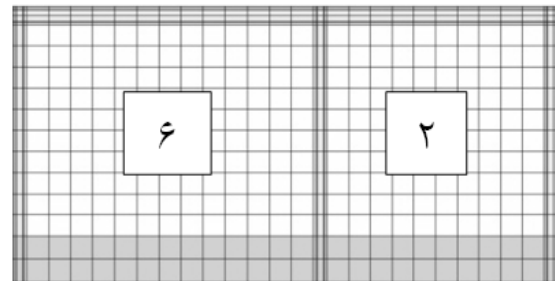
منحنی‌های دیوارهای منفرد، دیوارهای شماره ۲، ۶ و ۹ از مجموعه آزمایش‌های مرجع [۷] که در بند ۴ این مقاله مطالعه شده، بررسی می‌شود (جزئیات هندسی دیوارهای مذکور در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است). مطالعه انجام شده در دو بخش ذکر می‌شود. در قسمت اول دو دیوار منفرد و در قسمت دوم سه دیوار منفرد به یکدیگر متصل شده و منحنی رفتاری آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

همان طور که در شکل (۸) دیده می‌شود در مدل a دیوارهای شماره ۲ و ۶ به یکدیگر متصل شده‌اند و در مدل شماره b ، کلاف میانی بین آن‌ها حذف شده است. تمامی دیوارهای این مجموعه تحت تنش ثقلی 4 kg/cm^2 قرار گرفته و بارگذاری از راه اعمال جابه‌جایی به کلاف افقی

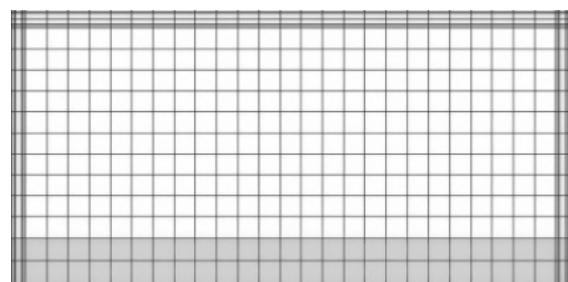
در صورتی که به دلیل آثار اندرکنشی و محصورکنندگی دیوارهای مجاور بر یکدیگر، ظرفیت و شکل‌پذیری دیوارهای کلاف‌دار افزایش پیدا می‌کند؛ به عبارت دیگر در یک دیوار با طول ثابت انتظار بر این است که با افزایش تعداد کلاف‌های میانی شاهد افزایش ظرفیت و شکل‌پذیری باشیم در حالی که در مدل‌های موجود این اثر منظور نمی‌شود. برای مثال در نشریه ۳۷۶، برای یک دیوار ۵ متری با دو کلاف در دو انتهای دیوار، رفتار مشابهی با دیواری با همان مشخصات ولی با کلاف میانی فرض می‌شود.

در این قسمت سعی بر آن است تا با مطالعه عددی و ارائه مدل تحلیلی، رفتار اندرکنشی دیوارهای مجاور شبیه‌سازی شود. برای مقایسه نتایج به دست آمده با

بالایی انجام شده است. در شکل ۹ الگوی ترک خوردگی این دو نمونه نشان داده شده است.

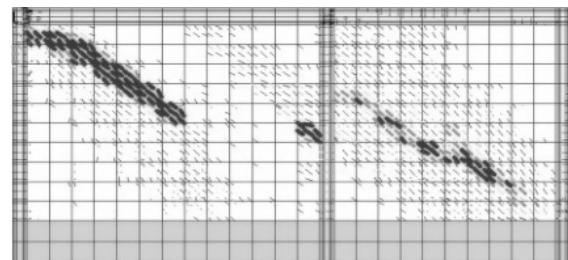


(الف)

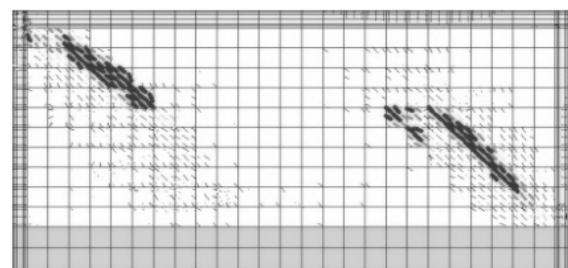


(ب)

شکل (۸) مدل الف: اتصال دیوارهای شماره ۲ و ۶؛ مدل ب: اتصال دیوارهای شماره ۲ و ۶ بدون کلاف میانی



(الف)

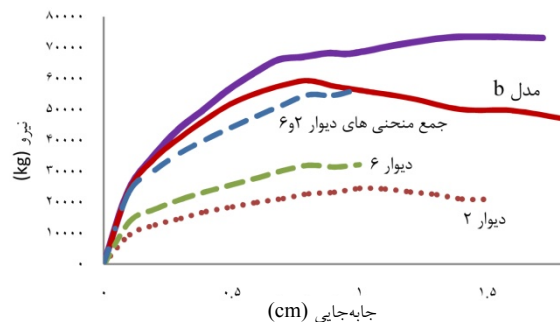


(ب)

شکل (۹) الگوی ترک خوردگی نمونه‌های الف و ب

همان طور که در این شکل دیده می‌شود، ترک خوردگی

به صورت قطری بوده و الگوی ترک خوردگی در دو نمونه کاملاً متفاوت می‌باشد. در نمونه a به دلیل وجود کلاف میانی، محصورشدگی بیش‌تری نسبت به نمونه b ایجاد می‌شود. در شکل (۱۰) منحنی‌های به دست آمده از تحلیل‌های صورت گرفته ارائه شده است.

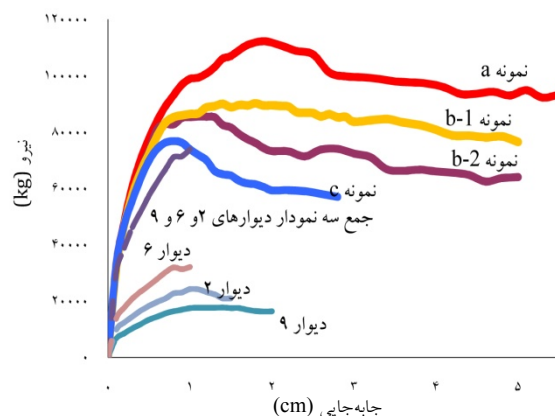


شکل (۱۰) اثر اندرکنشی دو دیوار کلاف‌دار مجاور هم

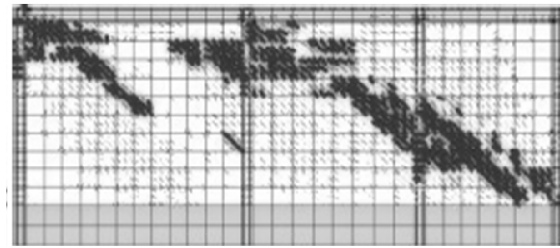
در این مدل افزایش مقاومت و شکل‌پذیری دیوار با کلاف میانی کاملاً مشهود است. همان طور که دیده می‌شود، در دو مدل a و b ، مقاومت و شکل‌پذیری دیوارها از جمع پاسخ دو دیوار منفرد بررسی شده بیش‌تر است. لازم به یادآوری است که در ارزیابی لرزه‌ای ساختمان‌های بنایی عموماً با فرض رفتار برشی ساختمان‌ها، پاسخ کلی سازه از جمع پاسخ تک تک دیوارها به دست می‌آید که تحلیل صورت گرفته نشان می‌دهد این فرض می‌تواند بسیار محافظه‌کارانه باشد.

برای بررسی هر چه بیش‌تر این موضوع در قسمت دوم سه دیوار منفرد به شماره‌های ۲ و ۶ و ۹ را در تماس با یکدیگر قرار داده و در حالت‌های مختلف منحنی رفتاری آن‌ها مقایسه می‌شود. در مدل a هر سه نمونه به صورت کامل به یکدیگر متصل شده‌اند، در نمونه‌های $b-1$ و $b-2$ یکی از کلاف‌های میانی و در نمونه c هر دو کلاف میانی حذف شده‌اند. تمام مدل‌ها تحت تنش ثقلی یکسان قرار گرفته و بارگذاری با اعمال جابه‌جایی به کلاف افقی بالایی انجام گرفته است.

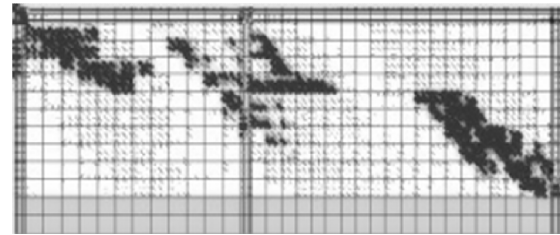
یکسانی دارند اما با شروع ترک خوردگی و ایجاد کشش در کلاف های قائم (فعال شدن کلاف های قائم به عنوان عضو محصور کننده دیوار)، منحنی های رفتاری از یکدیگر جدا می شوند (شکل ۱۲)؛ به طور مثال در مدل های سه دیوار اتصال، دیوار نمونه a- که تعداد کلاف بیش تری دارد- مقاومت و شکل پذیری بالاتری نسبت به دیگر نمونه ها داشته و دیوارهای نمونه های b-1 و b-2 - که هر کدام یک کلاف میانی دارند، دارای مقاومت حداکثر برابری هستند و دیوار نمونه c نیز به دلیل وجود نداشتن کلاف میانی کم ترین میزان مقاومت و شکل پذیری را دارد. همان طور که در نتایج حاصل از مدل سازی های انجام شده دیده می شود با جمع منحنی های هر سه دیوار منفرد می توان به سختی اولیه و مقاومت ترک خوردگی مجموعه دیوارهای متصل به هم رسید اما بعد از فعال شدن کلاف های قائم و به کشش افتادن آن از این منحنی نمی توان برای به دست آوردن مقاومت واقعی دیوار استفاده کرد. این امر را می توان به دلیل ایجاد نیروهای اندرکنشی بین کلاف های قائم میانی با دیوارهای کناری آن دانست. کلاف های میانی از هر دو سمت خود با دیوار بنایی در تماس بوده و باعث می شوند که زمان تأثیر نیروهای جانبی، محصورشدگی بیش تری در دیوار ایجاد شود و مقاومت و شکل پذیری دیوار افزایش پیدا کند.



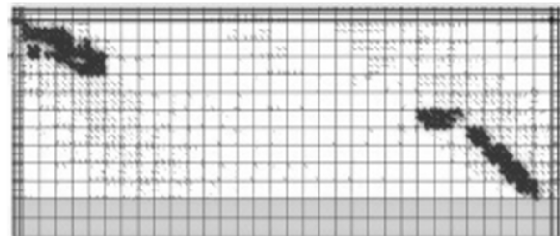
شکل (۱۲) اثر اندرکنشی سه دیوار کلاف دار مجاور هم



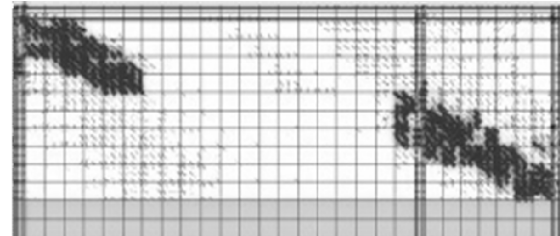
نمونه الف



نمونه ب



نمونه ج



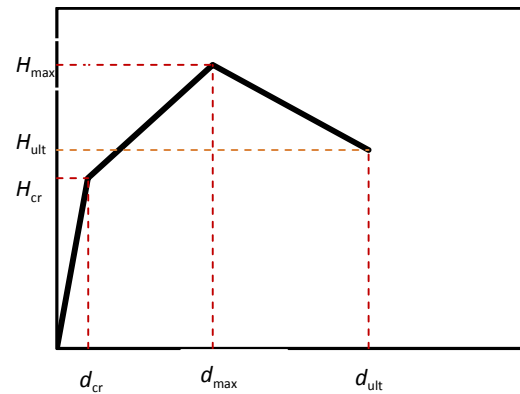
نمونه د

شکل (۱۱) الگوی ترک خوردگی در نمونه ها

هر چهار نمونه طول یکسان دارد و تنها تفاوت بین آن ها در وجود داشتن یا نداشتن کلاف های میانی است. همان طور که در شکل ۱۱ دیده می شود، افزایش تعداد کلاف میانی باعث گسترش ترک خوردگی در سطح بیش تری از دیوار می شود، بنابراین مقاومت حداکثر و ظرفیت اتلاف انرژی دیوار افزایش پیدا می کند. با بررسی نتایج تحلیل های انجام شده دیده می شود که تمامی دیوارها قبل از ترک خوردگی، سختی و مقاومت

۷- ارائه روابط تحلیلی برای تخمین پوش مقاومتی دیوارهای مجاور

در این قسمت سعی شده است تا یک رابطه تقریبی برای تعیین پاسخ دیوارهایی که در مجاورت همدیگر قرار گرفته‌اند، ارائه شود. به این منظور از شیوه محاسباتی تومازویچ و کلمنس [۳]- که در ادامه به اختصار به عنوان روش تومازویچ نامبرده می‌شود- برای دیوارهای بنایی کلاف‌دار استفاده شده و با انجام اصلاحات لازم مبتنی بر نتایج تحلیل‌های عددی، رابطه پیشنهادی ارائه شده است.



شکل (۱۳) منحنی پیشنهادی برای دیوارهای مجاور

برای تعیین پوش منحنی رفتاری در روش تومازویچ از سه نقطه مشخصه استفاده می‌شود که عبارتند از: حد الاستیک: به وسیله بار جانبی (H_{cr}) و جابه‌جایی (d_{cr}) متناظر با شکل‌گیری اولین ترک در دیوار مشخص می‌شود. حداکثر مقاومت: متناظر با بیشینه مقاومت دیوار که به وسیله بار جانبی (H_{max}) و جابه‌جایی (d_{max}) تعریف می‌شود. حد نهایی: به وسیله مقاومت جانبی (H_{ult}) در بیشینه مقدار جابه‌جایی درست قبل از خرابی (d_{ult}) به دست می‌آید. نقاط مذکور در شکل ۱۳ نمایش داده شده‌اند. در ادامه به اختصار روش محاسبه این نقاط شرح داده می‌شود.

در شکل ۱۴، دیاگرام آزاد نیروهای اعمالی به پانل بنایی محصور شده در کلاف‌های پیرامونی بر مبنای فرضیه‌های

تومازویچ نشان داده شده است. H_i و V_i به ترتیب برآیند نیروهای اندرکنشی بین کلاف‌ها و دیواربنایی در راستای افقی و قائم می‌باشند. با توجه به برآیند لنگر نیروها حول نقطه O در گوشه دیوار خواهیم داشت:

$$\sum M_o = 0 \rightarrow -H_i \times y_H - V_i \times [l - X_{VZ}] + V_i \times [l - X_{VS}] = 0 \quad (2)$$

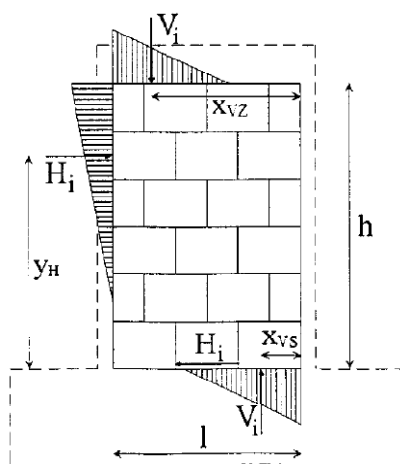
$$V_i = \frac{y_H \times H_i}{X_{VZ} - X_{VS}} \quad (3)$$

با فرض $\alpha = \frac{[X_{VZ} - X_{VS}] \times h}{y_H \times l}$ رابطه (۳) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$V_i = H_i \times \frac{h/l}{\alpha} = H_i \frac{S_w}{\alpha} \quad (4)$$

در رابطه بالا S_w معرف نسبت ابعادی دیوار بنایی (نسبت ارتفاع به طول دیوار می‌باشد). تنش فشاری کل اعمالی به مقطع دیوار بنایی δ_0 ناشی از دو عامل تنش اعمالی ناشی از بار ثقلی δ_N و تنش اعمالی ناشی از نیروی اندرکنشی بین کلاف‌ها و دیوار بنایی δ_v می‌باشد (رابطه ۵).

$$\sigma_0 = \sigma_N + \sigma_v = \frac{V_w}{A_w} + H_i \times \frac{S_w}{A_w \times \alpha} \quad (5)$$



شکل (۱۴) توزیع نیروهای اندرکنشی بین کلاف بتنی و دیوار بنایی [۳]

براساس تحقیقات آزمایشگاهی تومازویچ که مطالعات ریاحی [۸] نیز آن را تأیید می‌کند، دیگر نقاط مشخصه منحنی رفتاری سه خطه دیوارهای بنایی کلاف‌دار به‌صورت زیر تعیین می‌شود.

$$H_{cr} = C_{cr} \times H_i, \quad C_{cr} = 0.7-0.8 \quad (۸)$$

$$H_{max} = H_i + H_{d,r} \quad (۹)$$

که در آن $H_{d,r}$ سهم کلاف‌های قائم در مقاومت برشی کل دیوار بنایی کلاف‌دار می‌باشد و از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$H_{d,r} = \sum_1^n 0.8059 d_r^2 \sqrt{F_c \times F_y} \quad (۱۰)$$

در روابط بالا

n : تعداد آرماتورهای طولی در هر دو کلاف قائم

d_r : قطر میلگردهای طولی مصرفی در کلاف

F_c : مقاومت فشاری بتن کلاف قائم

F_y : مقاومت کششی آرماتور طولی کلاف قائم می‌باشد.

مقاومت حد نهایی (H_{ult}) براساس با مطالعات تومازویچ به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$H_{ult} = C_{sr} \times H_{max}, \quad C_{sr} = 0.6-0.7 \quad (۱۱)$$

به‌طور معمول میزان α برابر $\frac{5}{4}$ در نظر گرفته می‌شود. سختی وتری برای نقاط مشخصه حد الاستیک، حداکثر مقاومت و حد نهایی از رابطه ۱۲ تعیین می‌شود که در آن مقدار I_d به‌ترتیب برابر ۰/۲۵، ۰/۵ و ۱ است.

$$K = K_e (1 - \sqrt{1.28 I_d - 0.32}) \quad (۱۲)$$

در این تحقیق به منظور تعیین پاسخ حداکثر دیوارهای مجاور، نیروهای اندرکنشی V_i و H_i در ضربی به نام β که نشان‌دهنده افزایش نیروهای اندرکنشی ناشی از تأثیر دیوارهای مجاور است - ضرب می‌شود (شکل ۱۵).

در رابطه بال V_w و A_w به ترتیب نیروی قائم ناشی از بار ثقلی و سطح مقطع افقی دیوار آجری می‌باشند.

مقدار تنش فشاری اعمالی به دیوار بنایی کنترل‌کننده ظرفیت دیوار بنایی است. ترنسک و چاکویک [۱۴] مقاومت کشش قطری دیوارهای بنایی را به‌صورت رابطه (۶) - که تابعی از مقدار تنش فشاری اعمالی به دیوار است - پیشنهاد کرده‌اند.

$$H = \frac{A_m \times f_t}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_t}} \quad (۶)$$

که در آن f_t مقاومت کششی واحد بنایی است و مقدار b به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$b = 1 \text{ for } \frac{h}{l} \leq 1.5,$$

$$b = \frac{h}{l} \text{ for } 1 < \frac{h}{l} < 1.5,$$

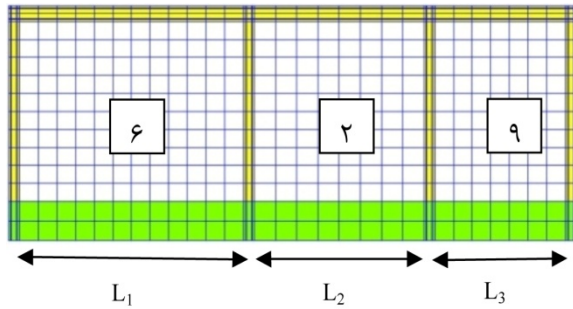
$$b = 1.5 \text{ for } \frac{h}{l} \geq 1.5$$

لازم به ذکر است که براساس مطالعات آزمایشگاهی تومازویچ و کلمنس [۳] و همچنین مطالعات آماری ریاضی [۸] الگوی ترک‌خوردگی در پانل‌های بنایی محصور شده با کلاف‌های بتنی از نوع ترک‌های قطری است که البته با گذشت از درز ملات‌ها با لغزش در این سطوح همراه است، صرف‌نظر از این‌که در دیوار بنایی فاقد کلاف چه مود رفتاری حاکم باشد. این موضوع در نتایج تحلیل‌های صورت گرفته در این تحقیق نیز قابل مشاهده می‌باشد.

در نهایت تومازویچ با جاگذاری مقدار σ_0 (رابطه ۵) در رابطه بالا و ساده‌سازی آن مقاومت دیوار بنایی کلاف‌دار را به‌صورت زیر پیشنهاد کرده است.

$$H_i = \frac{A_m \times f_t}{b \times C_i} \times \left(1 + \sqrt{1 + C_i^2 \left[1 + \frac{\sigma_0}{f_t} \right]} \right) \quad C_i = 2\alpha b \frac{l}{h} \quad (۷)$$

مجموع طول دو دیوار کناری و طول دیوار بررسی شده می‌باشند. به طور مثال مقدار L_n برای حالت نمایش داده شده در شکل (۷۰) برای دیوار ۲ برابر L_6+L_9 ، برای دیوار شماره ۶ برابر L_2 و برای دیوار شماره ۹ برابر L_2 خواهد بود.

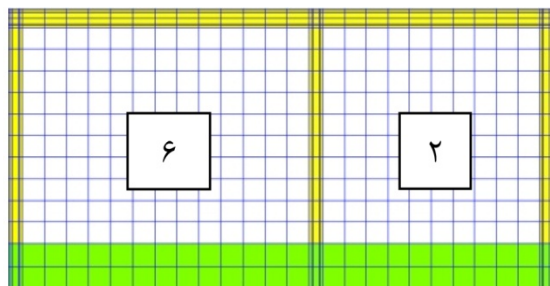


شکل (۱۷) تعیین ضریب L_n/L برای یک دیوار میانی

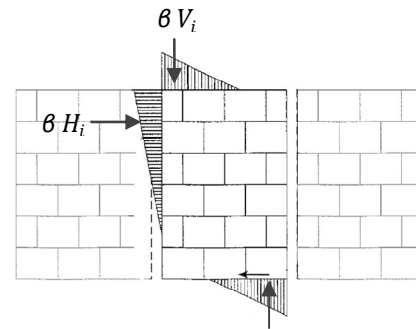
بر مبنای مطالعات پارامتریک یک رابطه خطی بین β و نسبت L_n/L براساس با رابطه ۱۴ برای ضریب افزایش نیروهای اندرکنشی پیشنهاد می‌شود.

$$\beta = (0.25 + 0.08\sigma_v) \left(1.4 + 1.5 \frac{L_n}{L} \right) \geq 1 \quad (14)$$

برای بررسی و مقایسه پاسخ حداکثر به‌دست آمده از رابطه پیشنهادی با نتایج مدل‌های تحلیلی چند مدل تحت تنش‌های ثقلی گوناگون تحلیل شده‌اند. نخست از مدل اتصال دیوار شماره ۲ و ۶ از مجموعه آزمایش‌های کاستیلا و ماریلینی [۷] استفاده شد (شکل ۱۸).



شکل (۱۸) مدل اتصال دیوار شماره ۲ و ۶ از مجموعه آزمایش‌های کاستیلا و ماریلینی

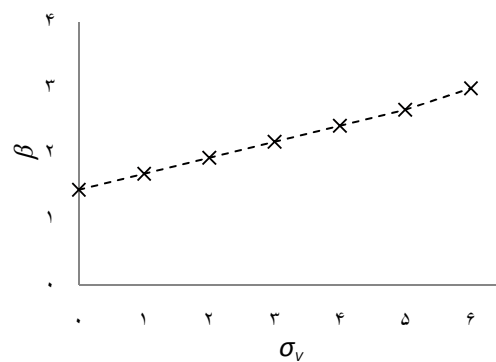


شکل (۱۵) افزایش نیروهای اندرکنشی بین کلاف بتنی و دیوار بنایی به‌دلیل وجود دیوارهای مجاور

با حل دوباره روابط ارائه شده، حداکثر مقاومت دیوار بنایی به‌صورت زیر اصلاح می‌شود:

$$H_t = \frac{A_m f_t}{b \times C_i} \left(\beta + \sqrt{\beta^2 + C_i^2 \left[1 + \frac{\sigma_0}{f_t} \right]} \right) \quad (13)$$

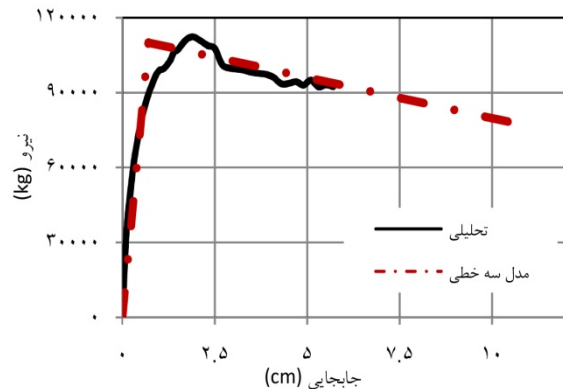
برای تعیین ضریب β نخست باید پارامترهای مؤثر بر این ضریب تعیین شود. برای این منظور نخست به بررسی تنش قائم در چند نمونه تحلیلی پرداخته شد، سپس پاسخ حداکثر مدل تحلیلی به‌دست آورده و بر مبنای آن میزان پارامتر β تعیین شد (شکل ۱۶).



شکل (۱۶) رابطه بین تنش قائم با ضریب β

از دیگر عوامل مؤثر در افزایش نیروهای اندرکنشی برای یک دیوار، طول دیوارهای کناری است. برای در نظر گرفتن این موضوع پارامتر L_n/L تعریف شد که در آن L_n و L به‌ترتیب

رفتاری تعدادی از دیوارهای بنایی کلاف‌دار را که در مجاورت هم قرار گرفته‌اند با تقریب مناسبی به‌دست آورد.



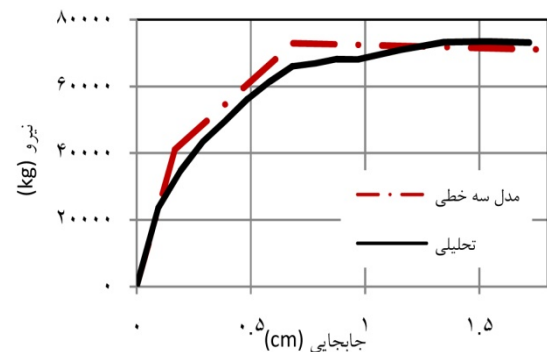
شکل (۲۰) مقایسه منحنی پیشنهادی برای مدل سه دیوار اتصال با نتایج تحلیلی

در صورت وجود بازشو در داخل دیوارهای بنایی مقاومت حداکثر دیوارهای بازشودار با استفاده از رابطه ۱ اصلاح شده و نیز جهت تعیین پارامتر L_n برای دیوارهای که در مجاورت دیوار بازشودار قرار گرفتند طول دیوار بازشودار با ضرب در نسبت $A_{opening}/A_{wall}$ اصلاح می‌شود، برای مثال برای مجموع دیوار کلاف‌دار نمایش داده شده در شکل ۲۱ که بازشو با سطح ۳۰ درصد دیوار میانی دارد، منحنی ۳ خطی دیوار به‌صورت شکل ۲۲ تعیین شده است و مقایسه آن با پاسخ مدل اجزای محدود نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل پیشنهادی در برآورد پاسخ دیوارهای بنایی کلاف‌دار می‌باشد.

در جدول ۵ نحوه تعیین مقاومت مجموعه دیوار نمایش داده شده در شکل ۱۸، نسبت پاسخ حداکثر نرم‌افزار WCOMD و رابطه پیشنهادی، ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، مدل اصلاح شده قادر به برآورد مناسب مقاومت دیوار با اعمال آثار اندرکنشی دیوارهای مجاور می‌باشد.

برای بررسی بیش‌تر از مدل سه دیوار اتصال که از کنارهم قرار دادن دیوارهای شماره ۲، ۶ و ۹، از مجموعه آزمایش‌های کاستیلا و ماریلینی حاصل شد، استفاده شده است.

خلاصه نتایج در جدول ۶ مشاهده می‌شود. همان‌طور که از نتایج به‌دست آمده دیده می‌شود با رابطه پیشنهادی می‌توان مقاومت حداکثر دیوارهای مجاور را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرد. هم‌چنین در شکل (۱۹) منحنی سه خطی برای دیوارهای اتصال شماره ۲ و ۶ آورده شده است.



شکل (۱۹) مقایسه منحنی پیشنهادی برای دیوارهای اتصال ۲ و ۶ با نتایج تحلیلی

محاسبات بالا برای مدل سه دیوار اتصال نیز انجام شده که نتایج به‌دست آمده در شکل ۲۰ ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود با این روش می‌توان منحنی

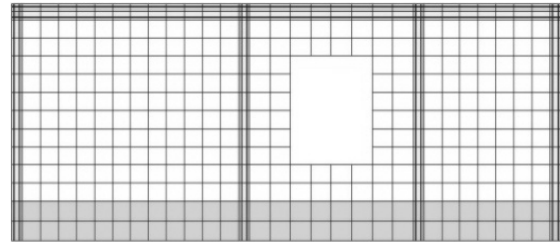
جدول (۵) مقایسه پاسخ به‌دست آمده از فرمول پیشنهادی با پاسخ حداکثر نرم‌افزار WCOMD

σ_v (kg/cm ²)	$(L_n/L)_2$	$(L_n/L)_6$	β_2	β_6	H_{dr} (kg)	H_2 (kg)	H_6 (kg)	H_{max} (kg)	$\frac{H_{wcomd}}{H_{total}}$
0	0.76	1.32	1	1	9829.1	18646.7	22535.6	51011.4	0.91
2	0.76	1.32	1.39	1.04	9829.1	24236.17	26808.2	60873.4	1.03
4	0.76	1.32	1.93	1.44	9829.1	30441.3	32660.9	72931.3	1.01
6	0.76	1.32	2.47	1.85	9829.1	36431.76	38202.7	84463.5	1.01

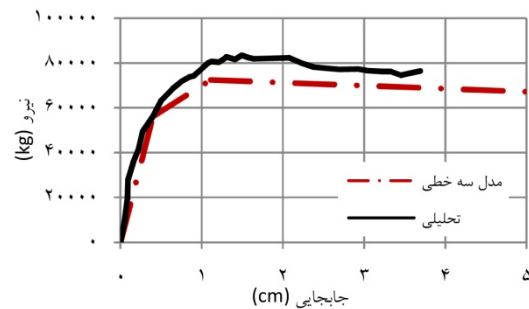
جدول (۶) مقایسه پاسخ به‌دست آمده از فرمول پیشنهادی با پاسخ حداکثر نرم‌افزار WCOMD

σ_v	$(L_n/L)_2$	$(L_n/L)_6$	$(L_n/L)_9$	β_2	β_6	β_9	$H_{dr}(\text{kg})$	$H_2(\text{kg})$	$H_6(\text{kg})$	$H_9(\text{kg})$	$H_{max}(\text{kg})$	$\frac{H_{wcomd}}{H_{total}}$
1	2.1	0.75	1.3	1.5	1	1.1	13105.5	23650.8	24652.5	12912.2	74320.9	1.07
2	2.1	0.75	1.3	1.86	1.04	1.37	13105.5	27600	26808.2	14924.4	82438.2	1.05
3	2.1	0.75	1.3	2.22	1.24	1.64	13105.5	31476.3	29792.8	16881.8	91256.4	1.08
4	2.1	0.75	1.3	2.6	1.44	1.9	13105.5	35455.7	32660.9	18752.7	99974.9	1.09
5	2.1	0.75	1.3	2.95	1.65	2.17	13105.5	39163.3	35501.3	20637.6	108408	1.07

می‌توان منحنی رفتاری مجموعه دیوارها را از جمع جبری منحنی هر کدام از دیوارهای کلاف‌دار به‌صورت منفرد به‌دست آورد، اما بعد از شروع ترک‌خوردگی و فعال شدن کلاف‌های قائم، منحنی رفتاری کلی از جمع جبری مقاومت هر کدام از دیوارها فاصله پیدا می‌کند. براساس مشاهده‌های خرابی نمونه‌های تحلیلی و منحنی پاسخ به‌دست آمده از آن‌ها، یک مدل سه خطی برای پوش مقاومتی دیوارهای مجاور- که براساس مقاومت ترک خوردگی، مقاومت حداکثر و مقاومت نهایی تعریف شده است- پیشنهاد شد. مقایسه نتایج مدل پیشنهادی با نتایج تحلیل‌های دقیق غیرخطی نشان از دقت قابل قبول آن دارد.



شکل (۲۱) مدل اتصال دیوارها در صورت وجود بازشو



شکل (۲۲) مقایسه منحنی پیشنهادی برای مدل سه دیوار اتصال بازشودار با نتایج تحلیلی

۹- مراجع

- [1] Kato, H., T. Goto, and H. Mizuno; "Cyclic Loading Test of Confined Masonry Wall Element for Structural design development of apartment houses in the third World"; Proceeding of the 10th WCEE; Madrid-Spain: 19 (24), pp.3559-3544,1992.
- [2] Moroni, M. O. Astroza and, M. Tavonatti, S.; "Nonlinear models for shear failure in confined masonry walls"; *The Masonry Soc. J.*(Boulder), 12 (2), pp. 72-78,1994.
- [3] M. Tomazevic and I. Klemenc; "Seismic behaviour of confined masonry buildings. Part 2: shaking-table tests of model buildings M1 and M2-analysis of test results"; Report ZAG/PI-95/06, Ljubljana, 1996.
- [4] Flores, L. E., and Alcocer, S. M.; "Calculated response of confined masonry structures"; 11th

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مدل‌سازی تحلیلی دیوارهای بنایی کلاف‌دار و رفتار غیر خطی آن‌ها تحت بار جانبی مورد بررسی قرار گرفت و با مطالعه پارامتریک یک مدل ساده ۳ خطی برای برآورد پاسخ آن‌ها ارائه شد. مطالعه صورت گرفته نشان داد که افزایش سطح بازشو، مقاومت دیوار را به‌صورت لگاریتمی کاهش می‌دهد و براساس نتایج به‌دست آمده از تحلیل نمونه‌های گوناگون رابطه‌ای برای تخمین پاسخ دیوارهای بازشودار ارائه شد.

هم‌چنین نتایج بررسی‌های انجام شده روی چیدمان دیوارهای کلاف‌دار نشان داد که تا حد ترک‌خوردگی دیوار،

- [11] Abrams, D.P. and Shah, N.; "Cyclic load testing of unreinforced masonry walls"; College of Engineering, University of Illinois at Urbana, *Advanced Construction Technology Center Report #92-26-10.*, 1992.
- [۱۲] دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۶۰)؛ معاونت امور فنی دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، ۱۳۸۵.
- [۱۳] دستورالعمل بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود (نشریه ۳۷۶)؛ معاونت امور فنی دفتر امور فنی، تدوین معیارها و کاهش خطرپذیری ناشی از زلزله، ۱۳۸۶.
- [14] V. Turnsek and F. Cacovic; "Some experimental results on the strength of brick masonry walls"; Proc. of the 2nd Int. Brick Masonry Conference, Stoke-on-Trent, pp. 149-156., 1971.
- World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, Paper No. 1830, 1996.*
- [۵] حاج اسماعیلی، مهدی؛ مطالعه آزمایشگاهی رفتار ساختمان‌های آجری تحت بارگذاری جانبی؛ پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۴.
- [6] Yañez, F., Astroza, M., Holmberg, A., and Ogaz, O.; "Behavior of confined masonry shear walls with large openings"; 13th World Conf. on *Earthquake Engineering*, No. 3438, 2004.
- [7] Castilla, E. and Marinilli, A.; "Recent experiments with confined concrete block masonry walls"; Boletín Técnico Imme Vol. 41 No. 2-3, 2003.
- [8] Riahi, Z.; "Performance-based seismic models for confined masonry walls"; Masters' thesis, Dept. of Civil Engineering, Univ. of British Columbia, Vancouver, 2009.
- [9] Maekawa, K., Pimanmas, A., Okamura, H.; "Nonlinear mechanics of reinforced concrete"; Spon Press, 2003.
- [۱۰] صالحی دلارستانی، ا.، سلطانی محمدی، م.، تسنیمی، ع.؛ «مقیاس غیرخطی المان اتصالی بنایی در برش و اعتبار سنجی آن»؛ مجله فنی و مهندسی مدرس، شماره ۳۶، صفحه ۷۹-۹۸، ۱۳۸۶.

