



محمد رضا تابش پور
 استادیار دانشکده مهندسی مکانیک
 دانشگاه صنعتی شریف

لزوم بررسی دقیق شکست برون صفحه دیوار و ارائه جزئیات مناسب برای مهار آن بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ (بار زلزله) و مبحث ششم مقررات ملی (بار باد)

چکیده

دیوارهای پرکننده و جداکننده، جزء مهم ترین قسمت های ساختمان هستند که باید در مراحل طراحی و اجرا، توجه ویژه ای به آنها شود. تقریباً در تمامی سازه ها، دیوار جداکننده آجری دارای سهم عمده ای از حجم مصالح است. معمولاً به علت مجاورت این دیوارها با قاب سازه ای، سختی و مقاومت این دیوارها بروز می کند. برای جلوگیری از تقابل دیوار با قاب، باید دیوار از قاب جدا شود. سپس برای جلوگیری از شکست برون صفحه دیوار، تمهیدات خاصی اندیشیده شود. جلوگیری از شکست برون صفحه دیوار پرکننده، تأثیر مهمی در کاهش خسارات و تلفات لرزه ای دارد. در این مقاله، مرور مختصری به شکست خارج از صفحه دیوار می شود و سپس جزئیات مناسبی برای جلوگیری از آن بر اساس محاسبات طراحی حاصل از بارگذاری بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ و مبحث ششم مقررات ملی، ارائه می شود.

واژه های کلیدی: دیوار پرکننده، جداگر (تیغه)، شکست خارج از صفحه.

مقدمه

یکی از متداول ترین مدهای شکست در سازه های آجری، شکست خارج از صفحه دیوارها است. از آنجا که معمولاً دیوارهای آجری دارای مقاومت برشی خوبی در داخل صفحه هستند، چنانکه توزیع سختی و مقاومت اعضایی که بار زلزله را تحمل می کنند، به نحو مناسبی بوده و مشکل پیچش نیز موجود نباشد، تنها مود محتمل برای شکست، به صورت شکست خارج از صفحه دیوار است. برای جلوگیری از این مود شکست، باید در سازه های بنایی، دیوارهای عمود بر هم دارای اتصالی مناسب و نیز تمامی دیوارها به نحو مناسبی به سقف متصل باشند. در سازه های اسکلتی نیز باید در بالای دیوار به نحو مناسبی تکیه ایجاد شود.

شکست برون صفحه دیوار

در حالت شکست برون صفحه ای معمولاً یکی از مدهای زیر رخ می دهد:

شکست خمشی در راستای قائم

اگر تنش کششی منجر به شکست، موازی درزهای افقی آجرها باشد، ترک قائم در ارتفاع دیوار به وجود می آید. این شکست معمولاً هنگامی رخ می دهد که طول دیوار بزرگ باشد.

شکست خمشی در راستای افقی

اگر تنش کششی منجر به شکست، عمود بر درزهای افقی آجرها باشد، ترک افقی در میانه دیوار به وجود می آید. این شکست



شکل ۴- شکست خارج از صفحه دیوار آجری در یک سازه فولادی مهم
(بم ۱۳۸۲)



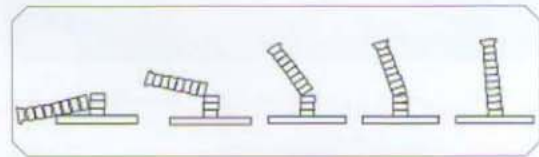
شکل ۵- شکست خارج از صفحه دیوار آجری در یک سازه فولادی
(بم ۱۳۸۲)



شکل ۶- شکست خارج از صفحه دیوارها و ریزش نما در یک
ساختمان فولادی (بم ۱۳۸۲)

در شکل ۷، نمونه‌ای از شکست خارج از صفحه دیوار سنگی به علت اتصال نداشتن به سقف چوبی، نشان داده شده است. همان‌طور که می‌دانید اتصال مکانیکی ایجاد شده توسط آجرچینی در گوشه‌های دیوارهای متعامد، برای جلوگیری از شکست خارج از صفحه کافی نیست. در این سازه، دیوارها بسیار سنگین هستند و به سقف هیچ اتصالی نداشته‌اند. توجه شود که اگر جهت زلزله عمود بر جهت فعلی بود، آنگاه

معمولاً هنگامی رخ می‌دهد که ارتفاع دیوار بزرگ باشد. یک نکته مهم در خصوص مقاومت خمشی برون‌صفحه‌ای، ناچیز بودن آن در مقایسه با مقاومت درون‌صفحه دیوار است. این امر به علت تفاوت شدید ممان اینرسی مقطع در راستای طولی و ضخامت دیوار است. در شکل ۱، به‌طور شماتیک شکست برون‌صفحه دیوار در حالت عدم وجود تکیه‌گاه مناسب در بالای آن مشاهده می‌شود.



شکل ۱- فروریزش دیوار در خمش خارج از صفحه

در شکل‌های ۲ و ۳، شکست جزئی و کامل دیوار آجری در خمش خارج از صفحه نشان داده شده است. در شکل‌های ۴ تا ۶، نمونه‌هایی از شکست خارج از صفحه دیوار در زلزله بم مشاهده می‌شود.



شکل ۲- فرو ریزش جزئی و شکست دیوار برگرنده آجری غیرمسلح در
خمش خارج از صفحه (ساختمان تجاری در اندونزی، سوماترا ۱۹۸۷)



شکل ۳- شکست خارج از صفحه دیوار به‌صورت کلی و جزئی در
ساختمان فولادی (منجیل ۱۳۶۹)

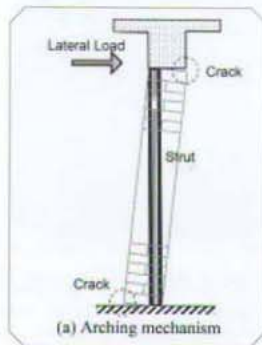
شکست مشابهی در شکل ۱۰، نشان داده شده است.



شکل ۱۰- شکست خارج از صفحه دیوار و چرخش آن مانند یک جسم صلب (اندونزی)

مودهای شکست نشان داده شده در شکل های ۹ و ۱۰، ممکن است در دیوارهای غیرباربر در سازه های بنایی (موازی تیرریزی) و یا در دیوارهای پرکننده در سازه های اسکلتی رخ دهد. در چنین حالتی به علت کنش قوسی، معمولاً دیوار فرو نمی ریزد. در این حالت، دیوار در خمش برون صفحه مانند یک دستک قطری عمل می کند (شکل ۱۱).

در شکل های ۱۲ تا ۱۷، نمونه هایی از شکست خارج از صفحه دیوار در ساختمان های مختلف (بنایی یا نیمه اسکلتی) نشان داده شده است.



شکل ۱۱- دستک قطری در خمش برون صفحه



شکل ۱۲- خرابی و شکست خارج از صفحه ایجاد شده در ساختمان مدرسه (کالیفرنیا ۱۹۳۳)

دیوارهای غیرباربر که هیچ اتصالی به سقف ندارند باید برش ناشی از زلزله را تحمل می کردند. از آنجا که امکان انتقال این برش وجود نداشت، ساختمان کاملاً منهدم می شد.



شکل ۷- شکست خارج از صفحه دیوارهای غیر باربر در یک ساختمان سنگی یا سقف چوبی (مونتنگرو، ۱۹۷۹)

در سازه های بنایی بر حسب جهت زلزله نسبت به جهت تیرریزی ممکن است مطابق شکل های ۸ و ۹، شکست خارج از صفحه دیوار رخ دهد.



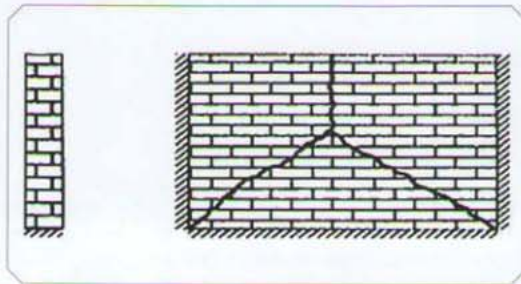
شکل ۸- شکست خارج از صفحه دیوار کلاس به علت انسجام نامناسب به سقف (یم ۱۳۸۲)



شکل ۹- جدایش دیوار از سقف و کناره ها به علت اتصال نامناسب (سیلاخور)



شکل ۱۷- شکست خارج از صفحه دیوار بنایی غیر مهندسی (سیلاخور)



شکل ۱۸- خطوط تسلیم در شکست خارج از صفحه دیوار که در امتداد فوقانی آزاد است



شکل ۱۹- شکست خارج از صفحه دیوار که در امتداد فوقانی آزاد است (سیلاخور)

در شکل های ۲۰ تا ۲۴، نمونه هایی از شکست خارج از صفحه دیوار در ساختمان های با سقف شیروانی یا سوله مشاهده می شود.



شکل ۱۳- شکست خارج از صفحه در دیوار یک مدرسه (کالیفرنیا، ۱۹۳۵)



شکل ۱۴- نمونه ای از شکست خارج از صفحه دیوار



شکل ۱۵- شکست خارج از صفحه دیوارهای طبقه دوم



شکل ۱۶- شکست خارج از صفحه دیوار در طبقه دوم به علت اتصال نامناسب آن با سقف



شکل ۲۴- شکست خارج از صفحه دیوار مثلثی و شکست پنجره به بیرون (بم ۱۳۸۲) (خطوط سفید، استرات‌های مورد نیاز را نشان می‌دهد که اجرا نشده است)



شکل ۲۰- شکست خارج از صفحه دیوار باربر و اتصال نامناسب آن به سقف خرابایی (هند)



شکل ۲۱- ریزش کامل دیوار در شکست خارج از صفحه (اندونزی)



شکل ۲۲- نمونه‌ای از شکست خارج از صفحه دیوار در ساختمان بنایی دو طبقه شیروانی



شکل ۲۳- شکست خارج از صفحه دیوار به علت اتصال نامناسب با سقف

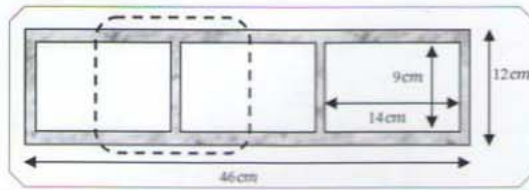
راه حل

راه جلوگیری از مود شکست خارج از صفحه انواع دیوار، اجرای جزئیات مناسب برای ایجاد تکیه‌گاه فوقانی برای دیوار بر اساس محاسبات و بارگذاری مناسب می‌باشد. در اینجا به‌عنوان نمونه، سیستمی نوین برای دیوار جداکننده با قابلیت اجرای صحیح ارائه می‌شود.

این نوع دیوار به‌صورت پانل ساخته شده از نوعی خمیره کامپوزیت است که با نوعی پلاستیک، مسلح می‌شود. در شکل ۲۵، اجرای درز بین دیوار و ستون و پر کردن آن با مصالح فوم نرم، نشان داده شده است. همچنین در شکل ۲۶، روش اجرای نبشی ساخته شده از ورق برای ایجاد تکیه‌گاه در سقف مشاهده می‌شود. این نوع اجرا برای سوله‌ها نیز مناسب است (شکل ۲۷).



شکل ۲۵- اجرای درز بین دیوار و ستون و پر کردن آن با مصالح فوم (پانل کامپوزیت مسلح با نام تجاری ایزی وال)



شکل ۲۸- مقطع پانل

ممان اینرسی مقطع I برابر است با:

$$I = \frac{15 \times 12^3}{12} - \frac{14 \times 9^3}{12} = 1310 \text{ cm}^4$$

$$A = 15 \times 12 - 14 \times 9 = 54 \text{ cm}^2$$

۲- خواص مکانیکی پانل

بر اساس آزمایش‌های متعددی که به صورت هدفمند برای تعیین خواص مکانیکی و مقاومتی این نوع پانل انجام شده است، می‌توان مقادیر زیر را برای طراحی در نظر گرفت:

مقاومت کششی حاصل از آزمایش: $\sigma_t = 4.3 \text{ kg/cm}^2$

تنش کششی مجاز: $f_{ta} = \frac{4.3}{1.5} = 2.9 \text{ kg/cm}^2$

تنش کششی مجاز در ترکیب بار زلزله یا باد:

$$f_{ta} = 2.9 \times 1.33 = 3.9 \text{ kg/cm}^2$$

مقاومت فشاری حاصل از آزمایش: $\sigma_c = 18 \text{ kg/cm}^2$

تنش فشاری مجاز در فشار محض: $f_c = 12 \text{ kg/cm}^2$

تنش فشاری مجاز در خمش: $f_c = 0.7 \times 12 = 8.5 \text{ kg/cm}^2$

مقاومت برشی حاصل از آزمایش: $\sigma_v = 4.5 \text{ kg/cm}^2$

تنش برشی مجاز: $f_{va} = 3 \text{ kg/cm}^2$

تنش برشی مجاز در ترکیب بار زلزله یا باد:

$$f_{va} = 3 \times 1.33 = 4 \text{ kg/cm}^2$$

مدول یانگ: $E = 5000 \text{ kg/cm}^2$

۳- مود تغییر شکل خارج از صفحه و مدل‌سازی

یکی از متداول‌ترین مودهای شکست در سازه‌های آجری، شکست خارج از صفحه دیوارها است. در حالت شکست برون صفحه‌ای معمولاً یکی از مودهای زیر رخ می‌دهد.



شکل ۲۶- روش اجرای نبشی ساخته شده از ورق برای ایجاد تکیه‌گاه در سقف



شکل ۲۷- اجرای پانل‌های کامپوزیت مسلح در سوله

محاسبات طراحی

ملاحظات مربوط به اجرای صحیح دیوار برای جلوگیری از رفتار خارج از صفحه و محاسبات طراحی در این زمینه معمولاً در کشور ما مورد توجه قرار نمی‌گیرد و اجرای دیوار بنایی به بنا واگذار می‌شود و معمولاً محاسبات خمش خارج از صفحه برای دیوارهای درونی و پیرامونی در دفترچه محاسباتی وجود ندارد. وجود نمونه‌های ساده محاسبات در این زمینه می‌تواند برای مهندسان مفید باشد. در ادامه، محاسبات طراحی برای نوعی پانل کامپوزیت مسلح که در بالا به آن اشاره شد، ارائه می‌شود.

۱- خواص مقطع پانل

در شکل زیر، مقطع پانل نشان داده شده است.

می‌توان دیوارهای درونی را اجرا کرد، به شرط کنترل جابه‌جایی، براساس استاندارد باید خیز نسبی قسمت میانی دیوار، کمتر از ۰/۰۰۵ باشد:

$$\frac{\delta}{h} < \frac{1}{200}$$

$$\delta = \frac{5wh^4}{384EI} = \frac{5wh^4}{384EI}$$

$$= \frac{5 \times 0.0255 \text{ kg/cm} \times 450^4}{384 \times 5000 \times 1310}$$

$$= 2.1 \text{ cm} < \frac{450}{200} \text{ cm} \quad \text{ok.}$$

۴-۲- کنترل برای بار باد

مطابق ضوابط ارائه شده در مبحث ششم، مقدار بار باد وارده به سطح بادگیر A ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F = PA$$

$$P = C_e C_q q$$

$$F = C_e C_q q A$$

C_e و C_q از جدول (۶-۶-۲) مبحث ششم و q از جدول (۶-۶-۱) مبحث ششم تعیین می‌شود.

۴-۲-۱- ساختمان ۶ طبقه در تهران:

از آنجا که طیف وسیعی از ساختمان‌ها در تهران کمتر از شش طبقه است در اینجا به‌طور نوعی، محاسبات برای یک ساختمان شش طبقه ارائه می‌شود.

$$F_{wind} = C_e C_q q A \quad \text{بار باد برای یک متر مربع دیوار}$$

$$= 1.9 \times 0.8 \times 50 \times 1 = 76 \text{ kg/m}^2 \quad \text{بار باد:}$$

$$= 0.0076 \text{ kg/cm}^2$$

$$w = 15 \text{ cm} \times 0.0076 \text{ kg/cm}^2 = 0.114 \text{ kg/cm}$$

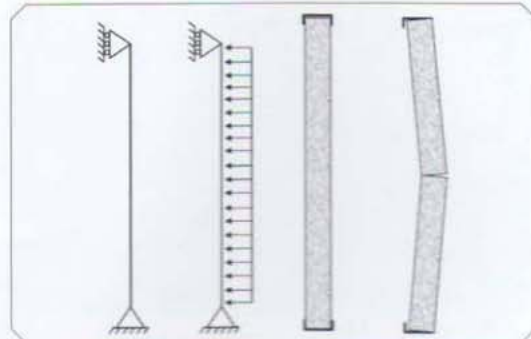
σ_c در مورد دیوار پرکننده بین قاب‌ها فقط ناشی از وزن دیوار است ولی در مورد دیوار موجود در سازه بنایی شامل وزن دیوار به علاوه سربار سقف است. البته توجه شود که در سازه بنایی، بار زلزله به طراحی خمش خارج از صفحه دیوار، حاکم می‌شود.

$$\sigma_t - \sigma_c \leq \sigma_{ta}$$

$$f_t = \frac{Mc}{I} - \frac{N}{A} \leq f_{ta}$$

طول واحد از دیوار در نظر گرفته شود.

$$M = \frac{wl^2}{8}$$



شکل ۲۹- مودهای تغییر شکل بیرون صفحه و مدل تیر دو سر مفصل

۴- کنترل و طراحی تحت بارهای جانبی

در اینجا بارگذاری زلزله بر اساس استاندارد ۲۸۰۰، بارگذاری بر اساس مبحث ششم مقررات ملی، کنترل‌های طراحی انجام می‌شود.

۴-۱- کنترل برای بار زلزله

نیروی اینرسی عمود بر دیوار بر اساس بند ۲-۶ استاندارد ۲۸۰۰ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$F_p = 0.7 AIW_p \quad (۴-۴)$$

$$F_p = \text{نیروی عمود بر صفحه دیوار}$$

$$W_p = \text{وزن دیوار و ملحقات آن}$$

نیروی اینرسی برابر است با:

$$F_p = 0.7 AIW_p$$

$$= 0.7 \times 0.35 \times 1.4 \times (35 + 15)$$

$$= 17 \text{ kg/m}^2 = 0.0017 \text{ kg/cm}^2$$

بار گسترده در پهنه ۱۵ سانتیمتری مساوی است با:

$$w = 15 \text{ cm} \times 0.0017 \text{ kg/cm}^2 = 0.0255 \text{ kg/cm}$$

ممان خمشی ناشی از این بار در ارتفاع دیوار به صورت زیر است:

$$M = \frac{wl^2}{8}$$

$$c = \frac{12}{2} = 6 \text{ cm}$$

$$I = 1310 \text{ cm}^4$$

تنش کششی ناشی از خمش در قسمت میانی دیوار برابر است با:

$$f_t = \frac{0.0255 \times h^2}{1310} \times 6$$

$$= 2.9 \Rightarrow h = 4.5 \text{ m}$$

یعنی در زلزله شدید، تا ارتفاع ۴/۵ متر بدون کلاف قائم

نتیجه گیری

با توجه به رفتار لرزه‌های سازه‌های دارای دیوار در زلزله‌های گذشته، می‌توان گفت که دیوارهای پرکننده و جداکننده، جزء مهم‌ترین قسمت‌های ساختمان هستند و باید در مراحل طراحی و اجراء توجه ویژه‌ای به آنها شود. در این مقاله علاوه بر مرور مختصری بر مود شکست خارج از صفحه دیوار، روش ساده طراحی و اجرای تیغه‌های جداکننده (پارتیشن‌ها) بر اساس بارگذاری‌های حاصل از استاندارد ۲۸۰۰ و مبحث ششم مقررات ملی، کنترل خمش خارج از صفحه برای نوع خاصی از پانل کامپوزیت مسلح، ارائه شد.

تشکر و قدردانی

از شرکت بنای رسیس (مبتکر و سازنده محصولات دیوار ایزی‌وال) به خاطر همکاری در ارائه تصاویر آموزشی روش اجرا و نصب پانل ایزی‌وال، تشکر می‌شود.

منابع

- ۱- آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش سوم، تهران، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ۱۳۸۴.
- ۲- طرح و اجرای ساختمان‌های با مصالح بنایی، مبحث هشتم مقررات ملی ساختمان، ۱۳۸۴.
- 3- Andrew Charleson, "SEISMIC DESIGN FOR ARCHITECTS", 2008 Elsevier.
- ۴- تابش پور، محمدرضا؛ دیوار پرکننده آجری در قاب‌های سازه‌ای، انتشارات فدک ایساتیس، تهران، ۱۳۸۸.
- ۵- تابش پور، محمدرضا؛ بهسازی لرزه‌ای قاب‌های سازه‌ای دارای دیوار پرکننده آجری، انتشارات فدک ایساتیس، تهران، ۱۳۸۸.
- ۶- تابش پور، محمد رضا؛ رفتار لرزه‌ای سازه‌های بنایی، انتشارات فدک ایساتیس، تهران، ۱۳۸۹.
- 7- IAEE (1986). "Guidelines for Earthquake-Resistant Non-Engineered Construction", International Association for Earthquake Engineering, Tokyo, Japan.
- ۸- عکس‌های مربوط به زلزله‌های بیم، عمدتاً از گزارش‌ها و تصاویر تهیه شده توسط افراد زیر است: حسن افشین، محمدرضا چناقلو، عبدالله قنبری.
- ۹- سروقدمقدم، عبدالرضا؛ گزارش تصویری زلزله درب آستانه سیلاخور، ۱۳۸۵.
- ۱۰- مبحث ششم مقررات ملی ساختمانی ایران، دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان، ۱۳۸۴.
- ۱۱- شرکت بنای رسیس، مبتکر و تولیدکننده پانل سبک ایزی‌وال به صورت کامپوزیت مسلح (<http://www.easywall.ir>).

$$c = \frac{13}{2} = 6.5 \text{ cm}$$

$$I = 1580 \text{ cm}^4$$

تنش کششی ناشی از خمش در وسط دیوار مساوی است با:

$$f_t = \frac{0.114 \times 280^2}{8} \times 6 - \frac{35}{54} = 4.4 = 1.2 f_{ta}$$

توجه شود که وجود نمای بیرونی و نازک کاری درونی در دیوارهای پیرامونی باعث افزایش ممان اینرسی می‌شود.

۳-۴- کنترل برای بار زلزله بر اساس آیین‌نامه جدید آمریکا

در ویرایش جدید آیین‌نامه آمریکا، نیروی وارده به دیوارها در ترازهای بالاتر ساختمان افزایش می‌یابد. این نیرو از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_p = \frac{0.4 a_p S_{DS} W_p I_p}{R_p} \left(1 + 2 \frac{z}{h}\right)$$

که بحرانی‌ترین حالت با فرض مقادیر زیر رخ می‌دهد:

$$S_{DS} = A(S+1) = 2.5A = 2.5 \times 0.35 = 0.875$$

$$a_p = 1.0$$

$$R_p = 2.5$$

$$I_p = 1.0 \text{ or } 1.5$$

$$\left(1 + 2 \frac{z}{h}\right) = 1 \text{ to } 3$$

پایین‌ترین طبقه ساختمان مسکونی در تهران:

$$F_{p-\min} = \frac{0.4 \times 1 \times 0.875 \times (35+15) \times 1}{2.5} \times 1 = 7 \text{ kg/m}^2$$

بالاترین طبقه بیمارستان در تهران:

$$F_{p-\max} = \frac{0.4 \times 1 \times 0.875 \times (35+15) \times 1.5}{2.5} \times 3 = 31.5 \text{ kg/m}^2$$

$$w = 31.5 \times 15 / 10000 = 0.047 \text{ kg/cm}$$

$$f_t = \frac{0.047 \times h^2}{8} \times 6 = 2.9 \Rightarrow h = 3.5 \text{ m}$$

محافظة کارانه:

یعنی بالاترین طبقه یک بیمارستان در تهران بدون کلاف قائم تا ۳/۵ متر، امکان اجرا دارد.