دیوارهای برشی بتنی در ساختمان‌های فولادی

مهدی هادیزاده بزاز
کارشناس ارشد سازه دفتر فنی استانداری خراسان رضوی
تلفن ۷۶۵۳۳۴۴-۰۵۱۱، پست الکترونیکی : *hadizadeh@khanehomran.com*
علی سیفی
کارشناس ارشد سازه و عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی
تلفن ۶۰۸۹۰۰۰-۰۵۱۱، پست الکترونیکی : *Seifi@khanehomran.com*

۱- مقدمه

دیوار سازه‌ای یکی از سیستم‌های بسیار مناسب برای مقابله با نیروهای جانبی است. از آنجا که این دیوارها، قسمت عمده نیروهای جانبی وارد بر سازه و برش حاصل از آن را جذب می‌کنند، به نام دیوارهای برشی شناخته می‌شوند. مزایای دیوار برشی را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- افزایش سختی ساختمان و افزایش ضریب ایمنی در مقابل شکست و ریزش و کاهش خسارت به اعضای غیر سازه‌ای.
- کنترل تغییرمکان جانبی ساختمان (*Drift*). تغییرمکان جانبی سازه‌های دارای دیوار برشی در مقایسه با سازه‌های دارای بادبند کمتر می‌باشد و این امر دلیل استفاده از این سیستم در بسیاری از سازه‌ها است.
- امکان جانمایی دیوار در فضاهای محدود (مانند هسته آسانسور) و فضاهای نامتعارف (مانند پشت راه پله‌های گرد) که در این مکان‌ها امکان جانمایی بادبند وجود ندارد.

اگر نسبت ارتفاع به طول دیوار کمتر از ۲ یا ۳ باشد، به آن دیوار برشی کوتاه می‌گویند. دیوارهای برشی کوتاه در برابر خمش مقاومت بیشتری دارند ولی در برابر برش از مقاومت کمی برخوردار هستند و لذا در این دیوارها رفتار برشی حاکم است. توصیه شده است که در این دیوارها فولادگذاری تا حد امکان یکنواخت باشد و به سمت لبه قائم تمرکز بیشتری داشته باشد. چون شکست خمشی دیوارهای برشی کوتاه با ترکهای بزرگ قطری همراه است، بنابراین باید از مقاومت برشی بتن صرف نظر شود. اگر نسبت ارتفاع به طول دیوار زیاد باشد، به آن دیوار برشی بلند (طره‌ای) می‌گویند. رفتار این دیوارهای برشی بر خلاف نامشان، اغلب خمشی است.

۲- انواع دیوارهای برشی به جهت شکل مقطع

دیوارهای برشی به صورت دوبعدی (تیغه‌ای) و یا سه بعدی اجرا می‌شوند. دیوارهایی که در دو انتهای خود دارای بال هستند (مقاطع بالدار)، از پایداری و شکل‌پذیری بیشتری در مقایسه با دیوارهای بدون بال برخوردار هستند بنابراین پیشنهاد می شود از این گونه مقاطع استفاده شود. شکل ۱ یازده مقطع دیواربرشی را نشان می‌دهد که مقطع (الف) دیوار برشی به صورت دوبعدی (تیغه‌ای) و ده مقطع دیگر به صورت بالدار هستند.

(شکل ۱) مقاطع متداول در دیوارهای برشی

برخی از بالها دارای طول زیاد هستند. این مطلب در مقاطع ه و ح قابل ملاحظه است. در طراحی این مقاطع نمی‌توان تمام بال را در باربری سهیم دانست. مطابق آیین‌نامه آبا، عرض موثر اندازه‌گیری شده از بر جان در هر سمت، که در محاسبات به کار برده می‌شود نباید بیشتر از مقادیر زیر در نظر گرفته شود:

الف- نصف فاصله بین جان دیوار تا جان دیوار مجاور

ب- ۱۰ درصد ارتفاع کل دیوار

۳- ضریب رفتار دیوارهای برشی

سال‌ها تصور می‌شد که دیوارهای برشی رفتار تردی دارند و به همین جهت رفتار آنها در قلمرو ارتجاعی و برای مقاومت در برابر زلزله‌های متوسط، کارساز انگاشته می‌شد. دلیل اصلی این تصور در این بود که برای تامین رفتار نرم دیوارها جزئیات آرماتورگذاری آن چنان که لازم است رعایت نمی‌شود و از این جهت شکست آنها از نوع برشی بود. بنابراین برخی از آیین نامه‌ها شکل‌پذیری آنها را در مقایسه با قابهای خمشی کمتر در نظر می‌گرفتند. محققین با بررسی‌هایی که انجام دادند ابراز کردند که می‌توان انرژی زلزله را در دیوارها همانند قاب‌های خمشی مستهلک کرد. شرط اساسی در تحقق چنین رفتاری موارد زیر می باشد:

- فولادگذاری مناسب با رعایت جزئیات خاص جهت افزایش شکل‌پذیری. بدین منظور آیین نامه بتن ایران ضوابطی را در فصل بیستم ارایه نموده است..
- برای اینکه رفتار دیوارها وارد مرحله غیر ارتجاعی شود لازم است شالوده دیوار آنقدر قوی باشد که در انتقال نیروها به زمین مشکلی برای دیوار ایجاد نکند.
- لازم است رفتار دیافراگم‌ها (کف‌ها) به گونه‌ای باشد که از طریق اتصال صلب آنها به دیوار کلیه نیروها از کف به دیوار منتقل گردد.

دیوارهای برشی می‌توانند در سیستم قاب‌های ساختمانی ساده فولادی و یا در سیستم قابهای خمشی بتنی و یا فولادی قرار گیرند. در صورت ترکیب دیوار با سیستم قاب‌های خمشی، سیستم را دوگانه می‌نامند.

در آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله- استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش دوم - ۱۳۷۸)، ضریب رفتار فقط برای دیوارهای برشی با شکل‌پذیری معمولی و برابر ۷ ارائه شده است.

آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله - استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش سوم - ۱۳۸۴)، ضریب رفتار سیستم قاب-های ساده ساختمانی و دیوارهای برشی را برای شکل‌پذیری‌های مختلف به صورت زیر ارائه نموده است:

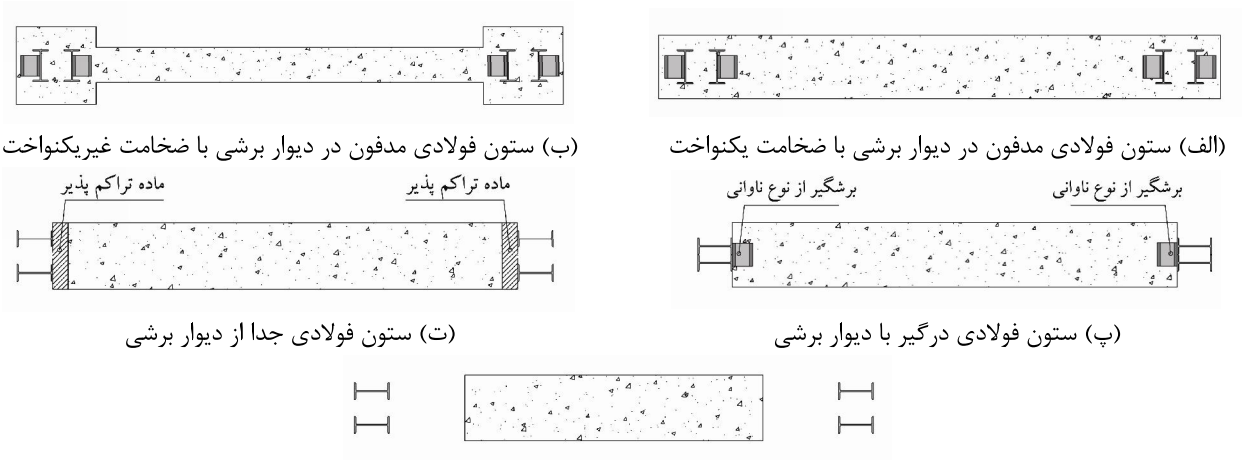
سیستم سازه	ضریب رفتار

قاب‌های ساختمانی ساده + دیوار برشی با شکل‌پذیری معمولی	۵
قاب‌های ساختمانی ساده + دیوار برشی با شکل‌پذیری متوسط	۷
قاب‌های ساختمانی ساده + دیوار برشی با شکل‌پذیری ویژه	۸

استفاده از دیوارهای برشی با حد شکل‌پذیری معمولی در مناطق زلزله خیز زیاد و خیلی زیاد توصیه نمی‌شود و در این مناطق باید از دیوارهای برشی با حد شکل‌پذیری متوسط و یا زیاد استفاده نمود که به جزء در موارد خاص که الزام به استفاده از شکل‌پذیری زیاد وجود دارد، غالبا از حد شکل‌پذیری متوسط استفاده می‌شود.

۴- روش‌های اجرای دیوار برشی در ساختمان فولادی

با توجه به نظر مهندس محاسب و محدودیت‌های اجرایی، می‌توان دیوار برشی را به یکی از روش‌های نشان داده شده در شکل ۲ اجرا نمود.



(الف) ستون فولادی مدفون در دیوار برشی با ضخامت یکنواخت

(ب) ستون فولادی مدفون در دیوار برشی با ضخامت غیریکنواخت

(پ) ستون فولادی درگیر با دیوار برشی

(ت) ستون فولادی جدا از دیوار برشی

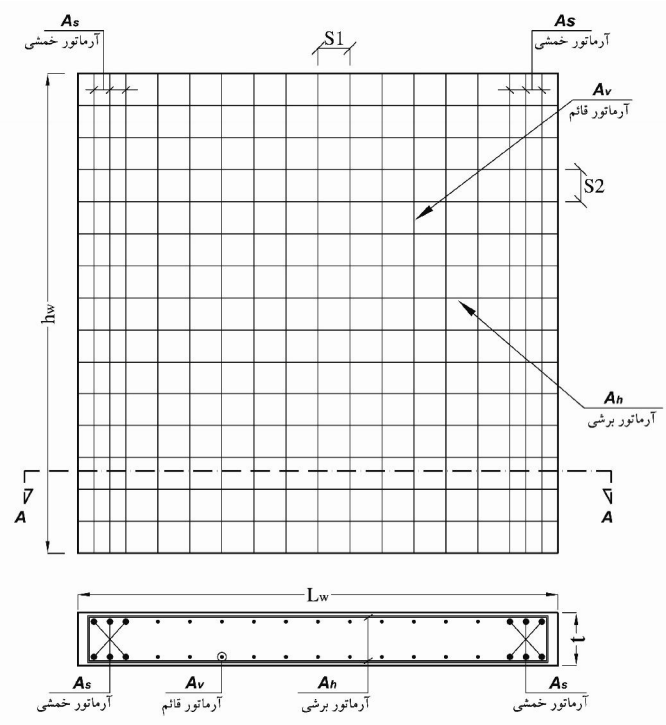
(ث) ستون فولادی جدا از دیوار برشی

(شکل ۲) روش‌های مختلف اجرای دیوار برشی

شکل ۲-الف اجرای ستون‌های فولادی در داخل دیوار برشی با ضخامت یکنواخت را نشان می‌دهد. در این روش اجرا، ضخامت دیوار به نحوی تعیین می‌شود که امکان قرار گرفتن ستون و پوشش مناسب برای آرماتورها وجود داشته باشد. این روش به علت راحتی اجرا، پرکاربردترین روش استفاده از دیوار برشی در ساختمان‌های فولادی است. شکل ۲-ب اجرای ستون های فولادی در دیوار برشی با ضخامت غیریکنواخت را نشان می‌دهد که به سبب صعوبت اجرا و قالب‌بندی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در شکل ۲-پ ستون در دیوار مدفون نمی‌شود اما با دیوار درگیر می باشد که این امر باعث افزایش بعد ستون‌ها و غیر اقتصادی شدن طرح شده که کمتر مورد استفاده است. در شکل ۲-ت و ۲-ث ستون جدا از دیوار برشی اجرا می‌شود.

۵- آرماتورهای قائم و افقی دیوار برشی

در مقطع دیوار برشی نیروهای داخلی لنگر خمشی، نیروی محوری، نیروی برشی و لنگر پیچشی وجود دارد. از آنجا که مقدار لنگر خمشی از نیروی محوری بسیار بیشتر است، رفتار و آرماتورگذاری دیوارها بیشتر شبیه تیرها می-باشد. شکل ۳ انواع آرماتورهای یک دیوار برشی را معرفی می‌کند.



(شکل ۳) آرماتورهای دیوار برشی

آرماتورهای خمشی برای افزایش مقاومت خمشی در دیوار قرار داده می شوند و بهینه است که تا حد امکان در دو سمت دیوار جایگذاری شود و در بین آرماتورهای خمشی آرماتور قائم به مقدار حداقل اجرا می‌گردد. در اغلب موارد به سبب مشکلات اجرایی، آرماتورهای خمشی در دو سمت دیوار متمرکز نشده و به صورت یکنواخت در طول دیوار برشی توزیع می‌گردد که در این حالت آرماتورهای قائم همان آرماتورهای خمشی دیوار برشی هستند. آرماتورهای افقی به عنوان آرماتورهای برشی عمل نموده و سبب افزایش مقاومت برشی مقطع می‌شوند.

در ادامه ضوابط مربوط آرماتورهای دیوار قائم و افقی ارائه می‌گردد:

- نسبت آرماتور افقی (ρ_h) و نسبت آرماتور قائم (ρ_v) از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\rho_h = \frac{A_h}{S_2 \times t}$$

$$\rho_v = \frac{A_v}{S_1 \times t}$$

در این روابط در صورت وجود یک شبکه آرماتور، A_v سطح مقطع یک میلگرد عمودی و A_h سطح مقطع یک میلگرد افقی بوده و در صورت وجود دو شبکه آرماتور، سطح مقطع دو میلگرد می باشند.

- حداقل نسبت آرماتور افقی ۰/۰۰۲۵ می باشد و نسبت آرماتور قائم نبایدکمتر از ۰/۰۰۲۵ و یا رابطه زیر باشد.

$$\rho_v = 0.0025 + 0.5(2.5 - \frac{h_w}{\ell_w})(\rho_h - 0.0025)$$

- فاصله بین میلگردهای افقی و قائم نباید از مقادیر زیر بیشتر باشد:

حداکثر فاصله میلگردهای قائم $S_1 \le \min(3t, \frac{\ell_w}{3}, 350mm)$

حداکثر فاصله میلگردهای افقی $S_2 \le \min(3t, \frac{\ell_w}{5}, 350mm)$

- در دیوارهای باضخامت بیش از ۲۵۰ میلیمتر استفاده از دو شبکه میلگرد ضروری است.
- پیشنهاد می شود جهت سهولت بتن‌ریزی فاصله میلگردها از ۱۰۰ میلیمتر کمتر نشود.
- فاصله میلگردهای قائم در اجزا لبه نباید از ۲۰۰ میلیمتر بیشتر شود.
- نسبت آرماتور قائم در هیچ ناحیه‌ای نباید از ۶ درصد بیشتر باشد. در دیوارهای با شکل‌پذیری متوسط و زیاد این مقدار به ۴ درصد محدود می‌شود. این مقدار در محل وصله ها نیز باید رعایت گردد. حال اگر کلیه وصله‌ها در یک محل انجام شود، حداکثر نسبت آرماتور به ۲ درصد محدود می-شود.
- آرماتورهای افقی دیوار باید به قلاب استاندارد ختم شوند و آرماتورهای قائم لبه دیوار را در برگیرند و یا به وسیله رکابهایی که دارای قطر و فاصله مشابه آرماتورهای افقی هستند و به آن وصله می‌شوند، نگهداری شود.
- در دیوارهایی که دارای اجزای لبه‌ای هستند، آرماتورهای افقی دیوار باید به طول مهاری درداخل اجزای لبه ای مهار شوند.

۶- آرماتورهای عرضی ویژه

به سبب وجود نیروی محوری و لنگر خمشی در مقطع دیوار، تنش‌های قائم در دو سمت دیوار زیاد می‌باشد که آیین‌نامه برای این نواحی ضوابط ویژه‌ای را از جمله آرماتورهای عرضی ویژه در نظر گرفته است. طبق آیین‌نامه بتن ایران در نواحی که تنش فشاری (ناشی از بارهای قائم و خمش در حالت نهایی) از $0.2f_c$ بیشتر گردد، باید آرماتورگذاری عرضی ویژه قرار داده شود که به این نواحی جزء لبه‌ای گفته می‌شود. در نواحی که تنش فشاری از $0.15f_c$ کمتر باشد، می‌توان آرماتورگذاری عرضی ویژه را قطع کرد.

در دیوارهای با ضابطه شکل‌پذیری متوسط باید قطر میلگردهای عرضی از ۸ میلیمتر کمتر نباشد و فاصله سفره میلگردهای عرضی ویژه در ارتفاع دیوار نباید از مقادیر زیر بیشتر باشد:

$$S \le \min(8d_b, 24d_S, \frac{t}{2}, 150mm)$$

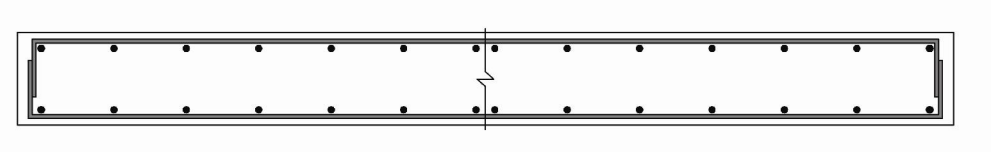
در این رابطه d_b کوچکترین میلگرد طولی دیوار، d_S قطر خاموت ها و t ضخامت دیوار می باشد.

آرایش میلگردها در طول ناحیه جزء لبه ای باید مشابه ضوابط ستون‌ها رعایت گردد.

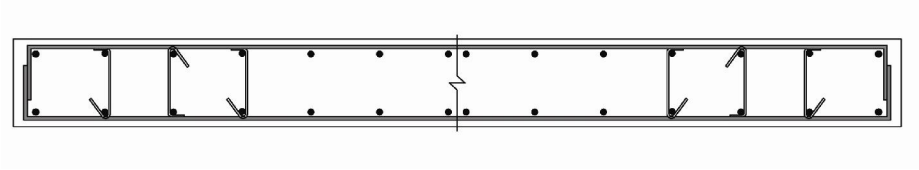
۷- محدودیت ابعاد در دیوارها

در آیین‌نامه آبا برای دیوارهای برشی با شکل‌پذیری معمولی محدودیت خاصی ارائه نشده است. در دیوارهای برشی با شکل‌پذیری متوسط و زیاد نباید ضخامت دیوار از ۱۵۰ میلیمتر و عرض جزء لبه‌ای از ۳۰۰ میلیمتر کمتر باشد.

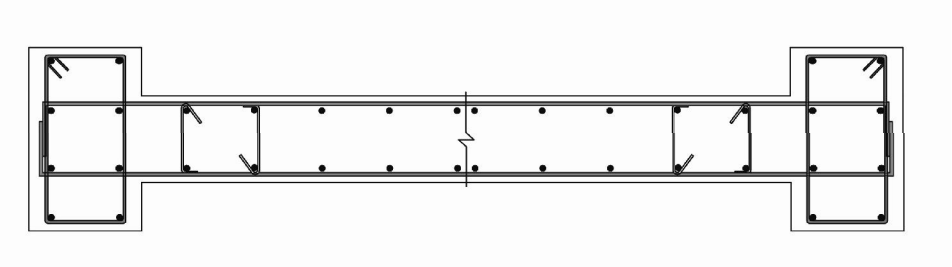
علت افزایش بعد در محل جزء لبه‌ای جلوگیری از کمانش دیوار و افزایش شکل‌پذیری دورانی است. شکل ۴ مقطع یک دیوار برشی بدون جزء لبه ای، با جزء لبه هم عرض دیوار و با جزء لبه پهنتر از دیوار را نشان می‌دهد.



(الف) مقطع دیوار برشی بدون جزء لبه‌ای



(ب) مقطع دیوار برشی با جزء لبه‌ای هم عرض دیوار



(پ) مقطع دیوار برشی با جزء لبه‌ای پهنتر از دیوار

(شکل ۴) جزء لبه‌ای در دیوار برشی

۸- اعضای فولادی در دیوارهای برشی

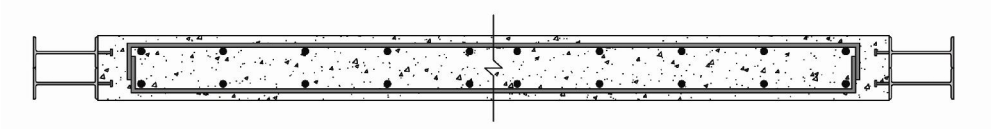
در صورتی که دیوار برشی در سازه فولادی اجرا گردد، در اکثر موارد وجود اعضای فولادی نظیر تیر و ستون در دیوار غیر قابل اجتناب است. بنابراین باید تمهیدات خاصی در اجرای دیوارهای برشی در نظر گرفته شود.

۸-۱- ستون‌های فولادی در دیوارهای برشی

ستون‌های فولادی به شکل‌های مختلف در دیوارهای برشی استفاده می‌شوند. در ادامه دو روش متداول اجرای ستون‌های فولادی در دیوار برشی شرح داده می‌شود:

الف- اجرای ستون به صورت غیرمدفون در دیواربرشی

در این روش، ستون‌ها خارج از دیوار برشی اجرا می‌شوند که یا توسط برشگیرها به دیوار برشی اتصال می‌یابند و یا با ایجاد فاصله توسط مواد تراکم‌پذیر از دیوار برشی جدا می‌شوند. شکل ۵ نمونه‌ای از اجرای ستون غیرمدفون متصل به دیواربرشی را نشان می‌دهد.



(شکل ۵) نمونه‌ای از اجرای ستون غیرمدفون متصل به دیواربرشی

در طراحی این دیوارها، باید ستون‌ها برای تحمل لنگر خمشی و نیروی محوری و مقطع دیوار بتن مسلح برای تحمل نیروی برشی طراحی گردد. در دیوارهای با شکل‌پذیری متوسط و زیاد، ستون‌های فولادی غیرمدفون باید برای ترکیب بارهای ویژه کنترل شوند. این ترکیب بارها طبق مقررات ملی مبحث دهم به صورت زیر می‌باشد:

(الف) فشار محوری

$$P_{DL} + 0.7P_{LL} + \Omega_0 P_{EL} \le P_C$$

$$P_c = 1.7F_a.A$$

(ب) کشش محوری

$$0.85P_{DL} + \Omega_0 P_{EL} \le P_T$$

$$P_T = F_y.A$$

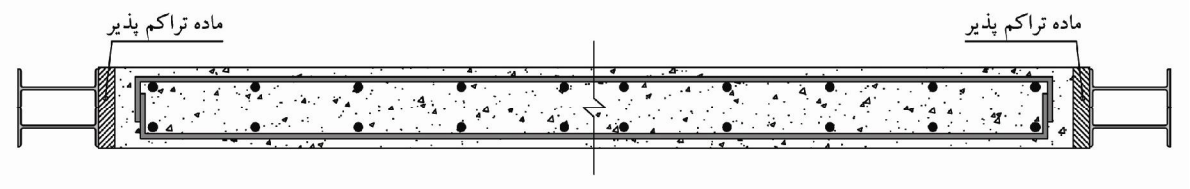
در روابط فوق مقدار نیروهای محوری P_{DL}، P_{LL} و P_{EL} باید با رعایت علامت جبری آنها استفاده شود. مقدار Ω_0 برابر ۳ منظور می‌گردد.

برای انتقال مناسب برش بین دیوار و ستون فولادی، باید برشگیر روی ستون اجرا شود. این برشگیرها را می‌توان در جهت اطمینان برای ظرفیت کامل ستون طراحی نمود که باید در ضوابط شکل‌پذیری متوسط و زیاد، ظرفیت برشی برشگیرها ۲۵ درصد کاهش یابد.

مزیت این دیوارها، اجرای ساده آنها می‌باشد اما به دلایل زیر در ساختمان‌های بلند، استفاده از آن پیشنهاد نمی‌شود:

- از آنجا که ستون‌های مجاور دیوار باید نیروی محوری و لنگر خمشی وارد بر مقطع دیوار را تحمل کنند و همچنین برای بارهای ویژه کنترل شوند، لذا مقطع ستون‌ها بزرگ می‌شود که معمولاً اقتصادی نمی‌باشد.
- به دلیل وجود نیروی محوری زیاد ناشی از زلزله در ستون، ابعاد کف ستون‌ها بزرگ و تعداد آرماتورهای مهاری زیاد می‌باشد.
- به دلیل تمرکز نیرو در محل ستون، تمهیدات خاصی در طراحی فونداسیون باید لحاظ گردد.
- این نوع دیوارهای برشی را نمی‌توان با نرم افزارها طراحی نمود. به سبب اینکه برنامه با فرض خطی بودن کرنش، نیروها را بین دیوار و ستون‌ها به نسبت سختی توزیع می‌نماید که این فرض صحیح نمی‌باشد.

در پروژه‌های مقاوم سازی که دیوار برشی بین دو ستون اجرا می‌گردد، جهت پرهیز از تداخل عملکرد دیوار برشی و ستون می‌توان دیوار برشی را به صورت شکل ۶ اجرا نمود. در این حالت تمام نیروها توسط دیوار تحمل شده و سبب افزایش مقطع ستون نمی‌گردد.

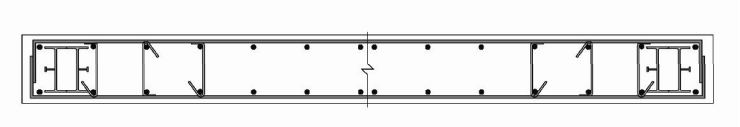


(شکل ۶) نمونه‌ای از اجرای دیواربرشی غیرمتصل به ستون

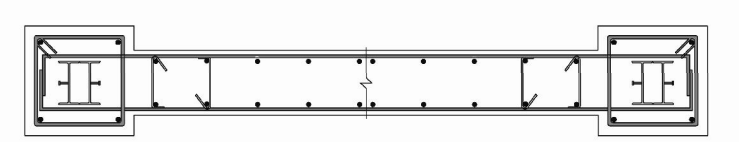
این روش اجرایی فقط در دیوارهای برشی تیغه‌ای (دوبعدی) کاربرد دارد و نمی‌توان با این سیستم دیوارهای برشی سه بعدی ایجاد نمود.

ب- ستون مدفون در دیوار برشی

اگر ستون فولادی در دیوار برشی مدفون گردد، می‌توان تحلیل را بر اساس مشخصات هندسی مقطع تبدیل یافته انجام داد. بدین معنی که ستون فولادی می‌تواند معادل آرماتور در دیوار برشی عمل نماید. شکل ۷ نمونه هایی از این نوع دیوار برشی را نشان می‌دهد. در شکل ۷-الف دیوار برشی با عرض یکنواخت و در شکل ۷-ب بعد دیوار در محل ستون بزرگتر انتخاب شده است.



(الف) دیوار با عرض یکنواخت



(ب) دیوار با عرض متفاوت

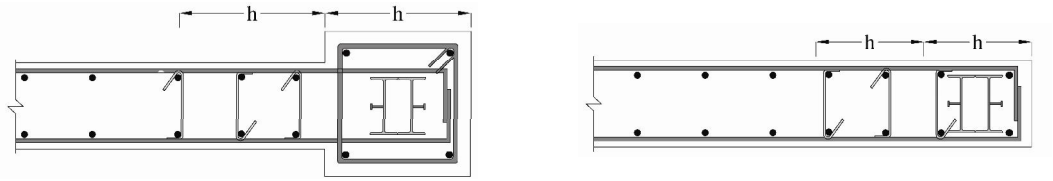
(شکل ۷) دیوار برشی با ستون مدفون

ستون‌های مدفون درون دیوارهای برشی دارای بعد بزرگی نیستند و در اکثر موارد امکان جانمایی آنها درون دیوار برشی با عرض یکنواخت وجود دارد. اگر وجود جزء مرزی در دیوار برشی الزامی باشد، ناگزیر به رعایت بعد حداقل ۳۰۰ میلیمتر در دو گوشه خواهیم بود که به دلیل سهولت در اجرا، این بعد در تمام طول دیوار رعایت می‌گردد و منجر به اجرای دیوار با ضخامت حداقل ۳۰ سانتیمتر یکنواخت در تمام طول دیوار می‌شود.

در مواردی که بعد ستون بزرگ باشد و یا نسبت آرماتور طولی با لحاظ کردن سطح مقطع ستون مدفون از ۴ درصد بیشتر شود، باید از دیوار شکل ۷- ب استفاده کرد.

در طراحی ستون مدفون در دیوار برشی، باید نکات زیر رعایت گردد:

- ستون فولادی قرار گرفته در دیوار باید بتواند بارهای مرده به علاوه بار زنده حین اجرا را قبل از گیرش بتن تحمل نماید.
- با توجه به اینکه در این روش مقطع ستون کوچک به دست می‌آید، باید ابعاد ستون به گونه‌ای انتخاب شود که امکان اجرای اتصال مناسب پل‌های وارده به ستون فراهم گردد.
- برای انتقال مناسب برش میان دیوار و ستون فولادی، باید برشگیر به کار رود.
- آنجا که احتمال جدایی دیوار از نیمرخ فولادی زیر اثر بارهای لرزه‌ای شدید وجود دارد، در دیوارهای با شکل‌پذیری متوسط و زیاد، فولاد عرضی جزء لبه باید به اندازه $2h$ در داخل دیوار ادامه یابد. h بعد جزء لبه‌ای در راستای دیوار می‌باشد (شکل ۸).



(شکل ۸) جزء لبه‌ای در دیوار برشی

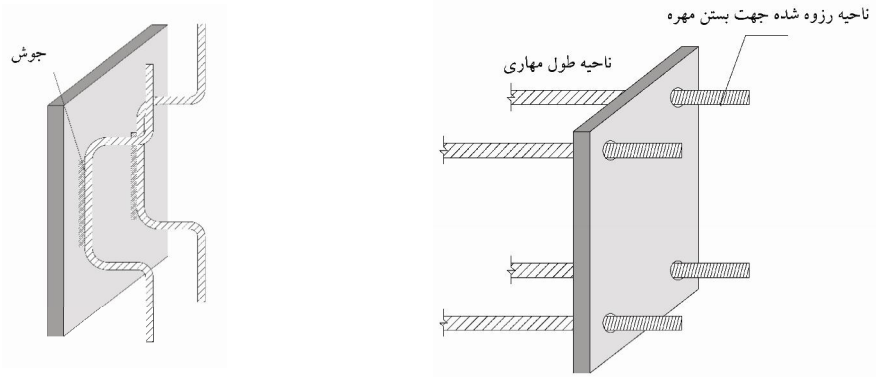
۸-۲- تیر فولادی در دیوارهای برشی

در بسیاری از موارد تیرهای فولادی به دلایل اجرایی درون دیوارهای برشی قرار می‌گیرند و غالباً به دلیل کمی ضخامت دیوار باعث قطع بتن‌ریزی می‌گردند. برای حل این مشکل باید تا حد امکان از وجود تیر در درون دیوار پرهیز شود. در صورت اجرای تیر در دیوار، باید از پروفیل های کوچک که با برشگیر به دیوار متصل شده‌اند، استفاده نمود. این تیر باید بتواند بارهای مرده و زنده حین اجرا را قبل از گیرش بتن تحمل نماید.

در مورد تیرچه‌های سقف، بهتر است جهت تیرچه‌ها به گونه‌ای اختیار شود که تیرچه‌ها به موازات دیوار بوده و نیاز به اجرای اتصال با دیوار برشی نداشته باشد. در صورت اجرای تیرچه‌ها عمود بر دیوار، از نظر اجرایی بهتر است که تیر درون دیوار اجرا گردد و تیرچه ها به تیر متصل شوند.

در صورتی که عضوی بخواهد به دیوار وصل گردد (مانند شمشیری پله)، باید روی دیوار صفحات فولادی قرارداده شود تا تیر نشیمن کافی برای اتصال را داشته باشد. اتصال ورق مزبور به دیوار با آرماتور صورت می‌گیرد که تعداد آرماتور بر اساس برش و خمش موجود در تکیه گاه تیر طرح می‌گردد.

شکل ۹ دو نمونه از اتصال ورق فولادی به دیوار برشی را نشان می‌دهد. شکل ۹-الف جزئیات اجرایی اتصال سنگین را نشان می‌دهد که بولت‌ها درون دیوار کار گذاشته شده و صفحه فولادی پس از بتن ریزی دیوار به بولت‌ها بسته می‌شود. در این روش می‌توان بولت ها را قبل از بتن‌ریزی در دیوار قرار داد و یا اینکه بعد از اجرای دیوار، کاشت بولت انجام شود. شکل ۹-ب جزئیات اجزایی اتصال سبک را نشان می‌دهد که این ورق قبل از بتن ریزی در پشت قالب کار گذاشته شده و سپس بتن‌ریزی انجام می‌شود.



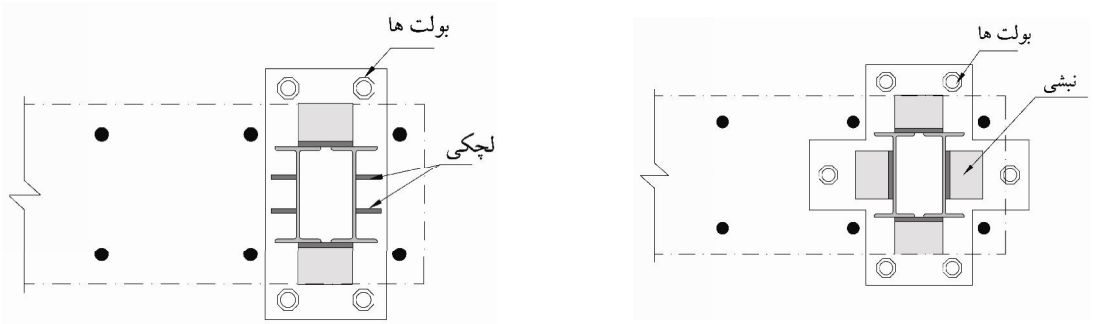
(ب) اتصال سبک (الف) اتصال سنگین

(شکل ۹) جزئیات اتصال ورق فولادی به دیوار برشی

۸-۳- کف ستون در دیوار برشی

یکی از مواردی که در آیین‌نامه‌ها به آن اشاره‌ای نشده است، طراحی کف‌ستون مربوط به اجزاء مرزی است. می‌توان این کف ستون را نظیر کف ستون‌های مرکب طراحی نمود. در این نوع طراحی، ورق کف ستون باید حتی‌الامکان کوچک انتخاب شود تا در مقطع جزء مرزی جا گرفته و میلگردهای انتظار را قطع نکند. همچنین چون بتن جزء لبه در محل کف ستون قطع می‌شود، باید میلگردهای اضافی برای انتقال نیروی مربوطه در اطراف ورق کف ستون به آرماتورهای انتظار جزء لبه افزوده گردند.

بدیهی است میلگردهای مهاری کف ستون باید قادر به تحمل نیروی کششی معادل با ظرفیت کششی پروفیل فولادی باشند. در شکل ۱۰ روش های اجرای کف ستون در دیوار برشی نشان داده شده است.



(الف) کف ستون با تعداد بولت کم (ب) کف ستون با تعداد بولت زیاد

(شکل ۱۰) روش‌های اجرای کف ستون در دیوار برشی

۹- روش‌های مدلسازی ستون مدفون در دیوار برشی با برنامه *ETABS*

جهت مدلسازی ستون‌های مدفون در دیوار برشی می‌توان به سه روش عمل نمود:

الف- مدلسازی ستونها به صورت فولادی

در این روش در هنگام ترسیم مدل، ستونها به صورت فولادی با مقطع اجرایی مدل شده و دیوار برشی بین ستونها ترسیم می‌شود. در این روش هنگام نامگذاری پایه‌ها *(Piers)* باید نام دیوار و ستونهای اطراف آن یکسان باشد.

اشکال این روش اینست که اگر برنامه به صورت خودکار مقطع دیوار را برداشت نماید، طول دیوار کوتاهتر از مقدار واقعی خواهد بود. مزیت این روش اینست که می‌توان ستون فولادی را برای تحمل نیروی محوری ناشی از بار مرده و زنده توسط برنامه کنترل نمود.

ب- مدلسازی ستونها به صورت بتنی

در این روش در هنگام ترسیم مدل، ستونها به صورت بتنی مدل شده و دیوار برشی بین ستونها ترسیم می‌شود. مقطع ستون بتنی در دیوارهای برشی با ضخامت یکنواخت، مقطع مربعی به بعد ضخامت دیوار و در دیوارهای برشی غیر یکنواخت (دَمبلی) برابر ابعاد جزء لبه‌ای دیوار می‌باشد. در این روش هنگام نامگذاری پایه‌ها *(Piers)* باید نام دیوار و ستونهای اطراف آن یکسان باشد.

مزیت این روش اینست که اگر برنامه به صورت خودکار مقطع دیوار را برداشت نماید، طول دیوار به صورت واقعی خواهد بود.

پ- مدل نکردن ستون‌ها

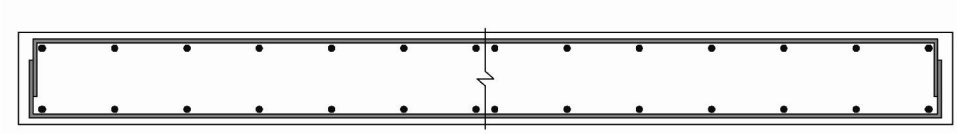
در این روش در هنگام ترسیم مدل، ستونها ترسیم نمی‌شود و فقط دیوار برشی رسم شده و عضوهای خطی به آن اتصال داده می‌شود. اشکال این روش اینست که اگر برنامه به صورت خودکار مقطع دیوار را برداشت نماید، طول دیوار کوتاهتر از مقدار واقعی خواهد بود و سختی دیوار به میزان واقعی نخواهد بود. از این روش کمتر در مدلسازی استفاده می‌شود.

۱۰- روش های طراحی دیوار برشی با ستون مدفون در برنامه *ETABS*

با توجه به قابلیت‌های برنامه *ETABS* و آرماتورگذاری یکنواخت در مقطع دیوار برشی، امکان طراحی دیوار برشی با ستون مدفون به سه روش زیر وجود دارد:

الف- آرماتورگذاری یکنواخت *(Uniform)* و صرف نظر از اثر ستون‌های مدفون

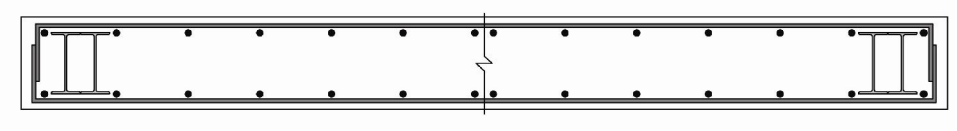
در این روش آرماتورهای طولی موجود در مقطع دیوار برشی توسط روش آرماتورگذاری یکنواخت *(Uniform)* در برنامه *ETABS* تعریف می‌شود و برنامه مقطع دیوار را کنترل می‌نماید. از آنجا که در این روش از اثر ستون‌های مدفون صرف نظر شده است، آرماتورهای دیوار قوی‌تر شده و غیراقتصادی می‌باشد لذا از این روش کمتر استفاده می‌شود.



(شکل ۱۱) آرماتورگذاری یکنواخت و صرف‌نظر از ستون‌های مدفون

ب- آرماتورگذاری عمومی *(General)* و مدلسازی ستون‌ها به صورت واقعی

در این روش آرماتورهای طولی موجود در مقطع دیوار برشی در برنامه ساخت مقطع *(SD)* ترسیم شده و ستون‌های مدفون به شکل واقعی رسم می‌گردد. مقطع ستون باید توسط گزینه *Import I/Wide Flange* از بانک اطلاعاتی *Europro* فراخوانی شده باشد و یا با وارد نمودن ابعاد مقطع، ترسیم گردد. با اجرای دستور طراحی دیوار برشی، برنامه مقطع دیوار را با درنظر گرفتن اثر ستون‌ها کنترل می‌نماید.



(شکل ۱۲) آرماتورگذاری عمومی و مدلسازی ستون‌ها به صورت واقعی

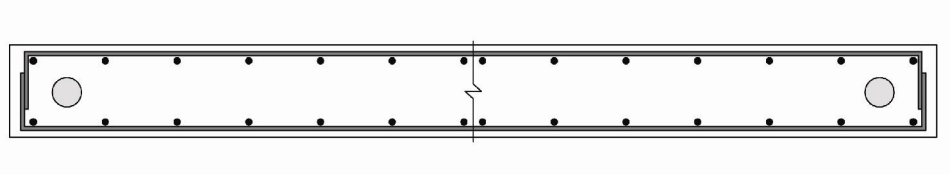
پ- آرماتورگذاری عمومی *(General)* و مدلسازی ستون‌ها به صورت آرماتور معادل

در این روش آرماتورهای طولی موجود در مقطع دیوار برشی در برنامه ساخت مقطع *(SD)* ترسیم شده و ستون‌های مدفون به صورت یک آرماتور معادل رسم می‌گردد. سطح مقطع و قطر آرماتور معادل از روابط زیر تعیین می‌شود.

سطح مقطع میلگرد معادل $$A_{equal} = A_{Column} \times \frac{Fy_{Column}}{Fy_{bar}}$$

قطر میلگرد معادل $$d_{equal} = 2\sqrt{\frac{A_{equal}}{\pi}}$$

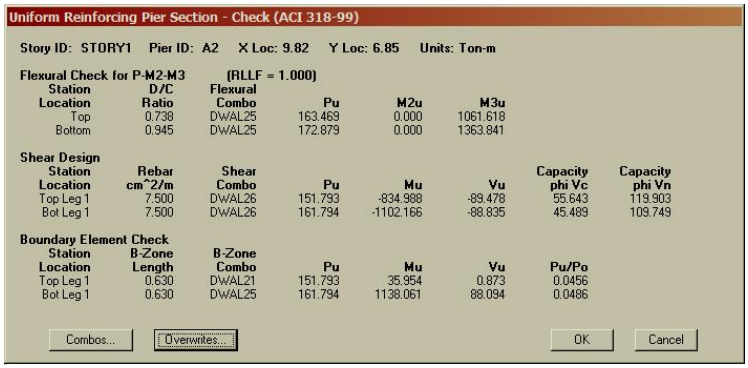
میلگرد معادل باید توسط دستور *Options>Preferences>Reinforcement bar Size* تعریف گردد. با اجرای دستور طراحی دیوار برشی، برنامه مقطع دیوار را با درنظر گرفتن اثر ستون‌ها کنترل می‌نماید.



(شکل ۱۳) آرماتورگذاری عمومی و مدلسازی ستون‌ها به صورت آرماتور معادل

۱۱- برداشت نتایج از برنامه و رسم دیتایل دیوار برشی

جهت درک بهتر مساله، در یک ساختمان ۵ طبقه یک دیوار برشی با شکل‌پذیری متوسط و ضخامت یکنواخت ۳۰ سانتیمتر و به طول ۴/۵ متر با آرماتورهای طولی $\Phi 20$ و فواصل یکنواخت ۲۰ سانتیمتر مدل و طراحی شده است. ستون های فولادی درون دیوار برشی مدفون هستند و مقطع آنها از *2IPE140* است و نیروی محوری ستون ناشی از بار مرده و زنده ۴۰ تن می‌باشد. پس از طراحی، با کلیک راست روی دیوار برشی، پنجره شکل ۱۴ ظاهر می‌گردد.


Uniform Reinforcing Pier Section - Check (ACI 318-99)

Story ID: STORY1 Pier ID: A2 X Loc: 9.82 Y Loc: 6.85 Units: Ton-m

Flexural Check for P-M2-M3 (RLLF = 1.000)

Station Location	D/C Ratio	Flexural Combo	Pu	M2u	M3u
Top	0.738	DWAL25	163.469	0.000	1061.618
Bottom	0.945	DWAL25	172.879	0.000	1363.841

Shear Design

Station Location	Rebar cm^2/m	Shear Combo	Pu	Mu	Vu	Capacity phi Vc	Capacity phi Vn
Top Leg 1	7.500	DWAL26	151.793	-834.988	-89.478	55.643	119.903
Bot Leg 1	7.500	DWAL26	161.794	-1102.166	-88.835	45.489	109.749

Boundary Element Check

Station Location	B-Zone Length	B-Zone Combo	Pu	Mu	Vu	Pu/Po
Top Leg 1	0.630	DWAL21	151.793	35.954	0.873	0.0456
Bot Leg 1	0.630	DWAL25	161.794	1138.061	88.094	0.0486

Combos... Overwrites... OK Cancel

(شکل ۱۴) پنجره گزارش نتایج طراحی دیوار

نتایج ارائه شده در این پنجره به ترتیب عبارتند از:

- آرماتورهای قائم دیوار *(Flexural Check)*

پس از معرفی مقطع دیوار برشی، برنامه نسبت ظرفیت دیوار برشی *(Demand/Capacity Ratio)* را برای بحرانی‌ترین ترکیب بار در بالا و پایین دیوار ارائه می‌نماید. در صورتی که نسبت ظرفیت از ۱ کمتر باشد، آرماتورهای قائم معرفی شده مناسب هستند.

در هنگام معرفی آرماتورهای قائم به برنامه دقت کنید که نسبت آرماتور از مقدار حداکثر بیشتر نبوده و از مقدار حداقل کمتر نباشد. این کنترل برای دیوار برشی فوق به صورت زیر انجام می شود.

$$\rho_{\min} = 0.0025 \le \rho_v = \frac{A_v}{S_1 \times t} = \frac{2 \times 3.14}{20 \times 30} = 0.01 \le \rho_{\max} = 0.02$$

- آرماتور برشی دیوار *(Shear Design)*

در این قسمت برنامه نسبت سطح مقطع ساق‌های آرماتورهای برشی به فاصله آنها (A_v / S) را بر حسب واحد (cm^2 / m) ارائه می‌نماید که مقدار حداقل نیز توسط برنامه کنترل می‌شود. در این مثال

نسبت برابر ۷/۵ سانتیمتر مربع بر متر در بالا و پایین دیوار داده شده است. با در نظر گرفتن فاصله بین آرماتورهای برشی، مقدار سطح مقطع ساق‌های خاموت به دست می‌آید که می‌توان شماره آرماتور را تعیین نمود.

حل زیر نحوه استخراج شماره آرماتور را برای این مثال نشان می‌دهد.

$$S_2 \le \min(3t, \frac{\ell_w}{5}, 350mm) = \min(3\times 300, \frac{4500}{5}, 350) = 350mm \Rightarrow S_2 = 300mm$$

$$A_h = 7.5 \times S = 7.5 \times 0.3 = 2.125 \Rightarrow 2\Phi 12$$

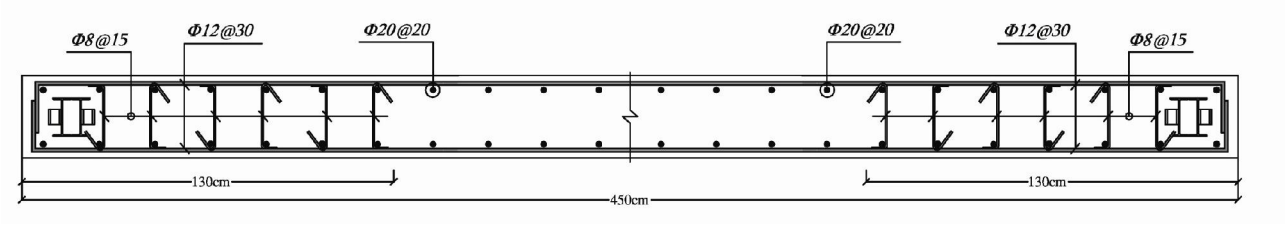
• کنترل ناحیه مرزی *(Boundary Element Check)*

برنامه طول ناحیه مرزی را بر اساس فرضیات موجود در آیین‌نامه مربوطه محاسبه و ارایه می‌نماید. طول ناحیه مرزی در این مثال برابر ۶۳ سانتیمتر ارائه شده است. به علت وجود ستون مدفون در دیوار، طول ناحیه مرزی دو برابر در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به شکل پذیری متوسط دیوار برشی، شماره آرماتور عرضی ویژه برابر ۸ میلیمتر و فاصله آن حداقل از رابطه زیر ۱۵۰ میلیمتر تعیین می‌شود.

$$S = \min(8d_b, 24d_S, \frac{t}{2}, 150mm) = \min(8\times 20, 24\times 8, \frac{300}{2}, 150mm) = 150mm$$

با توجه به آرماتورهای محاسبه شده، دیتایل دیوار برشی مطابق شکل ۱۵ ترسیم شده است.



(شکل ۱۵) دیتایل دیوار برشی

• نیروهای طراحی بولت‌های کف ستون

جهت طراحی بولت‌های کف ستون می‌توان مقدار نیروی کششی را برابر حد تسلیم پروفیل ستون مدفون در نظر گرفت.

$$T = A_{column} \times F_y = 32.4 \times 2400 = 77700kg \approx 78ton$$

۱۲- جمع‌بندی

با توجه به استفاده روز افزون از دیوارهای برشی در ساختمان‌های فولادی، مهندسین محاسب، ناظر و مجری باید با شناخت رفتار و ضوابط این عضو حساس سازه‌ای، از آن در ساختمان استفاده نمایند.

ذکر این نکته خالی از لطف نیست که "آیین‌نامه ذکر حداقل‌ها است" و در جاهایی که مهندسین گرامی تشخیص می‌دهند باید مقادیر بیشتری را نسبت به آیین‌نامه استفاده نمایند، ممانعتی ندارد؛ ولی رعایت محدودیتها و حداقل-های آیین‌نامه اجباری است.

۱۳- مراجع

1. Computers & Structures, Inc., "ETABS – Integrated Building Analysis & Design, User Interface Manual," January 2002

2. Computers & Structures, Inc., "ETABS – Integrated Building Analysis & Design, Shear Wall Design Manual," January 2002

3. Paulay, T. ,Priestley, M.J.N., Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, NewYourk, Wiley, 1992

۱. آیین نامه بتن ایران (آبا)، سازمان مدیریت و برنامه ریزی، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، نشریه شماره ۴، تجدید نظر اول، ویرایش ۱۳۸۳.

۲. آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ویرایش دوم، ۱۳۷۸.

۳. آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زلزله، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ویرایش سوم، ۱۳۸۴.

۴. سیروس نصیرایی، تحلیل و طراحی دیوارهای برشی، سمینار تخصصی و کاربردی دیوارهای برشی، آبان۱۳۸۴.

۵. عباسعلی تسنیمی، رفتار و طرح لرزه‌ای ساختمان‌های بتن مسلح (آبا+۲۸۰۰)، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن وزارت مسکن و شهرسازی، ۱۳۸۰.

۶. علی سیفی - مهدی هادیزاده، طراحی دیوارهای برشی در نرم افزار *ETABS*، سمینار تخصصی و کاربردی دیوارهای برشی، آبان۱۳۸۴.

۷. محمد مویدیان، ساختمان‌های مرکب، انتشارات پرتونگار، ۱۳۸۰.

۸. محمد مویدیان، طرح لرزه ای سازه‌ها، انتشارات پرتونگار، ۱۳۸۰.

۹. مسعود ریاضی، بررسی رفتار دیوارهای برشی، سمینار تخصصی و کاربردی دیوارهای برشی، آبان ۱۳۸۴.

۱۰. مقررات ملی ساختمان ایران: مبحث دهم طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی /دفتر تدوین و ترویج مقررات ملی ساختمان.- تهران: نشر توسعه ایران، ۱۳۸۴.