تحلیل دیوارهای برشی بتنی تخت سوراخ‌دار

مصطفی توکلی (استادیار)
سعید رشیدی
دانشکدهٔ مهندسی عمران

چکیده

در پژوهشنامهٔ حاضر، روشهای تحلیل غیرکامپیوتری دیوارهای برشی تخت سوراخ‌دار معرفی و ارزیابی شده‌اند. از تحلیل کامپیوتری به روش اجزای محدود برای ارزیابی این روشها استفاده شده است. رفتار الاستیک و غیرخطی تحت نیروهای جانبی الاستیک و مشخصات دینامیک سیستمهای دیوار برشی تخت سوراخ‌دار به‌کمک آنالیز کامپیوتری مدلهای فرضی مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر ابعاد هندسی، خصوصیات فیزیکی و شرایط تکیه‌گاهی بر رفتار دیوارهای برشی آشکار شده است.

مطالعات انجام شده نشان داده است که در تحلیل کامپیوتری، استفاده از مدلهای نسبتاً ساده می‌تواند نتایج قابل قبولی به دست دهد. خصوصیات فیزیکی تعریف شده برای مدلهای ریاضی باید اثر ترک‌خوردگی و ابعاد سازه را به خوبی منعکس کند. روش اتصال پیوسته که متداول‌ترین روش تحلیل غیرکامپیوتری دیوارهای برشی به هم پیوسته به شمار می‌آید، تغییرات لنگر خمشی دیوارهایی را که سختی نسبی کمی دارند به درستی پیش‌بینی نمی‌کند، ولی در تعیین مشخصات دینامیک سیستم توانایی مناسبی را دارا هستند. روش تحلیل تقریبی الاستو- پلاستیک (Paulay) که تعمیم روش اتصال پیوسته به تحلیل غیرخطی است، از محدودیتهایی برخوردار است. شرایط تکیه‌گاهی بر رفتار دیوارهای برشی اثر قابل توجهی دارند و باید در تعیین مشخصات دینامیک و نحوهٔ توزیع نیروهای داخلی مورد توجه قرارگیرند. محل سوراخهای دیوار برشی بر تنشها و تغییر شکل الاستیک و نیز بر تغییر شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی به هنگام زمین لرزه، مؤثر است.

دیوار برشی سازهٔ کارآمدی برای تأمین مقاومت ساختمانهای بلند در برابر نیروهای جانبی به شمار می‌رود. دیوارهای برشی به عنوان جزیی از ساختمان باید به شکلی ساخته شوند که با طرح کلّی آن هماهنگ باشند. از این رو شکل دیوارهای برشی بسیار متنوع است. ضرورت وجود سوراخ در این دیوارها اغلب اجتناب‌ناپذیر است چراکه معمولاً باید در، پنجره و... در دیوار تعبیه شود. وجود سوراخ بر رفتار دیوار تأثیر بالایی دارد و باید به درستی در تحلیل آن منظور گردد.

تحلیل دیوارهای برشی سوراخ‌دار از دیرباز موضوع پژوهشهای بسیاری بوده است. در سی و پنج سال گذشته پژوهندگان روشهای گوناگونی برای تحلیل این سازه‌های پر اهمیت پیشنهاده کرده‌اند که هر یک به فراخور زمان ارزش خاصی داشته است. پا به پای مطالعات نظری، آزمایشهای زیادی برای درک رفتار دیوارهای سوراخ‌دار انجام شده است که از نتایج آنها درستی روشهای تحلیلی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

نخستین پژوهشها، به رفتار الاستیک دیوار برشی تحت نیروهای استاتیک نظر دارند. مطالعه دربارهٔ رفتار غیرالاستیک دیوار تحت نیروهای استاتیک و نیز تحلیل خطی دینامیک، از حدود بیست سال پیش آغاز شده است. از عمر بررسیهای نظری و تجربی دربارهٔ رفتار «واقعی» دیوار که به رفتار غیرخطی آن تحت نیروهای دینامیک پرداخته‌اند، بیش از یک دهه سپری نشده است و هنوز پرسشهای بسیاری باقی مانده‌اند که پاسخ به آنها پژوهشهای تازه‌ای را می‌طلبد.

اساس روشهای تحلیل غیرکامپیوتری دیوارهای برشی سوارخ‌دار، بر جایگزین کردن تیرهای اتصال با یک محیط پیوسته استوار است. اندیشهٔ جایگزین کردن واکنشهای موضعی با یک واکنش پیوستهٔ معادل، اندیشهٔ کهنی است. "Beck" و "Rosman" برای نخستین بار چنین شیوه‌ای را در تحلیل دیوارهای برشی سوراخ‌دار برگزیدند. مطالعات "Puri" نشان داد که تغییر شکل برشی دیوار، بر تغییر شکل و تنش دیوارهای سوراخ‌دار بلند اثر چندانی ندارد. "Choudhury" و "Coull" نمودارهایی برای

محاسبهٔ سریع تنشها و حداکثر تغییر شکل دیوارهای سوراخ‌داری که تحت نیروی جانبی گسترده با توزیع خطی یا نیروی جانبی متمرکز در بالاترین نقطه واقع می‌شوند، فراهم آورده‌اند. "Paulay" با استفاده از اندیشهٔ محیط پیوستهٔ معادل، روشی برای تحلیل الاستوپلاستیک دیوارهای برشی سوراخ‌دار پیشنهاد کرده است. بررسیهای وی نشان می‌دهد که ترک خوردگی اثر مهمی بر توزیع نیروهای داخلی دارد. نظریهٔ محیط پیوستهٔ معادل در مطالعهٔ ارتعاش آزاد دیوارها نیز مورد توجه قرار گرفته است.

سرشت پیچیدهٔ موضوع سبب شده است که نتایج به دست آمده از این پژوهشها هر یک تنها در قلمرو معینی که با فرضیه‌های سادهٔ کنندهٔ خاصی توافق دارد، معتبر باشد. برای تعمیم روشهای یاد شده به قلمروهای گسترده‌تر، تلاشهایی صورت گرفته است ولی روشهای فراگیرتر هرچند که به عنوان روشهای تحلیل غیرکامپیوتری معرفی شده‌اند. شامل چنان محاسبات مفصلی هستند که عملاً جز به کمک کامپیوتر قابل اجرا نیستند.

اگرچه امروزه با افزایش چشمگیر قابلیت کامپیوترها در انجام سریع محاسبات مفصل، روش اجزای محدود به عنوان یک روش جامع برای تحلیل هرگونه سازه و از جمله دیوار برشی شناخته شده است ولی هنوز تحلیل کامپیوتری مدلهای کامل، بیشتر یک امکان بالقوه به شمار می‌رود تا یک کار عملی. با این همه، نتایجی که از تحلیل کامپیوتری مدلهای ساده شده به دست می‌آید می‌تواند دقیق و قابل قبول باشد و در شناخت رفتار دیوار ما را یاری کند.

در پژوهش حاضر سعی بر آن بوده است که نتایج روشهای تحلیل غیرکامپیوتری با نتایج تحلیل کامپیوتری مدل دیوارهای برشی سوراخ‌دار مقایسه و ارزیابی شود. همچنین رفتار خطی و غیرخطی دیوارهای برشی تحت بار استاتیک و نیز مشخصات دینامیک دیوارهای برشی مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیلهای کامپیوتری توسط نرم‌افزارهای معتبر "ADINA"، "PCFEAP" و "SAP ۸۰" انجام شده است.

این پژوهشنامه در پنج فصل نگاشته شده است:

نخستین فصل پژوهشنامه شامل کلیاتی دربارهٔ دیوارهای برشی سوراخ‌دار است. در این فصل اثر سوراخ بر تغییر شکل‌پذیری (Ductility) قابلیت جذب انرژی و چگونگی (مکانیزم) شکست دیوارهای برشی مورد بحث قرار گرفته و بر اهمیت محل سوراخها تأکید شده است.

فصل دوم به ارزیابی روش تحلیل کامپیوتری برای تحلیل دیوارهای برشی سوراخ‌دار اختصاص یافته است. در این فصل مدلهای مختلف توصیف دیوار، معرفی و بررسی شده‌اند، تواناییها و کاستیهای هر یک بیان و درستی نتایج حاصل از تحلیل آنها ارزیابی شده است.

تحلیل الاستیک دیوارهای برشی سوراخ‌دار تحت نیروهای استاتیک، موضوع سومین فصل پژوهشنامه است. پس از معرفی مختصر روشهای متداول تحلیل غیرکامپیوتری، نتایج این روشها با نتایج تحلیل کامپیوتری مقایسه شده است. همچنین با تحلیل کامپیوتری مدلهای مختلف، سعی شده تا جنبه‌های اساسی رفتار الاستیک دیوارهای برشی سوراخ‌دار آشکار شود.

در فصل چهارم، ارتعاش آزاد دیوارهای برشی سوراخ‌دار مورد بحث قرار گرفته است. روش غیرکامپیوتری تعیین فرکانسها و شکلهای ارتعاشی دیوار به طور اجمال معرفی و سپس ارزیابی شده است. مطالعهٔ اثر عوامل مختلف بر مشخصات دینامیکی دیوار، بخش دیگری از این فصل را تشکیل می‌دهد.

پنجمین و آخرین فصل پژوهشنامه به تحلیل غیرخطی دیوارهای برشی سوراخ‌دار تحت بار استاتیک اختصاص دارد. در این فصل رفتار دیوار در محدودهٔ غیرالاستیک و مقاومت نهایی آن مورد استفاده قرار گرفته است.

نتیجه‌گیری

در پژوهشنامهٔ حاضر، روشهای تحلیل غیرکامپیوتری دیوارهای برشی تخت سوراخ‌دار به اختصار معرفی شده‌اند. نتایج به دست آمده از این روشها با استفاده از روش تحلیل کامپیوتری (روش اجزای محدود) مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. با تحلیل کامپیوتری مدلهای مختلفی از دیوار برشی سوراخ‌دار، رفتار الاستیک، رفتار دینامیک و رفتار غیرخطی دیوارهای برشی مورد مطالعه واقع نشده است. رهاورد پژوهش به طور خلاصه از این قرار است:

۱- در آنالیز کامپیوتری استفاده از مدلهای نسبتاً ساده می‌تواند نتایج قابل قبولی به دست دهد. المان تیر برای مدل کردن دیوارهای برشی به هم پیوسته کاملاً مناسب است، مشروط بر آنکه قاب معادل دیوار به درستی تعریف شود. استفاده از المان تنش دو بعدی در همهٔ موارد امکان‌پذیر است ولی تحلیل مدلهای ساخته شده از این نوع المان وقت‌گیرتر و دشوارتر است. در تحلیل دیوارهای به هم پیوسته، استفاده از المان تنش دو بعدی هیچ مزیتی بر المان تیر ندارد.

۲ـ تعریف خصوصیات فیزیکی مناسب برای مدلهای ریاضی اهمیت بسیار دارد. این خصوصیات باید اثر ترک‌خوردگی و ابعاد سازه را به خوبی منعکس کنند.

۳ـ روش اتصال پیوسته برای تحلیل الاستیک دیوارهای برشی به هم پیوسته تحت بار استاتیک، نیروی محوری دیوارها و برش تیرهای اتصال دهنده را به خوبی پیش‌بینی می‌کند ولی تغییرات «گشتاور خمشی» دیوارهایی که سختی آنها نسبت به تیرهای اتصال دهنده یا دیوارهای دیگر کم است با پیش‌بینی این روش مطابقت ندارد.

۴ـ شرایط تکیه‌گاهی، بر رفتار دیوارهای برشی به هم پیوسته موثرند. اثر این شرایط هرچند که یک اثر موضعی بوده و تنها به طبقات پایین سازه مربوط می‌شود ولی گاه اهمیت فراوان دارد. کاهش سختی دورانی تکیه‌گاهها ممکن است نیروی برشی اتصال دهنده را چند برابر کند. کاهش سختی قائم تکیه‌گاهها می‌تواند گشتاور خمشی دیوارها و برش تیرهای اتصال دهنده و نیز تغییر مکان جانبی را به طور نامحدودی افزایش دهد. از این رو بهتر است شالودهٔ سازه به گونه‌ای ساخته شود که احتمال نشست نامتجانس تکیه‌گاههای دیوار برشی موجود نباشد.

۵ـ تیرهای اتصال دهنده در رفتار دیوارهای برشی به هم پیوسته اثر مطلوبی دارند به طوری که پس و پیش شدن سوراخها، تنشها و تغییر شکل الاستیک را افزایش می‌دهد. تأمین تغییر شکل‌پذیری و قابلیت جذب انرژی کافی هنگام زمین لرزه نیز در دیوارهایی که سوراخهای زیگزاک نزدیک به هم دارند دشوار است.

۶ـ روش اتصال پیوسته می‌تواند مشخصات دینامیک دیوارهای برشی به هم پیوسته یعنی فرکانسها و شکلهای ارتعاش آزاد را به خوبی پیش‌بینی کند.

۷ـ مشخصات دینامیک دیوارهای برشی به هم پیوسته به ابعاد سازه و شرایط تکیه‌گاهی آن بستگی دارد. تغییر شکل برشی تیرهای اتصال دهندهٔ عمیق، عامل مهمی در مقدار فرکانس به شمار می‌رود. در دیوارهای برشی بلند، اثر تغییر شکل محوری دیوارها کاملاً در فرکانس مشهود است. اثر دوران تکیه‌گاهها بر فرکانس دیوارهای برشی دارای تیرهای اتصال دهندهٔ سخت ناچیز است ولی هر چه سختی این تیرها کاهش یابد، تأثیر آن زیادتر می‌شود.

۸ـ تحلیل غیرخطی مدلهای دیوار برشی نشان می‌دهد که در بسیاری موارد نمی‌توان رفتار دیوار را در قالب مراحل روش تحلیل تقریبی الاستو ـ پلاستیک "Paulay" گنجاند. تغییر شکل‌پذیری لازم برای تیرهای اتصال دهنده که فرا رسیدن مقاومت نهایی مدلها را امکان‌پذیر می‌سازد، از پیش‌بینی روش الاستو ـ پلاستیک کمتر است.

تحلیل دیوارهای برشی تخت سوراخ‌دار هنوز مسائل ناگشودهٔ بسیاری را در بردارد. رفتار غیرخطی دیوارهای برشی تحت بار دینامیکی ـ به خصوص زمین لرزه ـ اثر عواملی همچون پیوند بتن و فولاد، کمانش میل گردهای فولادی، ترکهای برشی و... بر رفتار دیوار و اثر P-Δ در دیوارهای برشی بلند، مسائلی هستند که هر یک می‌توانند موضوع پژوهشی تازه باشند.