مطالعه رفتار لرزه‌اي ديوارهاي برشي با رفتار دوگانه شکل‌پذير

منصور ضيايي‌فر[i]; جمشيد صبوري[ii *]; فرامرز عالمي[iii]

چکيده

ديوارهاي برشي اغلب به گونه‌اي طراحي مي‌شوند که رفتاري خمشي و شکل‌پذير داشته باشند. اين ديوارها در عمل به صورت تير طره عمل نموده و در محدوده اتصال به پايه خود داراي لنگر قابل‌توجهي هستند و بدين ترتيب بيش‌تر جذب انرژي زلزله در پايين اين ديوارها صورت خواهد گرفت. در اين تحقيق سعي شده است با ايجاد رفتار دوگانه شکل‌پذير خمشي- برشي در اين ديوارها از قسمت‌هاي فوقاني ديوار نيز در جذب انرژي استفاده شود و از اين طريق عملکرد ديوارهاي برشي ارتقا داده شود. اين مسأله در ابتدا از طريق يک مدل ساده سازه‌اي بررسي گرديد و نشان داده شد که رفتار دوگانه شکل‌پذيري مي‌تواند در عمل به بهبود عملکرد سازه کمک نمايد. سپس سه نوع ديوار برشي (ديوارهاي برشي شکاف‌دار، سوراخ‌دار و ميان‌خالي) که داراي چنين قابليتي هستند معرفي شده و عملکرد هر يک از آنها در اين ارتباط مورد بحث قرار گرفت. نتايج بدست آمده نشان مي‌دهند که از ميان اين سه ديوار به ترتيب ديوارهاي برشي ميان‌خالي، سوراخ‌دار و شکاف‌دار عملکرد مناسب‌تري دارند.

کلمات کليدي

جذب انرژي در ارتفاع ديوارهاي برشي، رفتار دوگانه شکل‌پذير خمشي- برشي.

Seismic Behavior of Dual Ductility Shear Walls

M. Ziyaiefar; J. Sabouri; F. Alemi

ABSTRACT

In general, shear wall design is based on flexural ductility. In this design approach, behavior of the shear walls is more similar to a cantilever beam with significant bending moment at its base. In such systems, the main input energy dissipation during seismic events happens at the base of the shear wall. In this paper, in order to improve the behavior of these important lateral resisting mechanism in structural systems, the possibility of dual type behavior (flexural and shear) were investigated. At first, the potential of this approach in improving the behavior of shear walls has been examined in a simplified structural model. Later, three types of shear walls including slit walls, shear walls with opening and frame-wall systems have been studied. The results show the capability of dual ductility modes of behavior in all three systems. Energy dissipation dispersion in these systems is better than the ordinary shear walls. Among the dual ductility systems, the frame-wall system has shown a superior performance compared with that of the two other systems.

KEYWORDS : Shear wall, dual mode, ductility, energy dissipation.

تاريخ دريافت مقاله:۱۳۸۷/۹/۳۰

تاريخ اصلاحات مقاله:۱۳۸۸/۱۱/۲۸

[i] دانشيار پژوهشگاه بين‌المللي زلزله‌شناسي و مهندسي زلزله Mansour@iiees.ac.ir.

[ii] *نويسنده مسئول و دانشجوي دکتري مهندسي زلزله دانشگاه آزاد اسلامي واحد علوم و تحقيقات تهران jam_sab@yahoo.com ، J-Sabouri@iaut.ac.ir.

[iii] دانشجوي دکتري مهندسي زلزله پژوهشگاه بين‌المللي زلزله شناسي و مهندسي زلزله f-alemi@iiees.ac.ir.

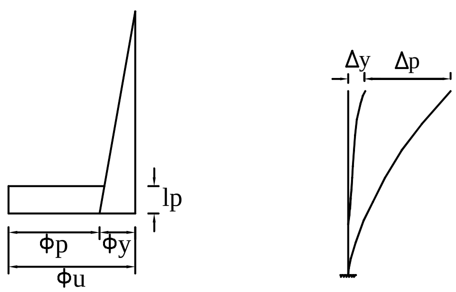
۱- مقدمه

استفاده از ديوارهاي برشي بعنوان يک روش معمول در انتقال نيروهاي جانبي در سازه‌هاي با بلندي متوسط تا بالا شناخته شده است. رفتار عمومي ديوارهاي برشي متداول، رفتاري خمشي است و به طور عمده اين ديوارها بر مبناي خمش طراحي و فولادگذاري مي‌شوند [۸]، [۱۰]. طبق فلسفه عمومي طراحي سازه‌هاي خمشي، اين ديوارها به گونه‌اي طراحي مي‌شوند که تغييرشکل‌هاي رفتار برشي که حالت‌هاي ترد رفتاري به آن‌ها گفته مي‌شود در اين سازه‌ها امکان وقوع نيافته و ديوارها بتوانند در خمش به رفتاري شکل‌پذير دست يابند. تجربيات طراحي نشان داده‌اند که در اين رابطه، مسأله خاصي در ديوارهاي برشي وجود ندارد و تنها مسأله آن است که تا حدي فلسفه طراحي آنها محافظه‌کارانه به شمار مي‌آيد. بايد توجه داشت که از آنجايي‌که ديوارهاي برشي، سازه‌هاي حجيم و بزرگي هستند فقط در قسمت اتصال به پايه خود نياز به شکل‌پذيري دارند. بنابراين طراحي آنها بصورت عناصري شکل‌پذير در قسمت‌هاي فوقاني نمي‌تواند توجيهي به غير از محافظه‌کاري داشته باشد. اين نکته محرک اصلي در انجام اين تحقيق بوده است. به عبارتي اين سؤال مطرح است که چنانچه طبق ضوابط طراحي بتن مسلح، اجبار به تأمين شکل‌پذيري عناصر سازه‌اي وجود دارد، به چه طريق مي‌توان در قسمت‌هاي فوقاني ديوارهاي برشي از اين ظرفيت براي جذب انرژي ورودي زلزله به سازه استفاده نمود.

در اين تحقيق ابتدا با مطرح نمودن مسأله در بعد ديناميکي، راهکار عمومي افزايش جذب انرژي در ارتفاع سازه بصورت ديوارهاي برشي با رفتار دوگانه شکل‌پذير مطرح شده و در ادامه سعي شده است که به تناسبات لازم در رابطه با هندسه ديوارها براي جذب انرژي بصورت خمشي و برشي دست يافته شود. سپس درباره سه نوع مختلف ديوار برشي با قابليت تأمين رفتار دوگانه شکل‌پذير، بحث و بررسي شده است.

۲- جذب انرژي در ديوارهاي برشي

يکي از مسائل موجود در مورد ديوارهاي برشي نحوه جذب انرژي در آنها است. تجربه‌هاي موجود در ساختمان‌هاي بلند با ديوارهاي برشي مبين آن است که به طور معمول جذب انرژي بصورت خمشي در قسمت‌هاي پايين ديوار اتفاق افتاده و به تدريج از ميزان جذب انرژي در ارتفاع ديوار کاسته مي‌شود. بدين ترتيب با افزايش تدريجي لنگر در پاي ديوار و ايجاد ترک‌هاي اوليه خمشي در ديوار و افزايش تعداد و عرض اين ترک‌ها، انحناي مقطع ديوار در پاي آن افزايش مي‌يابد و پس از رسيدن مقطع به انحناي جاري شدن (ϕ_y)، افزايش انحنا با سرعت بيشتري انجام مي‌گيرد تا مقطع سازه به حد انحناي نهايي (ϕ_u) برسد. در اين لحظه مفصل پلاستيک خمشي کامل در پايين ديوار ايجاد شده (شکل ۱-ب) و سازه تا حد حداکثر ظرفيت خود ($\Delta_y + \Delta_p$) بدون افزايش ظرفيت باربري تغيير مکان خواهد داد (شکل۱-الف) [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]. بنابراين مفصل پلاستيک خمشي در پايين ديوار باعث ايجاد تغييرمکان‌هاي نسبي زياد در قسمت‌هاي بالاي ديوار خواهد شد. اين فرآيند رفتاري باعث مي‌شود که جذب انرژي زمين‌لرزه فقط در قسمت پايين ديوار صورت پذيرد و قسمت‌هاي بالاتر آن به طور عمده سهم ناچيزي از جذب انرژي داشته باشند. اين ويژگي مبين آن است که از ظرفيت‌هاي شکل‌پذيري قسمت‌هاي بالاتر ديوار برشي استفاده‌اي نشده است.



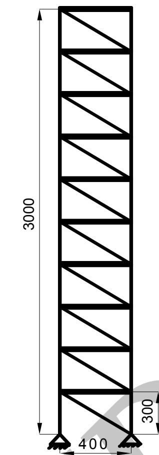
الف) شکل تغيير مکان ديوار ب) نمودار انحناي خمشي در ارتفاع ديوار

شکل (۱): نمودار انحناي خمشي و شکل تغييرمکان خمشي ديوار

۳- افزايش جذب انرژي در ارتفاع براي ديوارهاي برشي

براي استفاده بهينه از ظرفيت‌هاي شکل‌پذيري ديوار برشي در جذب انرژي، مدل يک ديوار برشي بوسيله عناصر خرپايي با استفاده از برنامه DRAIN-2DX ساخته شده است [۱۲]. خرپاي نشان داده شده در شکل (۲) مدل ساده شده يکي از چهار ديوار برشي ساختماني ۱۰ طبقه با مساحت زيربناي کل ۲۵۰۰ مترمربع است. ارتفاع ديوار اصلي ۳۰ متر و ضخامت آن ۳۰ سانتيمتر است. عرض ديوار برابر با ۵ متر بوده که در مدل خرپايي ساخته شده عرض مؤثر به ۴ متر کاهش يافته است. سطح مقطع عناصر خرپايي قائم و افقي به ترتيبي تعيين شده‌اند که دوره تناوب ارتعاش طبيعي و شکل مودي بدست آمده براي مدل در مود اول انطباق مناسبي با دوره تناوب و شکل مود اصلي ساختمان داشته باشند (دوره تناوب مود اول ۱/۸۳۶ ثانيه بوده است). رفتار مصالح عناصر خرپايي به‌صورت الاستوپلاستيک با مدول الاستيسيته فولاد فرض شده‌اند و حد

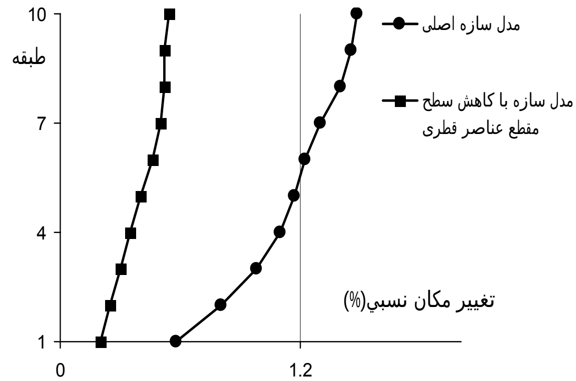
جاري شدن مصالح متناسب با ابعاد و ضخامت‌هاي ديوار و نيروهاي طراحي آن تعيين شده‌اند [۱].



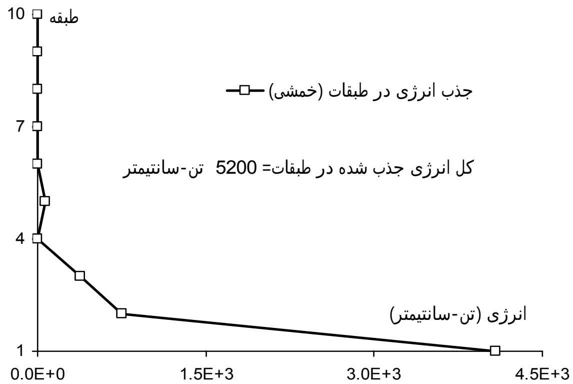
شکل (۲): مدل خرپايي ديوار برشي

براي مشخص شدن چگونگي جذب انرژي در ارتفاع ديوار، تحليل تاريخچه زماني براي اين مدل سازه‌اي در حالات مختلف انجام شده است. جذب انرژي در ديوارهاي خمشي متداول به اين صورت است که خمش کلي ديوار باعث ايجاد يک زوج‌نيرو در دو ستون کناري هر طرف ديوار مي‌شود که يکي از اين دو نيرو به صورت فشاري و ديگري کششي عمل نموده و در نتيجه جذب انرژي با جاري شدن اعضاي قائم خرپايي در فشار و کشش و در پايين ديوار صورت خواهد گرفت.

در مدل سازه‌اي نشان داده شده در شکل (۲)، براي ايجاد مفصل پلاستيک کامل در پاي ديوار تحت اثر زلزله السنترو، سطح مقطع اعضاي قائم به مقدار ۲۰% کاهش داده شد. با استفاده از تحليل غيرخطي ديناميکي مشخص شد که سازه به سرعت دچار افزايش تغييرمکان در بالاي ديوار و همچنين تغييرمکان‌هاي نسبي در طبقات مي‌شود، بطوري‌که ميزان تغييرمکان نسبي در طبقات بالا از مقدار انتخابي بر مبناي سطح عملکرد موردنظر ديوار (۱/۲%) بيشتر است. حداکثر تغييرمکان نسبي طبقات اين ديوار براي مدل سازه اصلي در شکل (۳) نشان داده شده است. جذب انرژي در سازه فقط در اعضاي قائم بوده که مبين جذب انرژي در رفتار خمشي است. شکل (۴) نشان‌دهنده جذب انرژي در ارتفاع سازه است. با توجه به اين شکل مشخص مي‌شود که به طور تقريبي همه جذب انرژي به صورت خمشي در قسمت‌هاي پايين سازه صورت گرفته است. دليل اين عملکرد آن است که مجموعه ديوار برشي مورد بحث مانند يک تير طره‌اي با اتصال گيردار به زمين عمل مي‌کند.

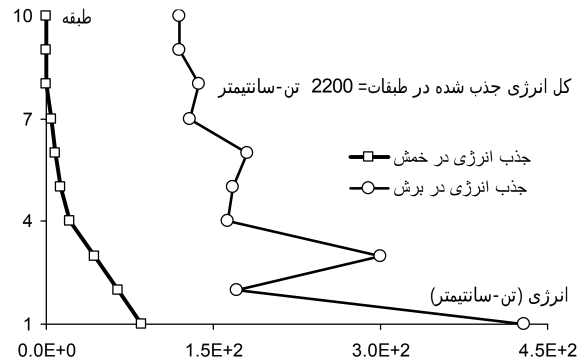


شکل (۳): حداکثر تغييرمکان نسبي طبقات در زلزله السنترو براي مدل اصلي و مدل با کاهش سطح مقطع عناصر قطري



شکل (۴): نمودار جذب انرژي ورودي براي زلزله السنترو در مدل اصلي

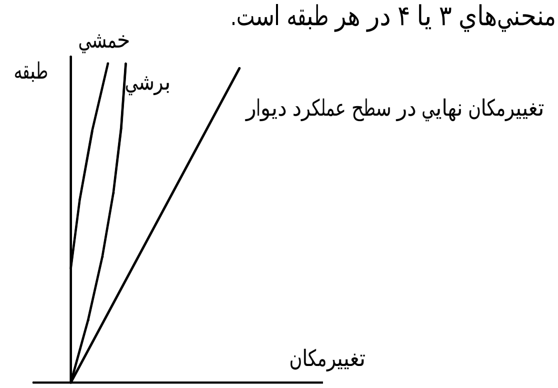
با توجه به مطالب گفته شده براي بهبود عملکرد سازه، اول بايد روشي انتخاب شود که تغييرمکان‌هاي نسبي طبقات فوقاني را محدود سازد. بدين منظور اعضاي خمشي خرپاي موردنظر را بايد قوي‌تر انتخاب نمود تا با کاهش انحناي مفصل خمشي در پاي ديوار از تغييرمکان‌هاي قسمت‌هاي بالايي ديوار کاسته شود. همچنين بايد براي ايجاد جذب انرژي در ارتفاع سازه با کاهش سطح مقطع اعضاي قطري در خرپا به ايجاد تغييرشکل‌هاي برشي در ديوار پرداخت. براي اين کار سطح مقطع اعضاي قطري نزديک به ۸۰% سطح مقطع اوليه اعضا کاهش داده شد. پس از انجام تحليل ديناميکي تاريخچه زماني، ديده شد که علاوه بر اين‌که ميزان جذب انرژي اعضاي مدل در طبقات بالاتر بهبود يافت ميزان حداکثر تغييرمکان‌هاي نسبي هر طبقه نيز کمتر از مقدار سطح عملکرد تعيين شده ديوار (۱/۲%) است. نتايج بدست آمده با استفاده از رکورد زلزله السنترو بدست آمده است. نتايج شامل حداکثر تغيير مکان‌هاي نسبي طبقات و حداکثر انرژي جذب شده در هر طبقه به ترتيب در اشکال (۳) و (۵) نشان داده شده است.



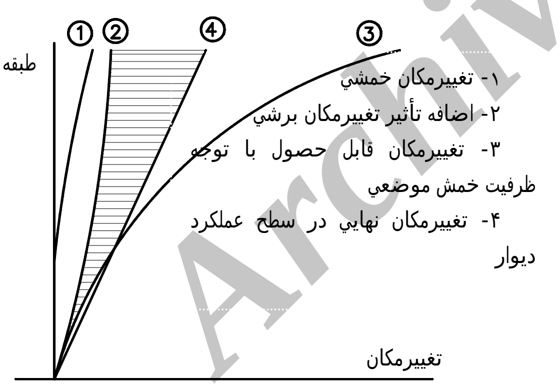
شکل (۵): نمودار جذب انرژي ورودي براي زلزله السنترو در مدل سازه با کاهش ۸۰ درصدي عناصر قطري

٤- ظرفيت تغييرشکل‌هاي غيرالاستيک در ديوارهاي برشي

در سازه‌هاي بلند مرتبه طراحي شده با ديوارهاي برشي، شکل عمومي تغييرشکل خمشي و برشي ديوار در حالت ارتجاعي در شکل (۶) نشان داده شده است. مقادير اين تغييرمکان‌ها در هر طبقه بستگي به مقدار سطح مقطع ديوار در ارتفاع دارد. با اين وجود، ميزان حداکثر تغييرمکان‌هاي جانبي در ديوار محدود است و مطابق با ميزان سطح عملکرد مورد نياز ديوار بر حسب تغييرمکان نسبي قابل بيان است. شکل (۶) تغييرمکان‌هاي الاستيک خمشي، برشي و تغييرمکان حداکثر در سطح عملکرد ديوار را نشان مي‌دهد. بر اثر تحريکات زلزله، پس از آنکه ديوار از نظر برش و خمش به حداکثر تغييرشکل‌هاي الاستيک خود رسيد، با توجه به اينکه نيروهاي برشي و خمشي در اثر زلزله بيشتر از حد الاستيک اوليه هستند سازه وارد محدوده رفتار غيرخطي مي‌شود. از آنجايي‌که تغييرشکل‌هاي خمشي سبب تغييرمکان‌هاي بزرگ در قسمت‌هاي فوقاني سازه مي‌شوند، بنابراين استفاده از تغييرشکل‌هاي برشي در محدوده غيرخطي مي‌تواند از نظر تغييرمکان‌هاي سازه مطلوب‌تر باشد. با اين وجود، تغييرشکل‌هاي برشي در ديوار ممکن است سبب خمش موضعي در ستون‌هاي کناري ديوار شوند. از آنجا که ظرفيت خمش موضعي اعضاي قائم در ديوار برشي محدود است مقدار تغييرمکان برشي مجاز ديوار نيز محدود بوده و نمي‌توان از حداکثر ظرفيت تغييرمکاني ديوار که در شکل (۶) نشان داده شده است استفاده نمود. براي محاسبه حداکثر تغييرمکان برشي مجاز در هر طبقه بايد با توجه به مقدار تغييرمکان‌هاي برشي به‌دست آمده در طبقه موردنظر و با توجه به ظرفيت خمش موضعي ستون‌هاي طرفين ديوار عمل نمود. اين ستون‌ها با توجه به سطح مقطع و درصد فولاد قائم و ميزان نيروي محوري ناشي از خمش کلي ديوار در آنها مي‌توانند مقدار مشخصي خمش موضعي را تحمل کنند. اين خمش موضعي که ناشي از تغييرشکل برشي ديوار در مقطع موردنظر است سبب کاهش ظرفيت تغييرمکاني سيستم ديوار در مناطقي که خمش کلي ديوار بالا است (قسمت پايين ديوار) مي‌شود که در شکل (۷) نشان داده شده است. در اين شکل ظرفيت تغييرمکان نسبي به‌دست آمده در ديوار با توجه به اثر خمش موضعي و مقادير نهايي تغييرمکان نسبي طبقات به‌صورت سطح هاشور خورده نشان داده شده است. سطح هاشور خورده در شکل (۷) نشان‌دهنده حداکثر تغييرمکان‌هاي غيرخطي مجاز در هر طبقه است که برابر با فاصله بين منحني تغييرمکان‌هاي الاستيک طبقات تا کوچک‌ترين مقدار حاصله از منحني‌هاي ۳ يا ۴ در هر طبقه است.



شکل (۶): تغييرشکل‌هاي برشي، خمشي و نهايي در سطح عملکرد ديوار



شکل (۷): تعيين ظرفيت تغييرمکان غيرخطي حداکثر در ارتفاع ديوار

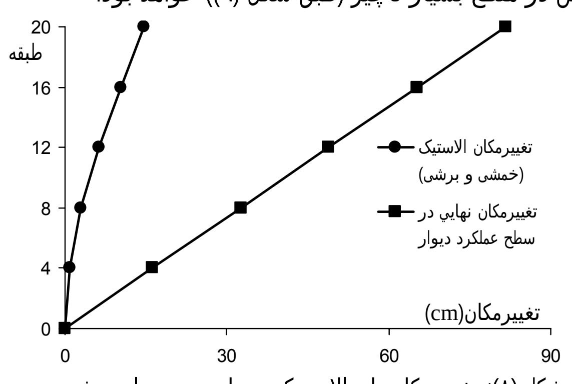
۵- ديوارهاي برشي با توانايي جذب انرژي در ارتفاع

با توجه به موارد گفته شده در مورد ظرفيت‌هاي تغييرشکل‌هاي غيرالاستيک در ديوار مشخص مي‌شود که فرآيند جذب انرژي مطلوب در ديوار مي‌تواند به‌صورت جذب

انرژي خمشي و يا تركيبي از خمش و برش در نظر گرفته شود. بدين ترتيب مي‌توان از همه ظرفيت تغييرمكان نسبي طبقات براي جذب انرژي در ارتفاع ديوار استفاده نمود. اين ويژگي رفتار دوگانه با تعيين ابعاد، شكل هندسي و فولادگذاري مقاطع ديوار ممكن خواهد بود. به‌عنوان مثال با كاهش ظرفيت برشي و افزايش شكل‌پذيري برشي مقطع مي‌توان فرآيند جذب انرژي را به سمت جذب انرژي برشي برد. هم‌چنين مي‌توان بر مبناي استفاده هم‌زمان از رفتار جذب انرژي خمشي و برشي به طراحي بهينه دست يافت. در اين مطالعه براي ساده‌سازي مسأله فرض شده است كه جذب انرژي فقط به صورت برشي است و رفتار خمشي سيستم بدون اتلاف انرژي باقي مانده است.

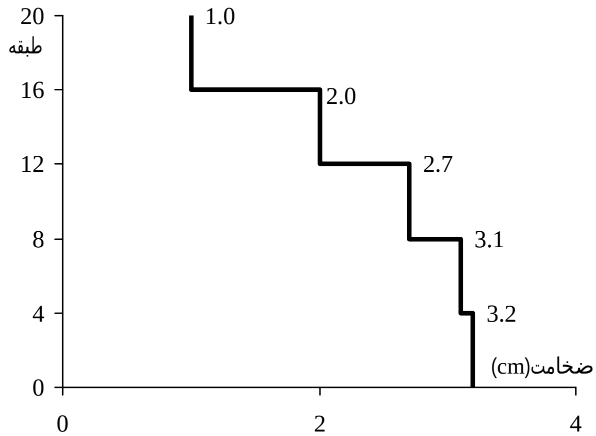
براي بررسي امكان ايجاد تغييرمكان‌هاي برشي در ارتفاع سازه، ديواري به ارتفاع ۶۸ متر و عرض ۱۰ متر كه قسمتي از سيستم باربري جانبي يک ساختمان ۲۰ طبقه است در نظر گرفته شده است. بار نهايي وارده بر ديوار برابر با ۱۱۵ تن است كه به‌صورت استاتيكي و به شكل مثلثي در ارتفاع ديوار تقسيم شده است. سطح مقطع برشي ديوار با فرض آن‌كه مقاومت خمشي لازم در ديوار از طريق مقاطع ضخيم در دو لبه انتهايي آن تامين شود، از طريق تناسب بين نيروي برشي هر طبقه در مقايسه با مقاومت مصالح بتني ديوار بدست آمده است.

در شكل (۸) تغييرمكان الاستيک ديوار و تغييرمكان نهايي آن در سطح عملكرد مطلوب ديوار نشان داده شده است. اگر قرار باشد كه ديوار موردنظر فقط با تغييرشكل‌هاي غيرالاستيک برشي به حد نهايي تغييرمكان نشان داده شده در شكل (۷) برسد مي‌توان نشان داد كه نمودار توزيع ضخامت فرضي مقاطع مختلف ديوار در ارتفاع با توجه به حداقل فولاد برشي ممكن در مقطع بسيار ناچيز (طبق شكل (۹)) خواهد بود.



شكل (۸): تغييرمكان‌هاي الاستيک و نهايي در ديوار برشي

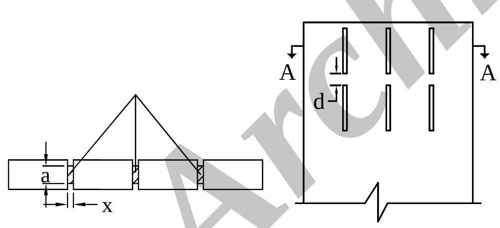
همان‌طور كه ديده مي‌شود مقادير بدست آمده براي ضخامت مقطع ديوار مقاديري غيرعملي خواهد بود. از آنجا كه ضخامت حداقل ديوارها در عمل چندين برابر مقادير فوق است مي‌توان نتيجه گرفت كه يک ديوار برشي با قابليت جذب انرژي به‌صورت برشي كامل نمي‌تواند با مقاطع عرضي كامل و بدون شكاف يا بازشو وجود داشته باشد.



شكل (۹): نمودار توزيع ضخامت فرضي مقاطع ديوار

۵-۱- ديوارهاي برشي شكاف‌دار

چنانچه بخواهيم كرنش برشي غيرالاستيک در مقطع ديوار ايجاد شود يكي از راه‌هاي موجود ايجاد لغزش نسبي بين لايه‌هاي موازي قائم در ديوار است [۳]، [۴]، [۵]، [۶]. اين كار سبب ايجاد كرنش برشي بين دو لايه و در نهايت كرنش برشي در مقطع خواهد شد. شكل (۱۰) ديوار شكاف‌دار و عضو رابط بين لايه‌هاي قائم را نشان مي‌دهد. از تغييرشكل برشي عضو رابط براي ايجاد شكل‌پذيري برشي ديوار به ميزان تعيين شده استفاده مي‌شود.



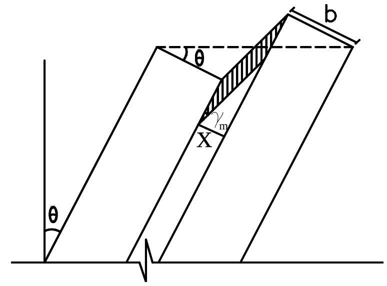
الف – ديوار برشي شكاف‌دار   ب- مقطع A-A

شكل (۱۰): ديوار برشي شكاف‌دار و موقعيت اعضاي رابط

تغييرمكان برشي ديوار فقط با يک شكاف طبق شكل (۱۱) به‌صورت رابطه (۱) است:

$$\theta = \frac{\gamma_m x}{2b + x} = \frac{\gamma_m x}{L} \qquad (1)$$

كه در آن γ_m حداكثر كرنش برشي نهايي عضو رابط است كه ۰/۰۰۴ در نظر گرفته شده است. L، b و x به ترتيب عرض ديوار، عرض كاهش يافته لايه قائم و طول مؤثر شكاف است.



شکل (۱۱): تغییرمکان برشي ديوار شکاف‌دار

با توجه به مشخصه رفتاري اعضاي رابط نشان داده شده در شکل (۱۰) مي‌توان سطح مقطع عضو رابط را طوري تعيين نمود که تغییرمکان نسبي برشي اين تير در برش V_i برابر δ_i باشد به‌طوري‌که:

$$V_i = \gamma_1 G_1 A_i + \left(\frac{\delta_i}{l_e} - \gamma_1\right) G_2 A_i \quad (۲)$$

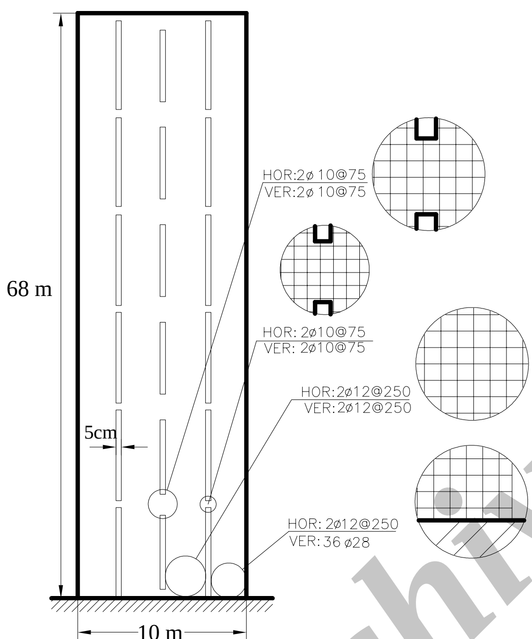
که در آن l_e طول مؤثر عضو رابط و A_i سطح مقطع آن است. در رابطه فوق γ_1 کرنش برشي جاري شدن و G_1 و G_2 به ترتيب مدول برشي الاستيک و مدول برشي در ناحيه پلاستيک است. از رابطه (۲) مقدار سطح مقطع لازم براي عضو رابط به‌صورت رابطه (۳) بدست مي‌آيد:

$$A_i = \frac{V_i}{\gamma_1 G_1 + \left(\frac{\delta_i}{l_e} - \gamma_1\right) G_2} \quad (۳)$$

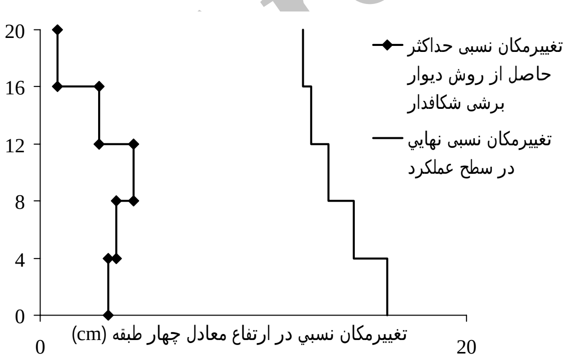
در اين رابطه $l_e = x + d.\tan\alpha$ است و نشان‌دهنده آن است که طول مؤثر عضو رابط بيشتر از عرض شکاف است. در اين رابطه α زاويه ترک‌هاي ايجاد شده در دو انتهاي عضو رابط و در داخل لايه‌هاي قائم ديوار است.

نمونه ديوار برشي مورد مطالعه در اين قسمت از نظر ابعاد کلي ارتفاع و عرض مشابه با ديوار معرفي شده در قسمت قبلي است. در اين ديوار شکاف‌هايي به ارتفاع معادل چهار طبقه ساختمان به طريقي قرار داده شده‌اند تا بتوان تغییرمکان‌هاي نسبي برشي قابل‌توجهي در قسمت‌هاي بالاي ديوار که لنگر خمشي کمتري دارد، ايجاد کند. ديوار برشي مورد نظر طبق شکل (۱۲) در نظر گرفته شده است.

با تغيير تعداد و ارتفاع شکاف‌ها، ابعاد مختلفي از اعضاي رابط بين لايه‌هاي قائم ديوار در هر تراز را مي‌توان بدست آورد. در اين تحقيق تعداد شکاف‌ها در همه طبقات سه عدد در نظر گرفته شده است. در اين حالت ديوار به‌دست آمده از نظر مقاومت خمشي با ديوار قبلي يکسان فرض شده ولي مقاومت برشي آن بوسيله ايجاد شکاف‌هاي گفته شده کاهش يافته است. بدين ترتيب انتظار مي‌رود که تحت اثر نيروهاي برشي وارده بر ديوار بتوان به تغییرمکان‌هاي نسبي تعيين شده براي سازه در حالت غيرخطي (ايجاد شده از تفريق تغییرمکان‌هاي الاستيک ديوار و تغییرمکان‌هاي نهايي) دست يافت. در شکل (۱۳) نمودار تغییرشکل نسبي نهايي در سطح عملکرد سازه که بر مبناي منحني تغییرشکل‌هاي رسم شده در شکل (۷) بدست آمده است با مقادير بدست آمده از ديوارهاي برشي شکاف‌دار در مثال اخير مقايسه شده‌اند. همان‌طور که در اين شکل ديده مي‌شود تغییرشکل نسبي بدست آمده براي ديوارهاي شکاف‌دار هنوز با تغییرمکان‌هاي غيرالاستيک نهايي موردنظر ديوار اختلاف زيادي دارد که دليل آن محدوديت تغییرشکل‌هاي غيرالاستيک قابل دست‌يابي در اعضاي رابط است.



شکل (۱۲): مدل ديوار برشي شکاف‌دار



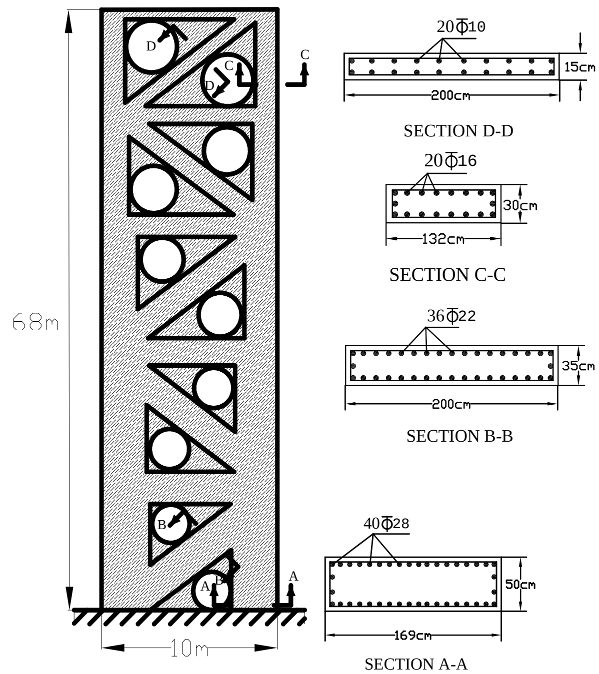
شکل (۱۳): مقايسه تغییرمکان نسبي نهايي در سطح عملکرد با مقادير به‌دست آمده براي ديوار برشي شکاف‌دار

۵-۲- ديوارهاي برشي سوراخ دار

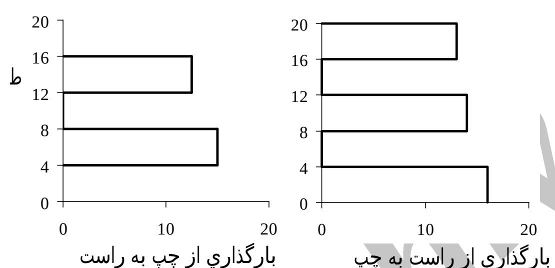
دومين راه جذب انرژي در ارتفاع ديوار برشي استفاده از سوراخ‌هايي براي کاهش ظرفيت برشي ديوار و آمادگي آن براي جذب انرژي به‌صورت برشي است. از اولين نوع ديوارهاي برشي سوراخ‌دار مي‌توان به ديوارهاي برشي کوپله اشاره نمود. اين ديوارها از جمله معدود ديوارهايي هستند که در عمل توانسته‌اند اتلاف انرژي را در ارتفاع سازه گسترش دهند. روش اصلي جذب انرژي اين ديوارها خمش‌هاي موضعي در تيرهاي رابط بين دو قسمت ديوار است که در عمل، نيازمند جزئيات طراحي دقيقي در محل اتصال تيرهاي رابط به ديوار هستند [۲]، [۹]، [۱۱].

در اين تحقيق به‌جاي ديوارهاي کوپله مطرح شده، از ديوارهايي با سوراخ‌هاي نامنظم در ارتفاع استفاده شده است. در اين حالت نيز مقاومت خمشي ديوار در ارتفاع مانند ديوار اصلي بدون سوراخ در نظر گرفته شده است. راه انتقال برش در اين ديوار فرض وجود عناصر خرپايي مايل براي تحمل برش به‌گونه‌اي است که تغييرشکل‌هاي برشي نسبي از راه تغييرشکل محوري عناصر خرپايي صورت پذيرد. در اين حالت فرض مي‌شود که عناصر بتن مسلح قطري فقط در حالتي که تحت اثر کشش قرار مي‌گيرند جذب انرژي مي‌نمايند. بدين ترتيب عناصري که تحت اثر فشار قرار گرفته‌اند با تعويض جهت بارگذاري، تحت اثر کشش قرار گرفته و به جذب انرژي مي‌پردازند. اين عناصر خرپايي در شکل (۱۴) نشان داده شده‌اند. در اين رابطه ابتدا به تحليل سازه ديوار با روش خرپايي، تحت اثر نيروهاي وارده پرداخته شده و سپس مقاطع عناصر خرپايي قطري طوري طراحي مي‌شوند که تحت اثر نيروهاي وارده به حداکثر تغييرمکان‌هاي نسبي قابل حصول (نشان داده شده در شکل (۷)) دست يابند. گفتني است که برحسب مقدار نيروهاي برشي وارده در هر مقطع ابعاد متفاوتي را براي سوراخ‌هاي ديوار بايد تعيين نمود. در رابطه با چگونگي طراحي اعضاي بتني بازشودار روش‌هاي ديگري نيز پيشنهاد شده است که کاربرد آنها اغلب محدود به تيرهاي بتني بوده است[۷].

شکل (۱۴) ديوار مورد بحث را به همراه ابعاد و ميلگردگذاري آن نشان مي‌دهد. گفتني است که از مقاومت کششي بتن درحالتي‌که عناصر قطري تحت اثر کشش قرار مي‌گيرند صرفنظر شده است. تغييرمکان‌هاي نسبي حداکثر ديوار در شکل (۱۵) رسم شده است. محور افقي نمودار اين شکل نشان‌دهنده تغييرمکان نسبي در ارتفاع معادل چهار طبقه است. همان‌طور که در اين شکل ديده مي‌شود تغييرشکل‌هاي نسبي غيرالاستيک بصورت يکنواخت در ارتفاع نبوده و با توجه به جهت بارگذاري به بخش خاصي از ديوار محدود است.



شکل (۱۴): مدل ديوار سوراخ‌دار با روش خرپايي



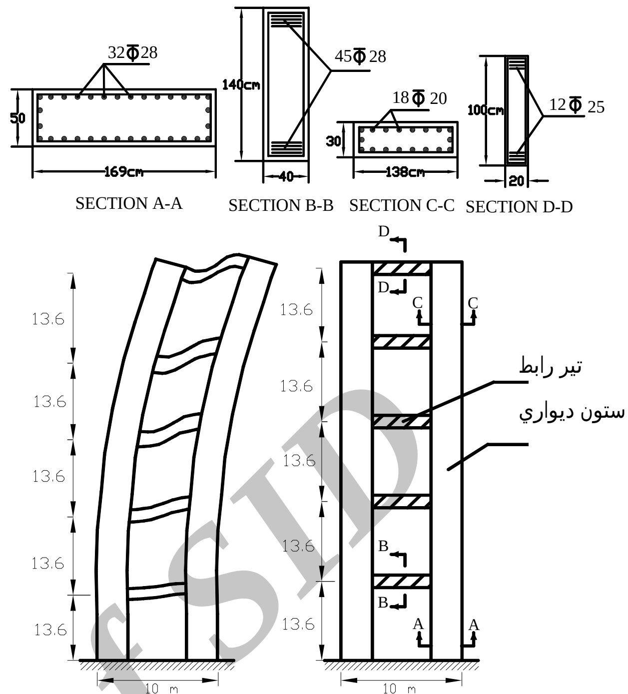
شکل (۱۵): تغييرمکان نسبي ديوار سوراخ‌دار در ارتفاع معادل چهار طبقه

۵-۳- ديوارهاي برشي ميان‌خالي

سومين روش جذب انرژي در ارتفاع ديوار برشي، استفاده از ديوارهاي ميان‌خالي است. در اين حالت مانند يک قاب خمشي، مي‌توان با توجه به ميزان تغييرمکان‌هاي نسبي مجاز طبقات، ابعاد تيرها و ستون‌هاي قاب را طوري بدست آورد تا به حداکثر تغييرمکان نسبي نهايي در سطح عملکرد دست يافت. اشکال (۱۶-الف) و (۱۶-ب) به‌ترتيب ابعاد هندسي، مشخصات و حالت تغييرشکل يافته ديوار را نشان مي‌دهند.

روش عملکرد ديوار برشي در اين حالت، رفتار خمشي اعضاي قابي‌شکل است که در مقايسه با ديوار برشي شکاف‌دار، تيرهاي رابط به‌طور عمده داراي رفتاري خمشي هستند. در اين سيستم سازه‌اي نيز مانند موارد پيشين مقاومت

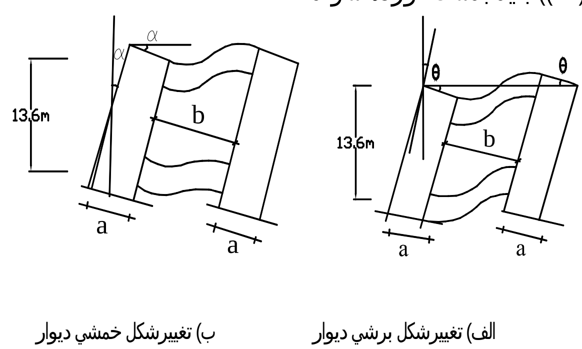
خمشي كل نسبت به ديوار بدون سوراخ يكسان در نظر گرفته شده است.



الف- ابعاد هندسي و مشخصات ديوار ب- ديوار تغييرشكل يافته

شكل (۱۶): ديوار ميان‌خالي

نيروهاي جانبي وارده بر سازه باعث ايجاد نيروهاي برشي در ستون‌ها مي‌شوند كه اين نيروها باعث ايجاد لنگر در تيرهاي رابط متصل به ستون‌ها مي‌گردند. براي رسيدن به تغييرمكان نسبي برشي معادل با مقادير تغييرمكان ديوار در سطح عملكرد رابطه بين تغييرشكل نسبي دو سر تيرهاي رابط و تغييرشكل نسبي طبقات هم‌تراز تيرهاي رابط (نشان داده شده در شكل (۱۷)) بايد بدست آورده شوند.



الف) تغييرشكل برشي ديوار ب) تغييرشكل خمشي ديوار

شكل (۱۷): قسمتي از ديوار برشي بين دو تير رابط

فرض بر آن است كه تغييرشكل‌هاي برشي اعضاي قاب ناچيز بوده و تغييرمكان‌هاي قاب عمدتاً تحت اثر رفتار خمشي اعضاي آن است. قاب حاصله را مي‌توان با روشهاي مرسوم در تحليل سازه مورد بررسي قرار داد كه در اينجا روش ساده شده‌اي مبتني بر رفتار خرپاي ويرانديل به‌كار گرفته شده است.

در اين روش نيروهاي برشي باعث ايجاد لنگر در دو انتهاي ستون‌ها و در دو سر تيرهاي رابط شده و اين لنگرها سبب ايجاد تغييرشكل‌هاي نسبي در سازه مي‌شوند. هر چه تيرهاي رابط ضعيف‌تر در نظر گرفته شوند تغييرشكل‌هاي نسبي برشي سازه بيشتر مي‌شود. بدين ترتيب مي‌توان ابعاد و ميزان ميلگردهاي خمشي تيرهاي رابط را طوري تعيين نمود كه اين تيرها حداكثر تغييرشكل نسبي را (معادل با مقادير نشان داده شده در شكل (۷)) براي سازه ايجاد نمايند.

با توجه به شكل (۱۷) تغييرشكل نسبي تقريبي تير رابط در اثر خمش الاستيک از رابطه (۴) و در اثر تغييرشكل نهايي از رابطه (۵) بدست مي‌آيد (با فرض يكسان بودن دو عضو قائم).

$$\delta_M = (a+b)\tan\alpha \qquad (۴)$$

$$\delta_{su} = (2a+b)\tan\theta \qquad (۵)$$

كه در آن a برابر پهناي هر عضو قائم، b طول آزاد تير رابط و α تغيير زاويه ايجاد شده در ستون‌ها در حالت خمش الاستيک و θ تغيير زاويه ايجاد شده در ديوار براي حالت غيرالاستيک است. پس از بدست آوردن δ_M و δ_{su} مي‌توان تير رابط را طبق آن طراحي نمود.

با استفاده از نموار تغييرمكان‌هاي الاستيک در طبقات (شكل (۸) در مثال مورد مطالعه) مقادير شيب ناشي از خمش الاستيک در تراز هر تير عبارت است از:

$$\alpha = \frac{\Delta_{em}}{h} \qquad (۶)$$

كه در آن Δ_{em} مقدار تغييرمكان نسبي جانبي الاستيک خمشي در ارتفاع معادل چهار طبقه است.

هم‌چنين مقدار تغيير زاويه تير رابط در حالت غيرالاستيک بصورت رابطه (۷) خواهد بود.

$$\theta = \frac{\Delta}{h} \qquad (۷)$$

و حال با استفاده از روابط (۴) و (۵) تغييرمكان نسبي دو سر تير رابط (δ_{tot}) بدست خواهد آمد:

$$\delta_{tot} = \delta_M + \delta_{su} \qquad (۸)$$

با استفاده از روابط بين انحنا و تغييرمكان، مقادير انحناي جاري شدن تير (ϕ_y) و انحناي نهايي (ϕ_u) را مي‌توان بصورت رابطه (۹) نشان داد [۸].

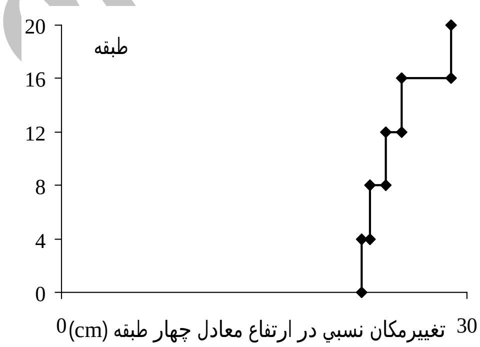
$$\delta_M = \frac{\phi_y\, l^2}{6} \qquad (۹)$$

$$\delta_{tot} = \delta_M + \delta_{su} = \frac{\phi_y l^2}{6} + \left(\phi_u - \phi_y\right) l_p \left(l - l_p\right) \qquad (۱۰)$$

در روابط بالا، l طول تير و l_p طـول مفـصل پلاسـتيک اسـت. حال با قرار دادن δ_{tot} در رابطـه (۱۰)، ϕ_u بـه عنـوان انحنـاي نهايي بدست مي‌آيد.

با استفاده از مقادير لنگرهاي بدست آمده و با فرض مساوي بودن مقادير ميلگردهاي کششي و فشاري در بالا و پائين مقطع، تيرهاي رابط طراحي شده‌اند. اين تيرها بايد قادر به تحمل مقادير انحناهاي بالاتر از انحناي نظير مقاومت خمشي تيرها (M_u) تا محدوده انحناي حداکثر براي ايجاد تغييرمکان در سطح عملکرد ديوار باشند که اين ويژگي در عمل به علت وجود ميلگردهاي فشاري ميسر شده است.

مقادير حداکثر تغييرمکان‌هاي نسبي در ارتفاع معادل چهار طبقه براي ديوار مورد بحث در شکل (۱۸) نشان داده شده است. طراحي تيرهاي رابط با استفاده از اين روش نشان مي‌دهد که مي‌توان به حداکثر تغييرمکان‌هاي نسبي لازم در ديوار رسيد و از اين‌رو استفاده از ديوارهاي برشي ميان‌خالي مي‌تواند بهترين روش براي رسيدن به تغييرشکل‌هاي نسبي لازم در طبقات و جذب انرژي مطلوب در ارتفاع ديوار باشد.



شکل (۱۸): مقادير تغييرمکان نسبي غيرخطي به‌دست آمده در طبقات در روش ديوار ميان‌خالي

٦- بحث و بررسي

در ديوارهاي برشي با توجه به اين‌که لنگر خمشي در ارتفاع با تابع درجه سوم کاهش مي‌يابد نمي‌توان انتظار جذب انرژي خمشي در قسمت‌هاي بالاي سازه را داشت. اما از آنجا که نيروي برشي در ارتفاع با تابع درجه دوم کاهش مي‌يابد مقدار برش در طبقات بالاي سازه همچنان مقدار قابل‌توجهي است و از اين‌رو مي‌توان به افزايش جذب انرژي در سازه از راه ايجاد تغييرمکان‌هاي نسبي برشي پرداخت. در اين مقاله سه روش براي جذب انرژي در ارتفاع ديوارهاي برشي مورد بررسي قرار گرفت. هر روش داراي قابليت مختص به خود براي رسيدن به تغييرمکان‌هاي نسبي موردنظر در طبقات مختلف است. اولين روش مورد بررسي، استفاده از ديوار برشي شکاف‌دار بوده که مشخص شد اين نوع ديوار به دليل محدوديت تغييرشکل‌هاي برشي اعضاي رابط در آن داراي ظرفيت لازم براي رسيدن به حداکثر تغييرشکل‌هاي نسبي لازم نيست. در تحقيق حاضر، با توجه به تعداد شکاف‌هاي در نظر گرفته شده، مقادير تغييرمکان‌هاي نسبي حداکثر قابل دست‌يابي اين ديوار (u_1) کوچک است. اين مقادير در جدول شماره (۱) آورده شده است.

در ديوارهاي برشي سوراخ‌دار با استفاده از ايجاد روش خرپايي سعي در ايجاد تغييرمکان‌هاي نسبي بيشتر در طبقات شد. در اين روش تغييرمکان‌هاي نسبي ديوار از راه ايجاد تغييرشکل‌هاي محوري در اعضاي قطري تأمين شدند. يکي از مسائل اين روش امکان باريک‌شدگي ميلگردهاي اعضاي قطري به‌علت غيريکنواختي در سختي محوري اين عناصر در مجاورت سوراخ‌ها است که اين مسأله مي‌تواند باعث محدوديت تغييرشکل ميلگردهاي اعضاي قطري شود. مسأله ديگر در مورد اين روش، تحت کشش و فشار قرار گرفتن اعضاي قطري به طور متناوب بود. هنگامي که يک عضو بتني قطري در يک دوره تحت اثر کشش قرار گيرد بتن محصورکننده ميلگردهاي آن ترک برداشته و بين قطعات موجود فاصله ايجاد مي‌شود. بدين ترتيب در دوره بعدي که اين عضو تحت اثر فشار قرار مي‌گيرد، احتمال اينکه ميلگردهاي عضو در محل ترک‌خوردگي در اثر فشار وارده در دوره‌هاي متوالي بارگذاري کمانش کنند وجود دارد. با اين حال، اين روش مزاياي بيشتري نسبت به روش قبلي دارد. مقادير حداکثر تغييرمکان‌هاي نسبي در اين روش (u_2) براي ديوار موردنظر در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مقايسه تغييرمکان‌هاي نسبي در ديوارهاي مختلف

چهارطبقه	U_1(cm)	U_2(cm)	U_3(cm)	تغييرمکان نسبي مجاز U_{all}(cm)
اول	۲/۸	۱۶	۲۲/۲	۱۵/۲
دوم	۳/۱	۱۶	۲۲/۶	۱۴/۱
سوم	۳/۷	۱۶	۲۳/۵	۱۳/۰
چهارم	۲/۴	۱۶	۲۵/۴	۱۲/۴
پنجم	۲/۸	۱۶	۲۹/۰	۱۲/۰

روش سوم استفاده از ديوارهاي برشي با عملکرد قابي بوده است که در آن سعي بر ايجاد تغييرمکان‌هاي نسبي بيشتر در سازه شد. با توجه به قابليت نسبي مناسب تيرهاي رابط به کار رفته در اين سازه و توانايي آنها در رسيدن به انحناي خمشي بالا، اين روش قابليت بسيار خوبي در ايجاد

تغييرمكان‌هاي نسبي در ديوار داشته است. از مهم‌ترين عوامل افزايش اين قابليت اثر محصوركنندگي خاموتها و هم‌چنين وجود ميلگردهاي فشاري در اين تيرها بوده است. مقادير قابل دست‌يابي تغييرمكان‌هاي نسبي غيرخطي اين روش در ارتفاع معادل چهار طبقه (u_3) در جدول (۱) آورده شده است. با توجه به يكسان بودن نيروهاي برشي وارده به ديوارها به نظر مي‌رسد كه استفاده از ديوارهاي شكاف‌دار داراي محدوديت در رسيدن به تغييرمكان‌هاي نسبي بالا است. در صورتي كه دو روش استفاده از سوراخ براي ايجاد عملكرد خرپايي و يا ايجاد سازه قابي، داراي شكل‌پذيري مناسب‌تري براي رسيدن به تغييرمكان‌هاي نسبي لازم هستند.

۷- نتيجه‌گيري

مطالعات انجام شده در اين تحقيق نشان مي‌دهند كه مي‌توان طراحي ديوارهاي برشي را به‌گونه‌اي انجام داد كه نه‌تنها رفتار سازه از بعد ديناميكي با تغيير در مشخصه‌هاي سازه بهتر شود بلكه رفتار غيرخطي و شكل‌پذير آنها نيز به صورتي ارتقا يابد كه از تمركز خسارت و يا شكل‌پذيري در قسمت‌هاي پاييني ديوار اجتناب شود و جذب انرژي در حجم زيادتري از مصالح و با تمركز كمتري صورت پذيرد. ايجاد اين ويژگي در ديوارها نه‌تنها هزينه خاصي ندارد بلكه مي‌تواند از بعد طراحي داخلي و طرح معماري خارجي نيز قابل قبول‌تر از ديوارهاي برشي موجود باشد. نتايج به‌دست آمده از اين تحقيق را مي‌توان به شرح ذيل دسته‌بندي كرد.

۱- مطالعات انجام شده روي مدل ساده سازه‌اي از ديوارهاي برشي با رفتار دوگانه شكل‌پذير مبين كاهش تمركز اتلاف انرژي و به عبارتي كاهش تقاضاي شكل‌پذيري در پاي اين ديوارها در مقايسه با ديوارهاي برشي متداول است.

۲- سه روش ايجاد درزه يا شكاف، ايجاد سوراخ و در نهايت استفاده از ديوار ميان‌خالي به‌عنوان روش‌هاي افزايش جذب انرژي در ارتفاع ديوار مطرح و مورد بررسي قرار گرفته‌اند. اين ديوارها داراي رفتار دوگانه شكل‌پذير بوده و در عمل مي‌توان با ايجاد تناسبات لازم در آنها به رفتاري شكل‌پذيرتر و مناسب‌تر در مقايسه با ديوارهاي برشي معمول رسيد. از ميان سه روش گفته شده، روش ديوار ميان‌خالي داراي شكل‌پذيري مناسب‌تري براي رسيدن به تغييرمكان‌هاي نسبي حداكثر است.

۸- مراجع

[۱] ضيايي‌فر، منصور؛ مطالعه رفتار لرزه‌اي ديوارهاي برشي با رفتار دوگانه شكل‌پذير، پژوهشگاه زلزله‌شناسي و مهندسي زلزله، ۱۳۸۲.

[۲] Harries, K., "Ductility and deformability of coupling beams in reinforced concrete coupled walls", Earthquake Spectra, vol. 17, No. 3, p.p. 457-478, 2001.

[۳] Jiang, H.; Lu, X.; Kwan, A. K. H.; Cheung, Y. K., "Study on seismic slit shear wall with cyclic experiment and macro-model analysis", Structural Engineering and Mechanics, vol. 16, No. 4, p.p. 371-390, 2003.

[۴] Kwan, A. K. H.; Lu, X. L.; Cheung Y. K., "Elastic analysis of slit shear walls", International Journal of Structures, vol. 13, No. 2, p.p. 75-92, 1993.

[۵] Kwan, A. K. H.; Dai, H.; Cheimg, Y. K., "Non–linear seismic response of reinforced concrete slit Shear walls", Journal of Sound and Vibration, vol. 226, No. 4, p.p. 701-718, 1999.

[۶] Lu, X. L.; Wu, X. H., "Shaking table test and analysis of a new type of shear wall with seismic control device", 11th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 10, 1996.

[۷] Mansur, M. A.; Tan, K. H., Concrete beams with openings, Analysis and design, CRC Press, London, 1999.

[۸] Park, R.; Paulay, T., Reinforced concrete structures, John Wiley and Sons, New York, 1975.

[۹] Paulay, T., "The displacement capacity of reinforced concrete coupled walls", Engineering of Structures, vol. 24, p.p. 1165-1175, 2002.

[۱۰] Paulay, T.; Priestley, M. J. N., Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, John Wiley and Sons Inc, USA, p.p. 363-460, 1992.

[۱۱] Paulay, T.; Santhakumar, A. R., "Ductile behavior of coupled shear walls", Journal of the Structural Division, ASCE, vol. 102, No. 1, p.p. 93-108, 1976.

[۱۲] Prakash, V.; Powell, G. H.; Campbell, S., Drain-2DX, Department of civil engineering, University of California, Berkeley, CA, 1993.

[۱۳] Wallace, J. W.; Moehle, J. P., "Ductility and detailing requirements of bearing wall buildings", Journal of Structural Engineering, vol. 118, No. 6, p.p. 1625-1644, 1992.

[۱۴] Wallace, J. W., "A new methodology for seismic design of RC shear walls", Journal of Structural Engineering, vol. 120, No. 3, p.p. 863-884, 1994.

[۱۵] Wallace, J. W., "Seismic design of RC structural walls, part I: new code format", Journal of Structural Engineering, vol. 121, No. 1, p.p. 75-87, 1995.

[۱۶] Wallace, J. W., "Seismic design of RC structural walls, part II: application", Journal of Structural Engineering, vol. 121, No. 1, p.p. 88-101, 1995.