

# مطالعه رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی با رفتار دوگانه شکل‌پذیر

منصور ضیایی‌فرا<sup>۱</sup>؛ جمشید صبوری<sup>۲\*</sup>؛ فرامرز عالمی<sup>۳</sup>

## چکیده

دیوارهای برشی اغلب به گونه‌ای طراحی می‌شوند که رفتاری خمشی و شکل‌پذیر داشته باشند. این دیوارها در عمل به صورت تیر طره عمل نموده و در محدوده اتصال به پایه خود دارای لنگر قابل‌توجهی هستند و بدین ترتیب بیش‌تر جذب انرژی زلزله در پایین این دیوارها صورت خواهد گرفت. در این تحقیق سعی شده است با ایجاد رفتار دوگانه شکل‌پذیر خمشی- برشی در این دیوارها از قسمت‌های فوقانی دیوار نیز در جذب انرژی استفاده شود و از این طریق عملکرد دیوارهای برشی ارتقا داده شود. این مسأله در ابتدا از طریق یک مدل ساده سازه‌ای بررسی گردید و نشان داده شد که رفتار دوگانه شکل‌پذیری می‌تواند در عمل به بهبود عملکرد سازه کمک نماید. سپس سه نوع دیوار برشی (دیوارهای برشی شکاف‌دار، سوراخ‌دار و میان‌خالی) که دارای چنین قابلیت‌هایی هستند معرفی شده و عملکرد هر یک از آنها در این ارتباط مورد بحث قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که از میان این سه دیوار به ترتیب دیوارهای برشی میان‌خالی، سوراخ‌دار و شکاف‌دار عملکرد مناسب‌تری دارند.

## کلمات کلیدی

جذب انرژی در ارتفاع دیوارهای برشی، رفتار دوگانه شکل‌پذیر خمشی- برشی.

## *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.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۹/۳۰

تاریخ اصلاحات مقاله: ۱۳۸۸/۱۱/۲۸

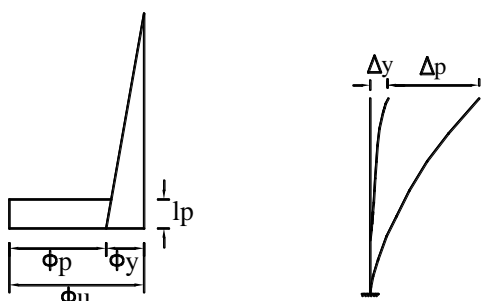
<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری مهندسی زلزله بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله Mansour@iiees.ac.ir

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول و دانشجوی دکتری مهندسی زلزله دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران jam\_sab@yahoo.com ، J-

Sabouri@iaut.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری مهندسی زلزله پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله f-alemi@iiees.ac.ir

ترک‌ها، انحنای مقطع دیوار در پای آن افزایش می‌یابد و پس از رسیدن مقطع به انحنای جاری شدن  $(\phi_y)$ ، افزایش انحنای با سرعت بیشتری انجام می‌گیرد تا مقطع سازه به حد انحنای نهایی  $(\phi_u)$  برسد. در این لحظه مفصل پلاستیک خمشی کامل در پایین دیوار ایجاد شده (شکل ۱-ب) و سازه تا حد حداکثر ظرفیت خود  $(\Delta_y + \Delta_p)$  بدون افزایش ظرفیت باربری تغییر مکان خواهد داد (شکل ۱-الف) [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]، [۱۶]. بنابراین مفصل پلاستیک خمشی در پایین دیوار باعث ایجاد تغییر مکان‌های نسبی زیاد در قسمت‌های بالای دیوار خواهد شد. این فرآیند رفتاری باعث می‌شود که جذب انرژی زمین‌لرزه فقط در قسمت پایین دیوار صورت پذیرد و قسمت‌های بالاتر آن به طور عمده سهم ناچیزی از جذب انرژی داشته باشند. این ویژگی مبین آن است که از ظرفیت‌های شکل‌پذیری قسمت‌های بالاتر دیوار برشی استفاده‌ای نشده است.



الف) شکل تغییر مکان دیوار (ب) نمودار انحنای خمشی در ارتفاع دیوار  
شکل (۱): نمودار انحنای خمشی و شکل تغییر مکان خمشی دیوار

### ۳- افزایش جذب انرژی در ارتفاع برای دیوارهای برشی

برای استفاده بهینه از ظرفیت‌های شکل‌پذیری دیوار برشی در جذب انرژی، مدل یک دیوار برشی بوسیله عناصر خرپایی با استفاده از برنامه DRAIN-2DX ساخته شده است [۱۲]. خرپای نشان داده شده در شکل (۲) مدل ساده شده یکی از چهار دیوار برشی ساختمانی ۱۰ طبقه با مساحت زیربنای کل ۲۵۰۰ مترمربع است. ارتفاع دیوار اصلی ۳۰ متر و ضخامت آن ۳۰ سانتیمتر است. عرض دیوار برابر با ۵ متر بوده که در مدل خرپایی ساخته شده عرض مؤثر به ۴ متر کاهش یافته است. سطح مقطع عناصر خرپایی قائم و افقی به ترتیبی تعیین شده‌اند که دوره تناوب ارتعاش طبیعی و شکل مودی بدست آمده برای مدل در مود اول انطباق مناسبی با دوره تناوب و شکل مود اصلی ساختمان داشته باشند (دوره تناوب مود اول ۱/۸۳۶ ثانیه بوده است). رفتار مصالح عناصر خرپایی به صورت الاستوپلاستیک با مدول الاستیسیته فولاد فرض شده‌اند و حد

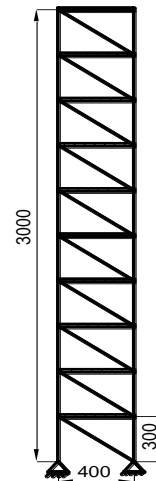
استفاده از دیوارهای برشی بعنوان یک روش معمول در انتقال نیروهای جانبی در سازه‌های با بلندی متوسط تا بالا شناخته شده است. رفتار عمومی دیوارهای برشی متداول، رفتاری خمشی است و به طور عمده این دیوارها بر مبنای خمش طراحی و فولادگذاری می‌شوند [۸]، [۱۰]. طبق فلسفه عمومی طراحی سازه‌های خمشی، این دیوارها به گونه‌ای طراحی می‌شوند که تغییر شکل‌های رفتاری برشی که حالت‌های ترد رفتاری به آن‌ها گفته می‌شود در این سازه‌ها امکان وقوع نیافتد و دیوارها بتوانند در خمش به رفتاری شکل‌پذیر دست یابند. تجربیات طراحی نشان داده‌اند که در این رابطه، مسأله خاصی در دیوارهای برشی وجود ندارد و تنها مسأله آن است که تا حدی فلسفه طراحی آنها محافظه‌کارانه به شمار می‌آید. باید توجه داشت که از آنجایی که دیوارهای برشی، سازه‌های حجیم و بزرگی هستند فقط در قسمت اتصال به پایه خود نیاز به شکل‌پذیری دارند. بنابراین طراحی آنها بصورت عناصری شکل‌پذیر در قسمت‌های فوقانی نمی‌تواند توجیهی به غیر از محافظه‌کاری داشته باشد. این نکته محرک اصلی در انجام این تحقیق بوده است. به عبارتی این سؤال مطرح است که چنانچه طبق ضوابط طراحی بتن مسلح، اجبار به تأمین شکل‌پذیری عناصر سازه‌ای وجود دارد، به چه طریق می‌توان در قسمت‌های فوقانی دیوارهای برشی از این ظرفیت برای جذب انرژی ورودی زلزله به سازه استفاده نمود.

در این تحقیق ابتدا با مطرح نمودن مسأله در بعد دینامیکی، راهکار عمومی افزایش جذب انرژی در ارتفاع سازه بصورت دیوارهای برشی با رفتار دوگانه شکل‌پذیر مطرح شده و در ادامه سعی شده است که به تناسب لازم در رابطه با هندسه دیوارها برای جذب انرژی بصورت خمشی و برشی دست یافته شود. سپس درباره سه نوع مختلف دیوار برشی با قابلیت تأمین رفتار دوگانه شکل‌پذیر، بحث و بررسی شده است.

### ۲- جذب انرژی در دیوارهای برشی

یکی از مسائل موجود در مورد دیوارهای برشی نحوه جذب انرژی در آنها است. تجربه‌های موجود در ساختمان‌های بلند با دیوارهای برشی مبین آن است که به طور معمول جذب انرژی بصورت خمشی در قسمت‌های پایین دیوار اتفاق افتاده و به تدریج از میزان جذب انرژی در ارتفاع دیوار کاسته می‌شود. بدین ترتیب با افزایش تدریجی لنگر در پای دیوار و ایجاد ترک‌های اولیه خمشی در دیوار و افزایش تعداد و عرض این

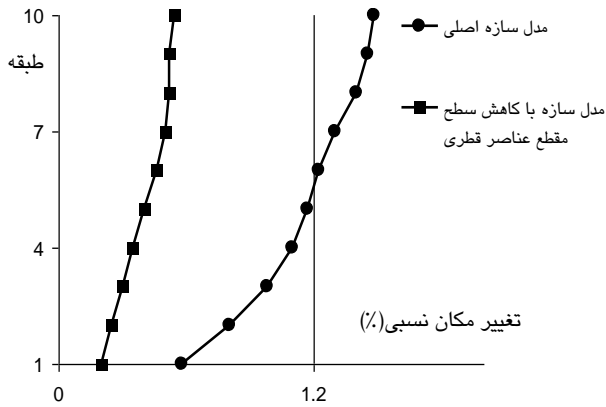
جاری شدن مصالح متناسب با ابعاد و ضخامت‌های دیوار و نیروهای طراحی آن تعیین شده‌اند [۱].



شکل (۲): مدل خرپایی دیوار برشی

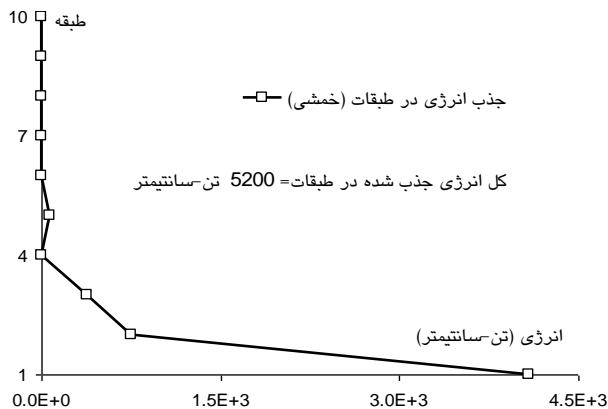
برای مشخص شدن چگونگی جذب انرژی در ارتفاع دیوار، تحلیل تاریخچه زمانی برای این مدل سازه‌ای در حالات مختلف انجام شده است. جذب انرژی در دیوارهای خمشی متداول به این صورت است که خمش کلی دیوار باعث ایجاد یک زوج نیرو در دو ستون کناری هر طرف دیوار می‌شود که یکی از این دو نیرو به صورت فشاری و دیگری کششی عمل نموده و در نتیجه جذب انرژی با جاری شدن اعضای قائم خرپایی در فشار و کشش و در پایین دیوار صورت خواهد گرفت.

در مدل سازه‌ای نشان داده شده در شکل (۲)، برای ایجاد مفصل پلاستیک کامل در پای دیوار تحت اثر زلزله‌السنتر، سطح مقطع اعضای قائم به مقدار ۲۰٪ کاهش داده شد. با استفاده از تحلیل غیرخطی دینامیکی مشخص شد که سازه به سرعت دچار افزایش تغییرمکان در بالای دیوار و همچنین تغییرمکان‌های نسبی در طبقات بالا از مقدار انتخابی بر مبنای سطح عملکرد موردنظر دیوار (۱/۲٪) بیشتر است. حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات این دیوار برای مدل سازه اصلی در شکل (۳) نشان داده شده است. جذب انرژی در سازه فقط در اعضای قائم بوده که مبین جذب انرژی در رفتار خمشی است. شکل (۴) نشان‌دهنده جذب انرژی در ارتفاع سازه است. با توجه به این شکل مشخص می‌شود که به طور تقریبی همه جذب انرژی به صورت خمشی در قسمت‌های پایین سازه صورت گرفته است. دلیل این عملکرد آن است که مجموعه دیوار برشی مورد بحث مانند یک تیر طره‌ای با اتصال گیردار به زمین عمل می‌کند.



شکل (۳): حداکثر تغییرمکان نسبی طبقات در زلزله‌السنتر برای

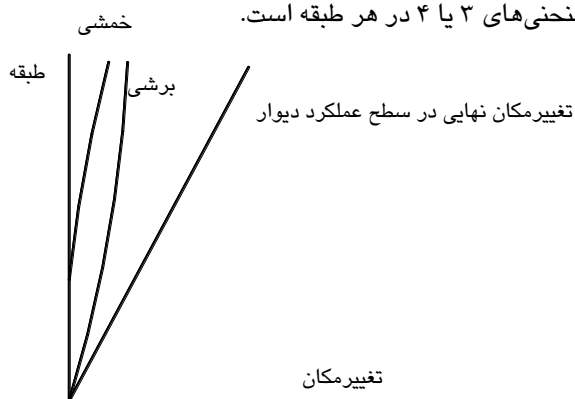
مدل اصلی و مدل با کاهش سطح مقطع عناصر قطری



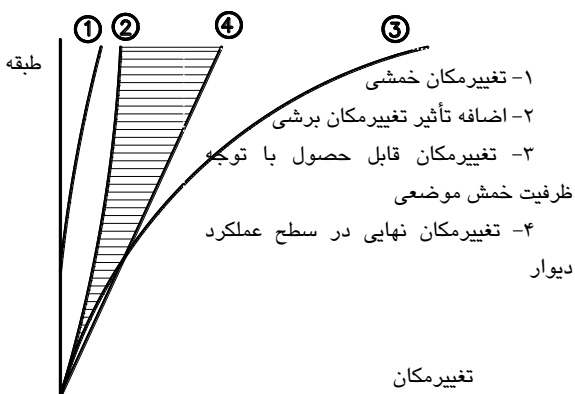
شکل (۴): نمودار جذب انرژی ورودی برای زلزله‌السنتر در مدل اصلی

با توجه به مطالب گفته شده برای بهبود عملکرد سازه، اول باید روشی انتخاب شود که تغییرمکان‌های نسبی طبقات فوقانی را محدود سازد. بدین منظور اعضای خمشی خرپای موردنظر را باید قوی‌تر انتخاب نمود تا با کاهش انحنای مفصل خمشی در پای دیوار از تغییرمکان‌های قسمت‌های بالایی دیوار کاسته شود. همچنین باید برای ایجاد جذب انرژی در ارتفاع سازه با کاهش سطح مقطع اعضای قطری در خرپا به ایجاد تغییرشکل‌های برشی در دیوار پرداخت. برای این کار سطح مقطع اعضای قطری نزدیک به ۸۰٪ سطح مقطع اولیه اعضا کاهش داده شد. پس از انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی، دیده شد که علاوه بر این که میزان جذب انرژی اعضای مدل در طبقات بالاتر بهبود یافت میزان حداکثر تغییرمکان‌های نسبی هر طبقه نیز کمتر از مقدار عملکرد تعیین شده دیوار (۱/۲٪) است. نتایج بدست آمده با استفاده از رکورد زلزله‌السنتر بدست آمده است. نتایج شامل حداکثر تغییر مکان‌های نسبی طبقات و حداکثر انرژی جذب شده در هر طبقه به ترتیب در اشکال (۳) و (۵) نشان داده شده است.

می‌توانند مقدار مشخصی خمش موضعی را تحمل کنند. این خمش موضعی که ناشی از تغییر شکل برشی دیوار در مقطع موردنظر است سبب کاهش ظرفیت تغییرمکانی سیستم دیوار در مناطقی که خمش کلی دیوار بالا است (قسمت پایین دیوار) می‌شود که در شکل (۷) نشان داده شده است. در این شکل ظرفیت تغییرمکان نسبی به دست آمده در دیوار با توجه به اثر خمش موضعی و مقادیر نهایی تغییرمکان نسبی طبقات به صورت سطح هاشور خورده نشان داده شده است. سطح هاشور خورده در شکل (۷) نشان‌دهنده حداکثر تغییرمکان‌های غیرخطی مجاز در هر طبقه است که برابر با فاصله بین منحنی تغییرمکان‌های الاستیک طبقات تا کوچک‌ترین مقدار حاصله از منحنی‌های ۳ یا ۴ در هر طبقه است.

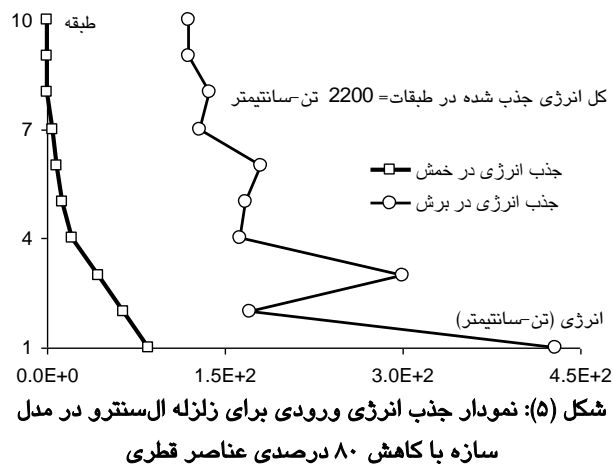


شکل (۶): تغییر شکل‌های برشی، خمشی و نهایی در سطح عملکرد دیوار



شکل (۷): تعیین ظرفیت تغییرمکان غیرخطی حداکثر در ارتفاع دیوار

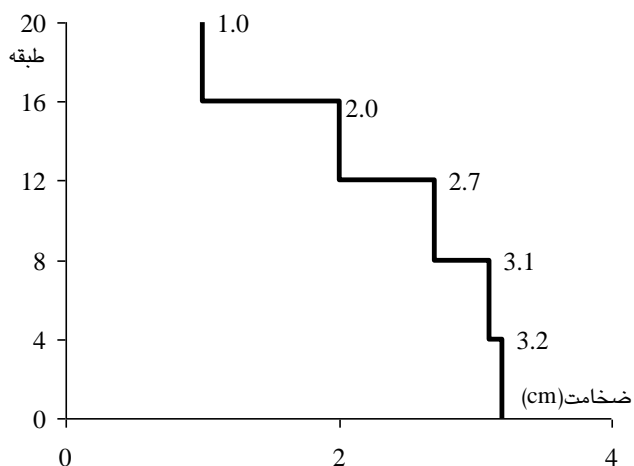
**۵- دیوارهای برشی با توانایی جذب انرژی در ارتفاع**  
با توجه به موارد گفته شده در مورد ظرفیت‌های تغییر شکل‌های غیرالاستیک در دیوار مشخص می‌شود که فرآیند جذب انرژی مطلوب در دیوار می‌تواند به صورت جذب انرژی خمشی و یا ترکیبی از خمش و برش در نظر گرفته شود. بدین ترتیب می‌توان از همه ظرفیت تغییرمکان نسبی طبقات برای جذب انرژی در ارتفاع دیوار استفاده نمود. این ویژگی



## ۶- ظرفیت تغییر شکل‌های غیرالاستیک در دیوارهای برشی

در سازه‌های بلند مرتبه طراحی شده با دیوارهای برشی، شکل عمومی تغییر شکل خمشی و برشی دیوار در حالت ارتجاعی در شکل (۶) نشان داده شده است. مقادیر این تغییرمکان‌ها در هر طبقه بستگی به مقدار سطح مقطع دیوار در ارتفاع دارد. با این وجود، میزان حداکثر تغییرمکان‌های جانبی در دیوار محدود است و مطابق با میزان سطح عملکرد مورد نیاز دیوار بر حسب تغییرمکان نسبی قابل بیان است. شکل (۶) تغییرمکان‌های الاستیک خمشی، برشی و تغییرمکان حداکثر در سطح عملکرد دیوار را نشان می‌دهد. بر اثر تحریکات زلزله، پس از آنکه دیوار از نظر برش و خمش به حداکثر تغییر شکل‌های الاستیک خود رسید، با توجه به اینکه نیروهای برشی و خمشی در اثر زلزله بیشتر از حد الاستیک اولیه هستند سازه وارد محدوده رفتار غیرخطی می‌شود. از آنجایی که تغییر شکل‌های خمشی سبب تغییرمکان‌های بزرگ در قسمت‌های فوقانی سازه می‌شوند، بنابراین استفاده از تغییر شکل‌های برشی در محدوده غیرخطی می‌تواند از نظر تغییرمکان‌های سازه مطلوب‌تر باشد. با این وجود، تغییر شکل‌های برشی در دیوار ممکن است سبب خمش موضعی در ستون‌های کناری دیوار شوند. از آنجا که ظرفیت خمش موضعی اعضای قائم در دیوار برشی محدود است مقدار تغییرمکان برشی مجاز دیوار نیز محدود بوده و نمی‌توان از حداکثر ظرفیت تغییرمکانی دیوار که در شکل (۶) نشان داده شده است استفاده نمود. برای محاسبه حداکثر تغییرمکان برشی مجاز در هر طبقه باید با توجه به مقدار تغییرمکان‌های برشی به دست آمده در طبقه موردنظر و با توجه به ظرفیت خمش موضعی ستون‌های طرفین دیوار عمل نمود. این ستون‌ها با توجه به سطح مقطع و درصد فولاد قائم و میزان نیروی محوری ناشی از خمش کلی دیوار در آنها

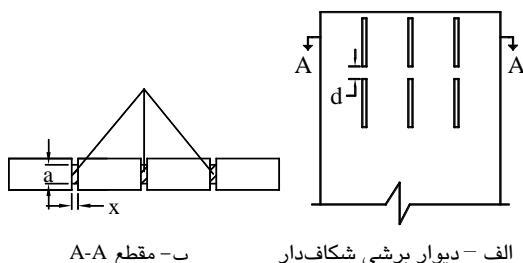
شکاف یا باز شو وجود داشته باشد.



شکل (۹): نمودار توزیع ضخامت فرضی مقاطع دیوار

### ۵-۱- دیوارهای برشی شکافدار

چنانچه بخواهیم کرنش برشی غیرالاستیک در مقطع دیوار ایجاد شود یکی از راه‌های موجود ایجاد لغزش نسبی بین لایه‌های موازی قائم در دیوار است [۳]، [۴]، [۵]، [۶]. این کار سبب ایجاد کرنش برشی بین دو لایه و در نهایت کرنش برشی در مقطع خواهد شد. شکل (۱۰) دیوار شکافدار و عضو رابط بین لایه‌های قائم را نشان می‌دهد. از تغییر شکل برشی عضو رابط برای ایجاد شکل‌پذیری برشی دیوار به میزان تعیین شده استفاده می‌شود.



شکل (۱۰): دیوار برشی شکافدار و موقعیت اعضای رابط

تغییر مکان برشی دیوار فقط با یک شکاف طبق شکل (۱۱) به صورت رابطه (۱) است:

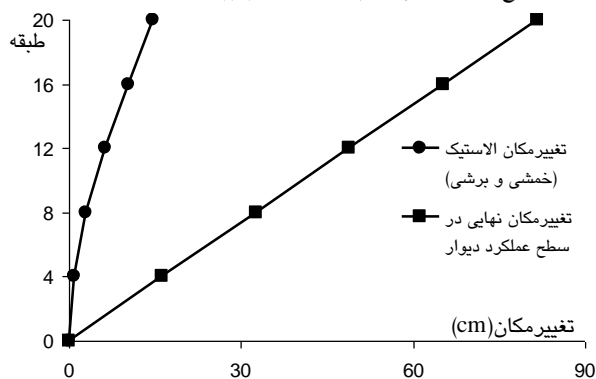
$$\theta = \frac{\gamma_m x}{2b + x} = \frac{\gamma_m x}{L} \quad (1)$$

که در آن  $\gamma_m$  حداکثر کرنش برشی نهایی عضو رابط است که ۰/۰۰۴ در نظر گرفته شده است.  $L$ ،  $b$  و  $x$  به ترتیب عرض دیوار، عرض کاهش یافته لایه قائم و طول مؤثر شکاف است.

رفتار دوگانه با تعیین ابعاد، شکل هندسی و فولادگذاری مقاطع دیوار ممکن خواهد بود. به عنوان مثال با کاهش ظرفیت برشی و افزایش شکل‌پذیری برشی مقطع می‌توان فرآیند جذب انرژی را به سمت جذب انرژی برشی برد. همچنین می‌توان بر مبنای استفاده هم‌زمان از رفتار جذب انرژی خمشی و برشی به طراحی بهینه دست یافت. در این مطالعه برای ساده‌سازی مسأله فرض شده است که جذب انرژی فقط به صورت برشی است و رفتار خمشی سیستم بدون اتلاف انرژی باقی مانده است.

برای بررسی امکان ایجاد تغییر مکان‌های برشی در ارتفاع سازه، دیواری به ارتفاع ۶۸ متر و عرض ۱۰ متر که قسمتی از سیستم باربری جانبی یک ساختمان ۲۰ طبقه است در نظر گرفته شده است. بار نهایی وارده بر دیوار برابر با ۱۱۵ تن است که به صورت استاتیکی و به شکل مثلثی در ارتفاع دیوار تقسیم شده است. سطح مقطع برشی دیوار با فرض آن‌که مقاومت خمشی لازم در دیوار از طریق مقاطع ضخیم در دو لبه انتهایی آن تامین شود، از طریق تناسب بین نیروی برشی هر طبقه در مقایسه با مقاومت مصالح بتنی دیوار بدست آمده است.

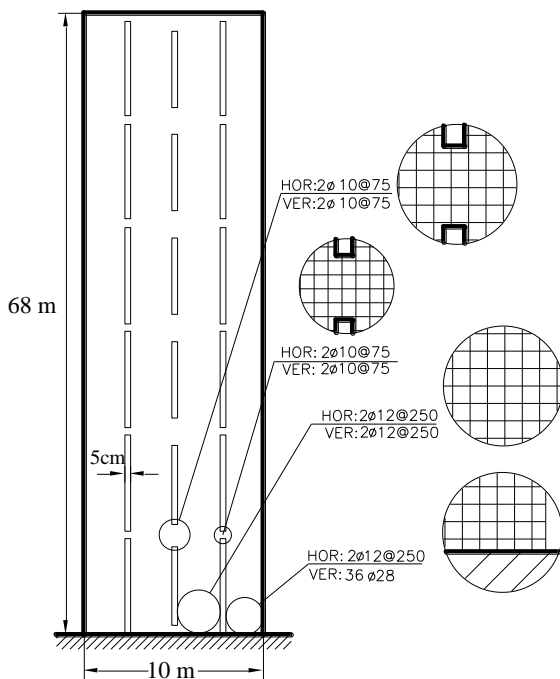
در شکل (۸) تغییر مکان الاستیک دیوار و تغییر مکان نهایی آن در سطح عملکرد دیوار نشان داده شده است. اگر قرار باشد که دیوار مورد نظر فقط با تغییر شکل‌های غیرالاستیک برشی به حد نهایی تغییر مکان نشان داده شده در شکل (۷) برسد می‌توان نشان داد که نمودار توزیع ضخامت فرضی مقاطع مختلف دیوار در ارتفاع با توجه به حداقل فولاد برشی ممکن در مقطع بسیار ناچیز (طبق شکل (۹)) خواهد بود.



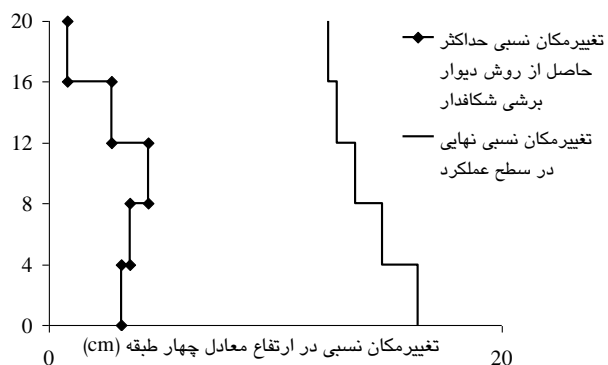
شکل (۸): تغییر مکان‌های الاستیک و نهایی در دیوار برشی

همان‌طور که دیده می‌شود مقادیر بدست آمده برای ضخامت مقطع دیوار مقادیری غیر عملی خواهد بود. از آنجا که ضخامت حداقل دیوارها در عمل چندین برابر مقادیر فوق است می‌توان نتیجه گرفت که یک دیوار برشی با قابلیت جذب انرژی به صورت برشی کامل نمی‌تواند با مقاطع عرضی کامل و بدون

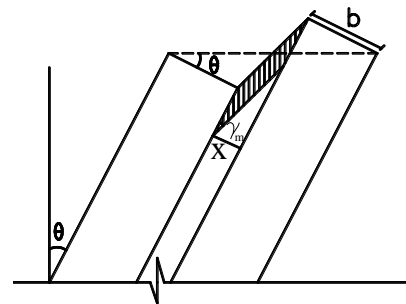
دیوار بتوان به تغییرمکان‌های نسبی تعیین شده برای سازه در حالت غیرخطی (ایجاد شده از تفریق تغییرمکان‌های الاستیک دیوار و تغییرمکان‌های نهایی) دست یافت. در شکل (۱۳) نمودار تغییرشکل نسبی نهایی در سطح عملکرد سازه که بر مبنای منحنی تغییرشکل‌های رسم شده در شکل (۷) بدست آمده است با مقادیر بدست آمده از دیوارهای برشی شکاف‌دار در مثال اخیر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود تغییرشکل نسبی بدست آمده برای دیوارهای شکاف‌دار هنوز با تغییرمکان‌های غیرالاستیک نهایی موردنظر دیوار اختلاف زیادی دارد که دلیل آن محدودیت تغییرشکل‌های غیرالاستیک قابل دستیابی در اعضای رابط است.



شکل (۱۲): مدل دیوار برشی شکاف‌دار



شکل (۱۳): مقایسه تغییرمکان نسبی نهایی در سطح عملکرد با مقادیر به‌دست آمده برای دیوار برشی شکاف‌دار



شکل (۱۱): تغییرمکان برشی دیوار شکاف‌دار

با توجه به مشخصه رفتاری اعضای رابط نشان داده شده در شکل (۱۰) می‌توان سطح مقطع عضو رابط را طوری تعیین نمود که تغییرمکان نسبی برشی این تیر در برش  $V_i$  برابر  $\delta_i$  باشد به طوری‌که:

$$V_i = \gamma_1 G_1 A_i + \left( \frac{\delta_i}{l_e} - \gamma_1 \right) G_2 A_i \quad (2)$$

که در آن  $l_e$  طول مؤثر عضو رابط و  $A_i$  سطح مقطع آن است. در رابطه فوق  $\gamma_1$  کرنش برشی جاری شدن و  $G_1$  و  $G_2$  به ترتیب مدول برشی الاستیک و مدول برشی در ناحیه پلاستیک است. از رابطه (۲) مقدار سطح مقطع لازم برای عضو رابط به صورت رابطه (۳) بدست می‌آید:

$$A_i = \frac{V_i}{\gamma_1 G_1 + \left( \frac{\delta_i}{l_e} - \gamma_1 \right) G_2} \quad (3)$$

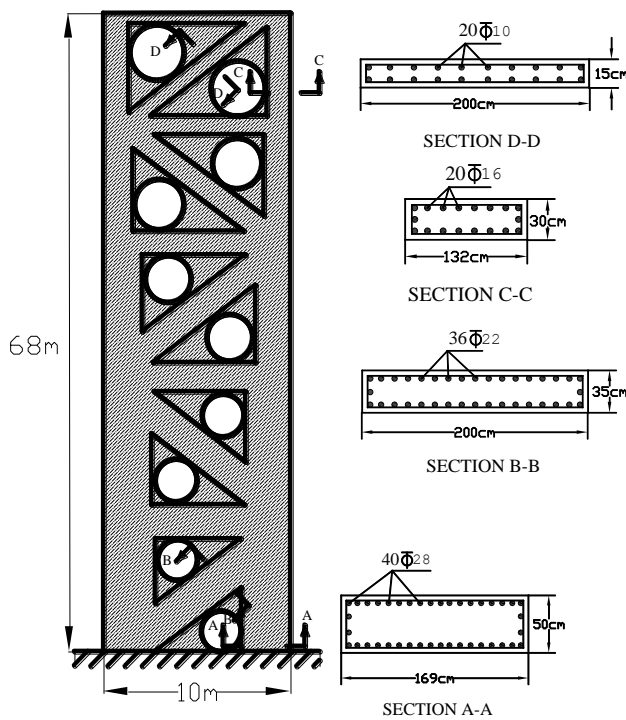
در این رابطه  $l_e = x + d \cdot \tan \alpha$  است و نشان‌دهنده آن است که طول مؤثر عضو رابط بیشتر از عرض شکاف است. در این رابطه  $\alpha$  زاویه ترک‌های ایجاد شده در دو انتهای عضو رابط در داخل لایه‌های قائم دیوار است.

نمونه دیوار برشی مورد مطالعه در این قسمت از نظر ابعاد کلی ارتفاع و عرض مشابه با دیوار معرفی شده در قسمت قبلی است. در این دیوار شکاف‌هایی به ارتفاع معادل چهار طبقه ساختمان به طریقی قرار داده شده‌اند تا بتوان تغییرمکان‌های نسبی برشی قابل‌توجهی در قسمت‌های بالای دیوار که لنگر خمشی کمتری دارد، ایجاد کند. دیوار برشی مورد نظر طبق شکل (۱۲) در نظر گرفته شده است.

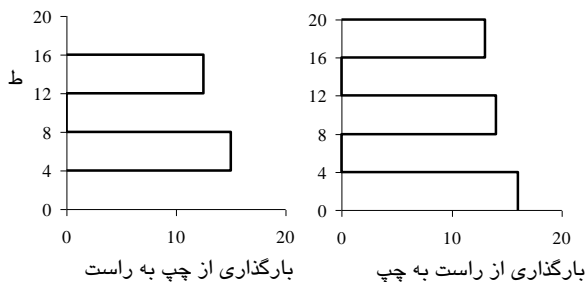
با تغییر تعداد و ارتفاع شکاف‌ها، ابعاد مختلفی از اعضای رابط بین لایه‌های قائم دیوار در هر تراز را می‌توان بدست آورد. در این تحقیق تعداد شکاف‌ها در همه طبقات سه عدد در نظر گرفته شده است. در این حالت دیوار به‌دست آمده از نظر مقاومت خمشی با دیوار قبلی یکسان فرض شده ولی مقاومت برشی آن بوسیله ایجاد شکاف‌های گفته شده کاهش یافته است. بدین ترتیب انتظار می‌رود که تحت اثر نیروهای برشی وارده بر

## ۲-۵- دیوارهای برشی سوراخ‌دار

غیرالاستیک بصورت یکنواخت در ارتفاع نبوده و با توجه به جهت بارگذاری به بخش خاصی از دیوار محدود است.



شکل (۱۴): مدل دیوار سوراخ‌دار با روش خرپایی



شکل (۱۵): تغییر مکان نسبی دیوار سوراخ‌دار در ارتفاع معادل چهار طبقه

## ۳-۵- دیوارهای برشی میان‌خالی

سومین روش جذب انرژی در ارتفاع دیوار برشی، استفاده از دیوارهای میان‌خالی است. در این حالت مانند یک قاب خمشی، می‌توان با توجه به میزان تغییر مکان‌های نسبی مجاز طبقات، ابعاد تیرها و ستون‌های قاب را طوری بدست آورد تا به حداکثر تغییر مکان نسبی نهایی در سطح عملکرد دست یافت. اشکال (۱۶-الف) و (۱۶-ب) به ترتیب ابعاد هندسی، مشخصات و حالت تغییر شکل یافته دیوار را نشان می‌دهند.

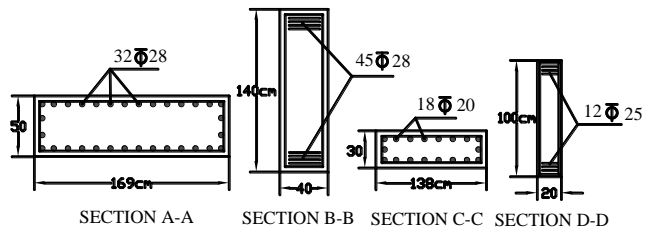
روش عملکرد دیوار برشی در این حالت، رفتار خمشی اعضای قابی شکل است که در مقایسه با دیوار برشی شکاف‌دار، تیرهای رابط به‌طور عمده دارای رفتاری خمشی هستند. در این سیستم سازه‌ای نیز مانند موارد پیشین مقاومت

دومین راه جذب انرژی در ارتفاع دیوار برشی استفاده از سوراخ‌هایی برای کاهش ظرفیت برشی دیوار و آمادگی آن برای جذب انرژی به‌صورت برشی است. از اولین نوع دیوارهای برشی سوراخ‌دار می‌توان به دیوارهای برشی کویله اشاره نمود. این دیوارها از جمله معدود دیوارهایی هستند که در عمل توانسته‌اند اتلاف انرژی را در ارتفاع سازه گسترش دهند. روش اصلی جذب انرژی این دیوارها خمش‌های موضعی در تیرهای رابط بین دو قسمت دیوار است که در عمل، نیازمند جزئیات طراحی دقیقی در محل اتصال تیرهای رابط به دیوار هستند [۲]، [۹]، [۱۱].

در این تحقیق به جای دیوارهای کویله مطرح شده، از دیوارهایی با سوراخ‌های نامنظم در ارتفاع استفاده شده است. در این حالت نیز مقاومت خمشی دیوار در ارتفاع مانند دیوار اصلی بدون سوراخ در نظر گرفته شده است. راه انتقال برش در این دیوار فرض وجود عناصر خرپایی مایل برای تحمل برش به‌گونه‌ای است که تغییر شکل‌های برشی نسبی از راه تغییر شکل محوری عناصر خرپایی صورت پذیرد. در این حالت فرض می‌شود که عناصر بتن مسلح قطری فقط در حالتی که تحت اثر کشش قرار می‌گیرند جذب انرژی می‌نمایند. بدین ترتیب عناصری که تحت اثر فشار قرار گرفته‌اند با تعویض جهت بارگذاری، تحت اثر کشش قرار گرفته و به جذب انرژی می‌پردازند. این عناصر خرپایی در شکل (۱۴) نشان داده شده‌اند. در این رابطه ابتدا به تحلیل سازه دیوار با روش خرپایی، تحت اثر نیروهای وارده پرداخته شده و سپس مقاطع عناصر خرپایی قطری طوری طراحی می‌شوند که تحت اثر نیروهای وارده به حداکثر تغییر مکان‌های نسبی قابل حصول (نشان داده شده در شکل (۷)) دست یابند. گفتنی است که برحسب مقدار نیروهای برشی وارده در هر مقطع ابعاد متفاوتی را برای سوراخ‌های دیوار باید تعیین نمود. در رابطه با چگونگی طراحی اعضای بتنی بازشودار روش‌های دیگری نیز پیشنهاد شده است که کاربرد آنها اغلب محدود به تیرهای بتنی بوده است [۷].

شکل (۱۴) دیوار مورد بحث را به همراه ابعاد و میلگردگذاری آن نشان می‌دهد. گفتنی است که از مقاومت کششی بتن در حالتی که عناصر قطری تحت اثر کشش قرار می‌گیرند صرف‌نظر شده است. تغییر مکان‌های نسبی حداکثر دیوار در شکل (۱۵) رسم شده است. محور افقی نمودار این شکل نشان‌دهنده تغییر مکان نسبی در ارتفاع معادل چهار طبقه است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود تغییر شکل‌های نسبی

خمشی کل نسبت به دیوار بدون سوراخ یکسان در نظر گرفته شده است.



در تحلیل سازه مورد بررسی قرار داد که در اینجا روش ساده شده‌ای مبتنی بر رفتار خرپای ویرانیدل به کار گرفته شده است. در این روش نیروهای برشی باعث ایجاد لنگر در دو انتهای ستون‌ها و در دو سر تیرهای رابط شده و این لنگرها سبب ایجاد تغییرشکل‌های نسبی در سازه می‌شوند. هر چه تیرهای رابط ضعیف‌تر در نظر گرفته شوند تغییرشکل‌های نسبی برشی سازه بیشتر می‌شود. بدین ترتیب می‌توان ابعاد و میزان میلگرهای خمشی تیرهای رابط را طوری تعیین نمود که این تیرها حداکثر تغییرشکل نسبی را (معادل با مقادیر نشان داده شده در شکل (۷)) برای سازه ایجاد نمایند.

با توجه به شکل (۱۷) تغییرشکل نسبی تقریبی تیر رابط در اثر خمش الاستیک از رابطه (۴) و در اثر تغییرشکل نهایی از رابطه (۵) بدست می‌آید (با فرض یکسان بودن دو عضو قائم).

که در آن  $a$  برابر پهنای هر عضو قائم،  $b$  طول آزاد تیر رابط و  $\alpha$  تغییر زاویه ایجاد شده در ستون‌ها در حالت خمش الاستیک و  $\theta$  تغییر زاویه ایجاد شده در دیوار برای حالت غیرالاستیک است. پس از بدست آوردن  $\delta_M$  و  $\delta_{su}$  می‌توان تیر رابط را طبق آن طراحی نمود.

با استفاده از نمودار تغییرمکان‌های الاستیک در طبقات (شکل (۸) در مثال مورد مطالعه) مقادیر شیب ناشی از خمش الاستیک در تراز هر تیر عبارت است از:

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

که در آن  $\Delta_{em}$  مقدار تغییرمکان نسبی جانبی الاستیک خمشی در ارتفاع معادل چهار طبقه است. همچنین مقدار تغییر زاویه تیر رابط در حالت غیرالاستیک بصورت رابطه (۷) خواهد بود.

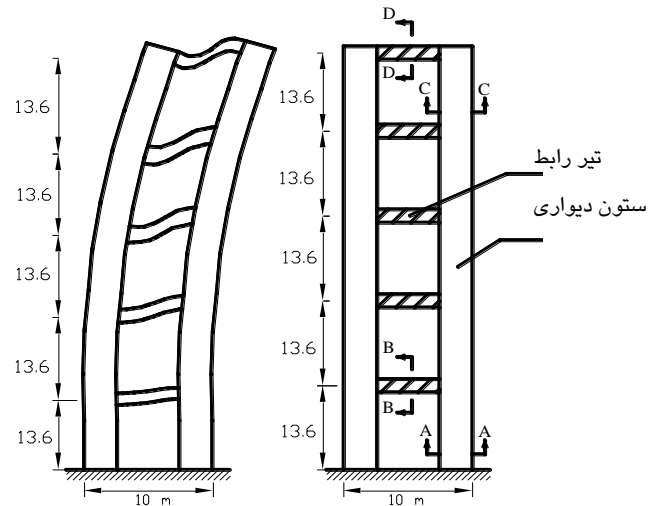
$$\theta = \frac{\Delta}{h} \quad (۷)$$

و حال با استفاده از روابط (۴) و (۵) تغییرمکان نسبی دو سر تیر رابط ( $\delta_{tot}$ ) بدست خواهد آمد:

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

با استفاده از روابط بین انحنا و تغییرمکان، مقادیر انحنای جاری شدن تیر ( $\phi_y$ ) و انحنای نهایی ( $\phi_u$ ) را می‌توان بصورت رابطه (۹) نشان داد [۸].

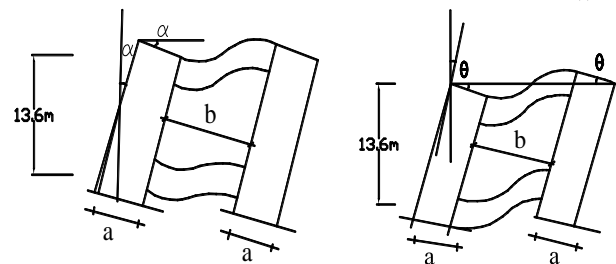
$$\delta_M = \frac{\phi_y l^2}{6} \quad (۹)$$



الف- ابعاد هندسی و مشخصات دیوار ب- دیوار تغییرشکل یافته

شکل (۱۶): دیوار میان‌خالی

نیروهای جانبی وارده بر سازه باعث ایجاد نیروهای برشی در ستون‌ها می‌شوند که این نیروها باعث ایجاد لنگر در تیرهای رابط متصل به ستون‌ها می‌گردند. برای رسیدن به تغییرمکان نسبی برشی معادل با مقادیر تغییرمکان دیوار در سطح عملکرد رابطه بین تغییرشکل نسبی دو سر تیرهای رابط و تغییرشکل نسبی طبقات هم‌تراز تیرهای رابط (نشان داده شده در شکل (۱۷)) باید بدست آورده شوند.



الف) تغییرشکل برشی دیوار ب) تغییرشکل خمشی دیوار

شکل (۱۷): قسمتی از دیوار برشی بین دو تیر رابط

فرض بر آن است که تغییرشکل‌های برشی اعضای قاب ناچیز بوده و تغییرمکان‌های قاب عمدتاً تحت اثر رفتار خمشی اعضای آن است. قاب حاصله را می‌توان با روشهای مرسوم



$$\delta_{tot} = \delta_M + \delta_{su} = \frac{\phi_y l^2}{6} + (\phi_u - \phi_y) l_p (l - l_p) \quad (10)$$

در روابط بالا،  $l$  طول تیر و  $l_p$  طول مفصل پلاستیک است. حال با قرار دادن  $\delta_{tot}$  در رابطه (۱۰)،  $\phi_u$  به عنوان انحنای نهایی بدست می‌آید.

با استفاده از مقادیر لنگرهای بدست آمده و با فرض مساوی بودن مقادیر میلگردهای کششی و فشاری در بالا و پائین مقطع، تیرهای رابط طراحی شده‌اند. این تیرها باید قادر به تحمل مقادیر انحنای بالاتر از انحنای نظیر مقاومت خمشی تیرها ( $M_{II}$ ) تا محدوده انحنای حداکثر برای ایجاد تغییرمکان در سطح عملکرد دیوار باشند که این ویژگی در عمل به علت وجود میلگردهای فشاری میسر شده است.

مقادیر حداکثر تغییرمکان‌های نسبی در ارتفاع معادل چهار طبقه برای دیوار مورد بحث در شکل (۱۸) نشان داده شده است. طراحی تیرهای رابط با استفاده از این روش نشان می‌دهد که می‌توان به حداکثر تغییرمکان‌های نسبی لازم در دیوار رسید و از این‌رو استفاده از دیوارهای برشی میان‌خالی می‌تواند بهترین روش برای رسیدن به تغییرشکل‌های نسبی لازم در طبقات و جذب انرژی مطلوب در ارتفاع دیوار باشد.



شکل (۱۸): مقادیر تغییرمکان نسبی غیرخطی به دست آمده در طبقات در روش دیوار میان‌خالی

## ۶- بحث و بررسی

در دیوارهای برشی با توجه به این‌که لنگر خمشی در ارتفاع با تابع درجه سوم کاهش می‌یابد نمی‌توان انتظار جذب انرژی خمشی در قسمت‌های بالای سازه را داشت. اما از آنجا که نیروی برشی در ارتفاع با تابع درجه دوم کاهش می‌یابد مقدار برش در طبقات بالای سازه همچنان مقدار قابل‌توجهی است و از این‌رو می‌توان به افزایش جذب انرژی در سازه از راه ایجاد تغییرمکان‌های نسبی برشی پرداخت. در این مقاله سه روش برای جذب انرژی در ارتفاع دیوارهای برشی مورد بررسی قرار گرفت. هر روش دارای قابلیت مختص به خود برای رسیدن به تغییرمکان‌های نسبی موردنظر در طبقات مختلف

است. اولین روش مورد بررسی، استفاده از دیوار برشی شکافدار بوده که مشخص شد این نوع دیوار به دلیل محدودیت تغییرشکل‌های برشی اعضای رابط در آن دارای ظرفیت لازم برای رسیدن به حداکثر تغییرشکل‌های نسبی لازم نیست. در تحقیق حاضر، با توجه به تعداد شکاف‌های در نظر گرفته شده، مقادیر تغییرمکان‌های نسبی حداکثر قابل دست‌یابی این دیوار ( $U_{II}$ ) کوچک است. این مقادیر در جدول شماره (۱) آورده شده است.

در دیوارهای برشی سوراخدار با استفاده از ایجاد روش خردپایی سعی در ایجاد تغییرمکان‌های نسبی بیشتر در طبقات شد. در این روش تغییرمکان‌های نسبی دیوار از راه ایجاد تغییرشکل‌های محوری در اعضای قطری تأمین شدند. یکی از مسائل این روش امکان باریک‌شدگی میلگردهای اعضای قطری به علت غیریکنواختی در سختی محوری این عناصر در مجاورت سوراخ‌ها است که این مسأله می‌تواند باعث محدودیت تغییرشکل میلگردهای اعضای قطری شود. مسأله دیگر در مورد این روش، تحت کشش و فشار قرار گرفتن اعضای قطری به طور متناوب بود. هنگامی که یک عضو بتنی قطری در یک دوره تحت اثر کشش قرار گیرد بتن محصورکننده میلگردهای آن ترک برداشته و بین قطعات موجود فاصله ایجاد می‌شود. بدین ترتیب در دوره بعدی که این عضو تحت اثر فشار قرار می‌گیرد، احتمال اینکه میلگردهای عضو در محل ترک‌خوردگی در اثر فشار وارده در دوره‌های متوالی بارگذاری کم‌انرژی وجود دارد. با این حال، این روش مزایای بیشتری نسبت به روش قبلی دارد. مقادیر حداکثر تغییرمکان‌های نسبی در این روش ( $U_{II}$ ) برای دیوار موردنظر در جدول (۱) آورده شده است.

جدول (۱): مقایسه تغییرمکان‌های نسبی در دیوارهای مختلف

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

روش سوم استفاده از دیوارهای برشی با عملکرد قابی بوده است که در آن سعی بر ایجاد تغییرمکان‌های نسبی بیشتر در سازه شد. با توجه به قابلیت نسبی مناسب تیرهای رابط به کار رفته در این سازه و توانایی آنها در رسیدن به انحنای خمشی بالا، این روش قابلیت بسیار خوبی در ایجاد

زیادتری از مصالح و با تمرکز کمتری صورت پذیرد. ایجاد این ویژگی در دیوارها نه تنها هزینه خاصی ندارد بلکه می‌تواند از بعد طراحی داخلی و طرح معماری خارجی نیز قابل قبول‌تر از دیوارهای برشی موجود باشد. نتایج به دست آمده از این تحقیق را می‌توان به شرح ذیل دسته‌بندی کرد.

۱- مطالعات انجام شده روی مدل ساده سازه‌ای از دیوارهای برشی با رفتار دوگانه شکل‌پذیر مبین کاهش تمرکز اتلاف انرژی و به عبارتی کاهش تقاضای شکل‌پذیری در پای این دیوارها در مقایسه با دیوارهای برشی متداول است.

۲- سه روش ایجاد درزه یا شکاف، ایجاد سوراخ و در نهایت استفاده از دیوار میان‌خالی به‌عنوان روش‌های افزایش جذب انرژی در ارتفاع دیوار مطرح و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. این دیوارها دارای رفتار دوگانه شکل‌پذیر بوده و در عمل می‌توان با ایجاد تناسب لازم در آنها به رفتاری شکل‌پذیرتر و مناسب‌تر در مقایسه با دیوارهای برشی معمول رسید. از میان سه روش گفته شده، روش دیوار میان‌خالی دارای شکل‌پذیری مناسب‌تری برای رسیدن به تغییرمکان‌های نسبی حداکثر است.

تغییرمکان‌های نسبی در دیوار داشته است. از مهم‌ترین عوامل افزایش این قابلیت اثر محصورکنندگی خاموتها و همچنین وجود میلگردهای فشاری در این تیرها بوده است. مقادیر قابل دستیابی تغییرمکان‌های نسبی غیرخطی این روش در ارتفاع معادل چهار طبقه ( $u_3$ ) در جدول (۱) آورده شده است. با توجه به یکسان بودن نیروهای برشی وارده به دیوارها به نظر می‌رسد که استفاده از دیوارهای شکاف‌دار دارای محدودیت در رسیدن به تغییرمکان‌های نسبی بالا است. در صورتی که دو روش استفاده از سوراخ برای ایجاد عملکرد خرابایی و یا ایجاد سازه قابی، دارای شکل‌پذیری مناسب‌تری برای رسیدن به تغییرمکان‌های نسبی لازم هستند.

## ۷- نتیجه‌گیری

مطالعات انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهند که می‌توان طراحی دیوارهای برشی را به‌گونه‌ای انجام داد که نه تنها رفتار سازه از بعد دینامیکی با تغییر در مشخصه‌های سازه بهتر شود بلکه رفتار غیرخطی و شکل‌پذیر آنها نیز به صورتی ارتقا یابد که از تمرکز خسارت و یا شکل‌پذیری در قسمت‌های پایینی دیوار اجتناب شود و جذب انرژی در حجم

## ۸- مراجع

- [۱] ضیایی‌فر، منصور؛ مطالعه رفتار لرزه‌ای دیوارهای برشی با رفتار دوگانه شکل‌پذیر، پژوهشگاه زلزله‌شناسی و مهندسی 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.

