به نام خدا

بسط تئوری کلاسیک PFI
در سیستم دیوار برشی فولادی

مولف :

محمدحسین اوجاقپور ملکی

انتشارات ارسطو

(سازمان چاپ و نشر ایران – ۱۴۰۳)

نسخه الکترونیکی این اثر در سایت سازمان چاپ و نشر ایران و اپلیکیشن کتاب رسان موجود می باشد

chaponashr.ir

سرشناسه : اوجاقپور ملکی، محمدحسین، ۱۳۷۹-
عنوان و نام پدیدآور : بسط تئوری کلاسیک PFI در سیستم دیوار برشی فولادی/ مولف محمدحسین اوجاقپورملکی.
مشخصات نشر : انتشارات ارسطو (سازمان چاپ و نشر ایران)، ۱۴۰۳.
مشخصات ظاهری : ۱۴۱ص.
شابک : ۲-۶۳۷-۴۰۸-۶۲۲-۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی : فیپا
موضوع : دیوارهای برشی
Shear walls
دیوارهای برشی -- طراحی و ساخت
Shear walls -- Design and construction
رده بندی کنگره : TH۲۲۴۷
رده بندی دیویی : ۶۹۰/۸۵۲
شماره کتابشناسی ملی : ۹۸۹۱۸۶۵
اطلاعات رکورد کتابشناسی : فیپا

نام کتاب : بسط تئوری کلاسیک PFI در سیستم دیوار برشی فولادی
مولف : محمدحسین اوجاقپور ملکی
ناشر : انتشارات ارسطو (سازمان چاپ و نشر ایران)
صفحه آرایی، تنظیم و طرح جلد: پروانه مهاجر
تیراژ : ۱۰۰۰ جلد
نوبت چاپ : اول - ۱۴۰۳
چاپ : زبرجد
قیمت : ۱۴۱۰۰۰ تومان
فروش نسخه الکترونیکی - کتاب‌رسان :
https://chaponashr.ir/ketabresan
شابک : ۲-۶۳۷-۴۰۸-۶۲۲-۹۷۸
تلفن مرکز پخش : ۰۹۱۲۰۲۳۹۲۵۵
www. chaponashr. ir

انتشارات ارسطو
چاپ و نشر ایران
Chaponashr.ir

فهرست

فصل اول:کلیات ۷
مقدمه..... ۷
روش‌ها و فنون اجرایی طرح..... ۸
فصل دوم: مرور ادبیات سیستم دیوارهای برشی فولادی ۹
مقدمه..... ۹
معرفی سیستمهای مورد استفاده..... ۱۱
تاریخچه‌ی استفاده از دیوارهای برشی فولادی..... ۱۴
تاریخچه‌ی مطالعات انجام‌شده بر روی دیوارهای برشی فولادی..... ۱۴
تاکاهاشی، تاکدا و تاکیموتو (۱۹۷۳)..... ۱۷
توربرن، کولاک و مونگومری (۱۹۸۳)..... ۱۷
تیملر و کولاک (۱۹۸۳)..... ۲۰
ترومپوچ و کولاک، (۱۹۸۷)..... ۲۱
صبوری و رابرتز، (۱۹۸۹-۱۹۹۲)..... ۲۳
کَکسِس، الغالی و چن، (۱۹۹۳)..... ۲۴
الغالی، کَکسِس و دو، (۱۹۹۳)..... ۲۴
زو و لو، (۱۹۹۴)..... ۲۶
درایور، کولاک، کندی و الوی، (۱۹۹۶ تا ۱۹۹۸)..... ۲۷
رضایی، (۱۹۹۹)..... ۲۹
عبادی و همکاران..... ۳۱
فصل سوم:طراحی نمونه‌ها ۳۳
مقدمه..... ۳۳
ضوابط طراحی دیوارهای برشی فولادی‌ویژه براساس آئین‌نامه‌ی آمریکا..... ۳۳
طراحی اولیه..... ۳۳
طراحی اولیه‌ی ورق جان..... ۳۴

طراحی اولیه‌ی ستون (VBE) ۳۵
طراحی نهایی ۳۷
طراحی اتصالات ۳۸
ضوابط طراحی دیوار برشی در مناطق با خطر نسبی زیاد ۳۹
طراحی ورق جان ۴۵
طراحی اعضای مرزی افقی (HBE) ۴۵
طراحی اعضای مرزی قائم (VBE) ۴۶
صحت‌سنجی مدل‌سازی ۵۰
تاده زیرکیان و جیان ژانگ ۵۱
مدل‌سازی نرم‌افزاری ۵۱
مشخصات مصالح ۵۳
شتاب‌نگاشت‌های انتخابی ۵۴
مقایسه‌ی جابه‌جایی بام ساختمان ۵۴
مقایسه‌ی دریفت نمونه‌ها ۵۵
معرفی و طراحی نمونه‌های مورد تحقیق ۵۶
مشخصات سازه‌ای ۵۶
فرضیات طراحی ۵۷
طراحی نمونه‌های دیوار برشی فولادی برای درصدی از برش طبقه ۵۹
(مقایسه با تئوری کلاسیک PFI) ۵۹
نتایج طراحی نمونه‌های دیوار برشی فولادی برای درصدی از برش طبقه ۶۱
(مقایسه با پوش‌اور) ۶۱
نتایج طراحی نمونه‌های طراحی‌شده برای درصدی از برش طبقه ۶۲
(بهینه‌سازی براساس دریفت مجاز) ۶۲

فصل چهارم: بسط تئوری کلاسیک PFIو مقایسه با نتایج تحلیل استاتیکی غیرخطی (پوش‌اور) ۶۵

مقدمه ۶۵
مدل‌سازی نرم‌افزاری نمونه‌ها ۶۵
آنالیز مقادیر ویژه ۶۶

آنالیز استاتیکی غیرخطی (PUSH-OVER)..... ۶۷
منحنی ظرفیت..... ۶۸
توزیع بار جانبی..... ۶۹
توزیع بار ثابت..... ۶۹
توزیع بار متغیر..... ۶۹
اهداف آنالیز استاتیکی افزایشی غیرخطی..... ۷۰
بررسی تئوری PFI..... ۷۰
نمونه‌های ۱ طبقه..... ۷۱
نمونه‌های ۳ طبقه..... ۷۲
نمونه‌های ۵ طبقه..... ۷۳
نقطه‌ی عملکرد..... ۷۴
رسم منحنی نیاز..... ۷۴
نوع پروفیل خاک..... ۷۴
محاسبه‌ی ZEN..... ۷۵
محاسبه‌ی C_a و C_v..... ۷۶
استاندارد ۲۸۰۰..... ۷۸
ضریب بازتاب ساختمان B..... ۷۸
نسبت شتاب مبنای طرح A..... ۷۹
محاسبه‌ی نقطه‌ی عملکرد براساس ATC-۴۰..... ۸۰
محاسبه‌ی نقطه عملکرد نمونه‌ها..... ۸۸
نمونه‌های ۱ طبقه..... ۸۹
نمونه‌های ۳ طبقه..... ۹۰
نمونه‌های ۵ طبقه..... ۹۲
پارامترهای لرزه‌ای..... ۹۴
روش‌های محاسبه‌ی ضریب رفتار..... ۹۵
روش‌های کاربردی..... ۹۵
روش ضریب شکل‌پذیری یوآنگ..... ۹۶

روش طیف ظرفیت ۱۰۰
تعریف شکل‌پذیری ۱۰۲
ضریب کاهش در اثر شکل‌پذیری ($R\mu$) و مروری بر تحقیقات انجام‌شده ۱۰۳
رابطه‌ی نیومارک-هال ۱۰۶
رابطه‌ی ریدل و نیومارک ۱۰۸
رابطه‌ی ریدل، هیدالگو و کروز ۱۱۱
رابطه‌ی ارياس و هیدالگو ۱۱۲
رابطه‌ی نسار و کراوینکلر ۱۱۳
رابطه‌ی تاکدا، هوآنگ و شینوزوکا ۱۱۵
ضریب اضافه مقاومت ۱۱۶
عوامل مؤثر در اضافه مقاومت ۱۱۶
روش محاسبه‌ی ضریب اضافه مقاومت ۱۱۷
محاسبه‌ی پارامترهای لرزه‌ای ۱۱۸
نمونه‌های ۱ طبقه ۱۱۹
نمونه‌های ۳ طبقه ۱۲۳
نمونه‌های ۵ طبقه ۱۲۶
نتیجه‌گیری ۱۲۹

فصل پنجم:بحث و نتیجه‌گیری ۱۳۱

نتیجه‌گیری ۱۳۱

منابع و مراجع ۱۳۵

فصل اول:
کلیات

مقدمه

براساس مطالعات انجام شده به صورت آزمایشگاهی و نظری رفتار دیوار برشی فولادی در برابر بارهای جانبی سنگین مناسب بوده و ساختمان‌ها در زلزله هایی مانند نورثریج و کوبه از خود رفتار مناسبی نشان داده‌اند همچنین ظرفیت دیوارهای برشی فولادی جهت مقابله با خطراتی مانند زلزله، طوفان و انفجار در مقایسه با دیگر سیستم‌ها مانند قاب‌های ممان‌گیر ویژه، حداقل ۲۵٪ بیشتر می‌باشد [۱].

از مهم‌ترین مسائل برای طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، در نظر گرفتن تغییرشکل‌های جانبی ساختمان می‌باشد به همین منظور درسال‌های گذشته مطالعات زیادی جهت افزایش عملکرد و ایمنی ساختمان در برابر زلزله صورت پذیرفته است. انتخاب نوع سیستم مقاوم در برابر بار جانبی به عوامل مختلفی مانند چگونگی رفتار سازه، هندسه سازه، محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای، میزان تغییرمکان، مقدار بارهای جانبی، محدودیت‌های معماری و مسائل اقتصادی بستگی دارد. [۱]

دیوار برشی فولادی به‌عنوان سیستم مقاوم در برابر نیروهای جانبی و همچنین روشی مؤثر برای مقاوم‌سازی ساختمان‌های فولادی در چند سال اخیر مورد توجه خاص قرار گرفته است. از ویژگی‌های آن می‌توان به اقتصادی بودن، اجرای آسان، وزن کم نسبت به سیستم‌های مشابه، شکل‌پذیری زیاد، نصب سریع و جذب انرژی بالا اشاره کرد [۱].

در این کتاب با طراحی مدل‌هایی با تعداد طبقات مختلف و در نظر گرفتن شیب سختی ثانویه‌ی فولاد، میزان اختلاف موجود بین نتایج حاصل از مدلسازی و تئوری کلاسیک سیستم دیوار برشی فولادی موردبررسی قرار گرفته است و سپس جهت کاهش این میزان خطا، تئوری کلاسیک موجود بسط داده شده است.

روش‌ها و فنون اجرایی طرح

سعی بر آن است که با استفاده از تئوری کلاسیک PFI در طراحی دیوار برشی فولادی با تأکید بر منحنی‌های نیاز و تقاضا توسعه داده شود که در آن ساختمان‌هایی با ارتفاعات مختلف و سیستم دیوار برشی فولادی طراحی می‌گردند. همچنین با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی خطی و غیرخطی، منحنی‌های تقاضا به دست آمده که آن‌هارا با تئوری بیان شده مقایسه کرده و پارامترهای لرزه‌ای سیستم‌های طراحی شده با یکدیگر قیاس می‌شوند.

فصل دوم
مرور ادبیات سیستم دیوارهای برشی فولادی

مقدمه

از دهه ۱۹۷۰ میلادی سیستم دیوارهای برشی فولادی (SPSW)[۱] به‌عنوان یک سیستم مقاوم در برابر نیروهای جانبی مانند زلزله و باد، در ساختمان‌ها، به‌ویژه در ساختمان‌های بلند مورد توجه قرار گرفته است. این سیستم در دو زلزله‌ی شدید نورث‌ریج آمریکا و کوبه ژاپن و همچنین در آزمایشگاه‌ها از خود رفتار بسیار مناسبی را نشان داده است.

از این سیستم در ساخت ساختمان‌های جدید و همچنین بهسازی و بازسازی ساختمان‌های موجود به‌خصوص در کشورهای زلزله‌خیزی مانند آمریکا و ژاپن به کار گرفته‌شده است. تکنولوژی طراحی و ساخت دیوارهای برشی فولادی طی سال‌های اخیر پیشرفت چشمگیری داشته است و ضوابط طراحی و اجرای آن در آیین‌نامه‌های مختلف مانند آیین‌نامه‌ی فولاد کانادا، آیین‌نامه‌ی لرزه‌ای AISC و ضوابط FEMA ٤٥٠ واردشده است که این پدیده‌ی نوین که در جهان به‌سرعت رو به گسترش می‌باشد.

ازنظر اجرایی دیوارهای برشی فولادی دارای سیستمی بسیار ساده بوده و هیچ‌گونه پیچیدگی خاصی در آن‌ها وجود ندارد لذا مهندسین، تکنسین‌ها و کارگران فنی با دانش فنی موجود و بدون نیاز به کسب مهارت جدید می‌توانند آن را اجرا نمایند. همچنین دقت انجام کار در حد دقت‌های متعارف در اجرای سازه‌های فولادی بوده و با رعایت آن ضریب اطمینان اجرایی به‌مراتب بالاتر از انواع سیستم‌های دیگر می‌باشد. با توجه به‌سادگی و امکان ساخت آن در کارخانه و نصب آن در محل، سرعت اجرای سیستـم بالا بوده و از هزینه‌های اجرایی تا حد زیادی کاسته می‌شود.

این سیستم از لحاظ اجرایی جایگزینی تمیزتر و سریع‌تر و مطمئن‌تر به لحاظ مقاومت و رفتار، نسبت به دیوارهای برشی بتنی می‌باشند که علاوه‌بر موارد فوق به دلیل اینکه میزان جابه‌جایی جانبی این نوع دیوار برشی نسبت به مشابه بتنی خود کمتر است لذا در سازه‌های بلند کاربرد

---

[۱] Steel Plate shear walls

بیشتری دارند. از مزایای دیگر استفاده از این سیستم نسبت به مشابه بتنی می‌توان به مواردی مانند کاهش وزن مرده‌ی ساختمان و درنتیجه کاهش نیروی زلزله‌ی وارد بر آن، کاهش ابعاد تیر و ستون‌ها و درنتیجه افزایش فضای مفید طبقات و نیز استفاده در مناطق سردسیر که عمل‌آوری بتن دشوار است، اشاره نمود.

همچنین این سیستم از همه ویژگی‌های مطلوب سیستم‌های مهاربندهای متمرکز (CBF) مانند Λ،V و X شکل و سیستم‌های مهاربندهای خارج از مرکز (EBF)، به لحاظ اجرا، کارآیی و رفتار بهره‌مند بوده و در بسیاری از موارد بهتر عمل می‌نماید. این سیستم ازنظر سختی برشی سخت‌تر از سیستم‌های مهاربند X شکل که از سخت‌ترین سیستم‌های مهاربندی می‌باشد سخت‌تر بوده و با توجه به امکان ایجاد بازشو در هر نقطه از آن، کارآیی همه‌ی سیستم‌های مهاربندی را دارا می‌باشد. همچنین رفتار سیستم در محیط پلاستیک و میزان جذب انرژی آن نسبت به سیستم‌های مهاربندی بهتر است.

در سیستم دیوار برشی فولادی‌ویژه به علت گستردگی مصالح و اتصالات، تعدیل تنش‌ها به‌مراتب بهتر از سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی دیگر مانند قاب‌ها و انواع مهاربندها می‌باشد؛ که معمولاً در آن‌ها مصالح به‌صورت دسته شده و اتصالات متمرکز هستند.

استفاده از دیوار برشی فولادی دو فایده‌ی مهم دارد که شامل:

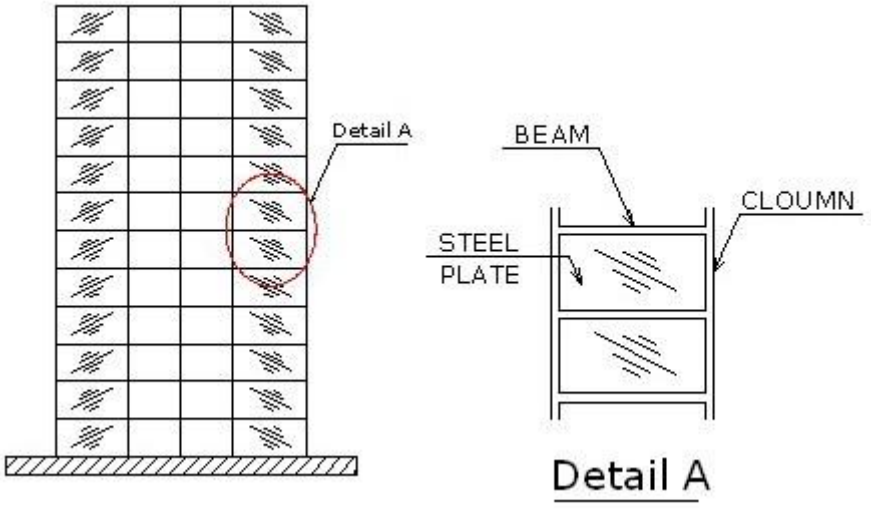
۱) بهبود رفتار سازه به‌ویژه در برابر بارهای لرزه‌ای.

۲) کاهش کلی هزینه‌های ساخت.

گزارشات اولیه‌ی تحقیقات انجام‌شده در تابستان سال ۲۰۰۰ میلادی در آزمایشگاه سازه دیویس هال دانشگاه برکلی کالیفرنیا نشان داد، ظرفیت دیوارهای برشی فولادی برای مقابله با خطراتی مانند زلزله، طوفان و انفجار در مقایسه با دیگر سیستم‌ها مثل قاب‌های خمشی ویژه حداقل ۲۵٪ بیشتر می‌باشد [۱].

معرفی سیستمهای مورد استفاده

دیوارهای برشی فولادی که به نام اختصاری SPSW در آیین‌نامه‌ی AISC معرفی می‌شود سیستمی است که از ورق‌های فولادی که توسط تیرها و ستون‌ها احاطه‌شده است، تشکیل گردیده‌اند. در شکل۲-۱ نمونه‌ای از دیوارهای مذکور نشان داده‌شده است.



شکل ۲-۱ دیوار برشی فولادی [۱]

اجزای مختلف سیستم دیوار برشی فولادی شامل:

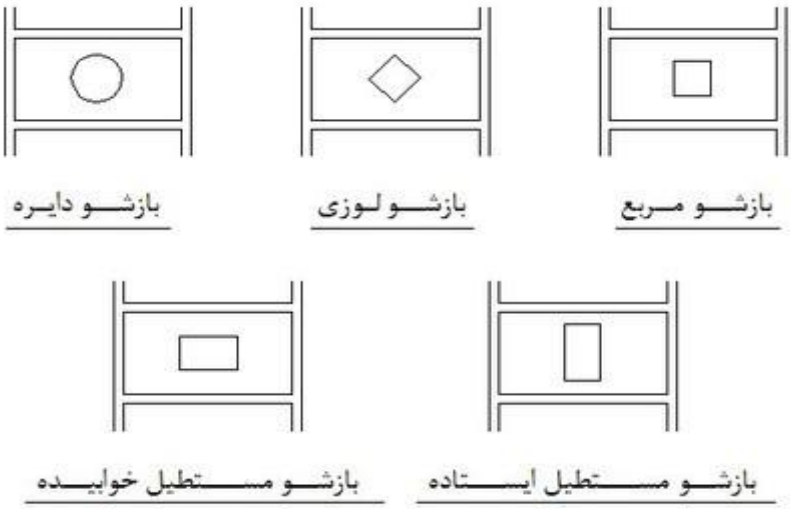
۱. ورق فولادی عمودی که به تیرها و ستون‌های سیستم باربر جانبی متصل است، ورق جان[۱] نامیده می‌شود.
۲. ستون‌ها در سیستم دیوار برشی فولادی به اعضای مرزی قائم (VBE)[۲] موسوم هستند.

[۱] Web Plate

[۲] Vertical Boundary Elements

۳. تیرها در این سیستم به‌عنوان اعضای مرزی افقی (HBE)[۱] قلمداد می‌شوند.

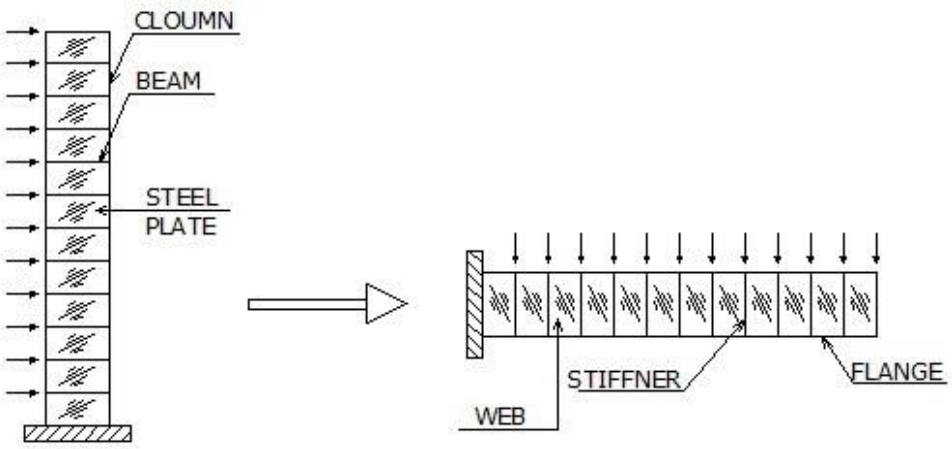
در ورق فولادی در صورت نیاز می‌توان بازشو با شکل‌ها و ابعاد گوناگون و موردنظر ایجاد نمود که تعدادی از آن‌ها در شکل ۲-۲ آورده شده است.



شکل ۲-۲ چند نمونه مختلف بازشو در دیوارهای برشی فولادی [۱]

[۱] Horizental Boundary Elements

دیوار برشی فولادی مشابه تیر ورق طره‌ای عمل می‌کند که در آن ستون‌ها به‌منزله‌ی بال‌های آن، تیرهای طبقات همانند سخت‌کننده‌های آن و ورق فولادی به‌عنوان جان آن می‌باشند که در شکل ۲-۳ می‌توان آن را مشاهده نمود. در این سیستم، اتصال بین تیرها و ستون‌ها گیردار بوده و برخلاف تیر ورق‌ها که به علت ضعیف بودن بال‌ها در آن‌ها، بال‌ها نقش بسزایی در گرفتن نیروها ندارند، در دیوارهای برشی فولادی با توجه به قوی بودن ستون‌ها، ستون‌ها می‌توانند نقش خوبی را در باربری ایفا نمایند.

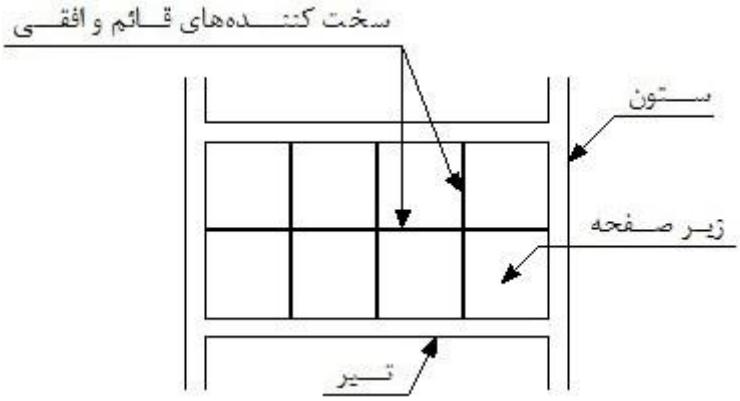


شکل ۲-۳ تشابه دیوار برشی فولادی و تیر ورق طره‌ای [۱]

براساس مقاومت بالای ورق فولادی، با بهره‌گیری از مقاومت پس‌کمانشی[۱] آن ضخامت ورق حتی در دیوارهای برشی فولادی بلند و برای نیروهای برشی بزرگ، کم و یا به‌عبارت‌دیگر ورق فولادی نازک می‌باشد. به این ترتیب می‌توان برای جلوگیری از کمانش آن تحت تأثیر بارهای سرویس و به‌جای افزایش ضخامت ورق که کاملاً غیراقتصادی می‌باشد، از سخت‌کننده‌ها برای تقویت آن استفاده نمود. تقویت ورق نه‌تنها از کمانش آن تحت اثر بارهای سرویس جلوگیری می‌نماید بلکه باعث بهبود رفتار آن به‌ویژه در محیط پلاستیک نیز می‌گردد [۱].

[۱] Post buckling

برای جلوگیری از کمانش ورق فولادی به‌خصوص در ناحیه‌ی الاستیک، همانطور که در شکل ۲-۴ نشان داده‌شده است، می‌توان ورق فولادی را به کمک سخت‌کننده‌های عمودی و افقی تقویت نمود [۱].



شکل ۲-۴ یک نمونه از دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده [۱]

تاریخچه‌ی استفاده از دیوارهای برشی فولادی

در دیوارهای برشی فولادی ابتدا، در تمام ورق‌های فولادی اجرا شده از سخت‌کننده استفاده شده است ولی از سال ۱۹۸۰ به بعد در آمریکا و کانادا دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده بکارگرفته شده است. دیوارهای برشی فولادی هم در ساخت ساختمان‌های نوساز و هم در بهسازی و بازسازی ساختمان‌های موجود در جهان، به‌خصوص در کشورهای لرزه‌خیز، به علت رفتار و مزایای خوب آن، به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است.

تاریخچه‌ی مطالعات انجام‌شده بر روی دیوارهای برشی فولادی

ایده‌ی دیوارهای برشی فولادی‌ویژه براساس بهره‌گیری از میدان کشش قطری است که پس از کمانش ورق فولادی در آن ایجاد می‌گردد. اولین کار جدی برای بررسی مقاومت پس‌کمانشی پانل‌های برشی توسط واگنر[۱] در سال ۱۹۳۱ [۱۵] انجام‌شده است. وی بر اساس آزمایش‌هایی

[۱] Wagner H.

که بر روی پانل‌های برشی نازک از جنس آلومینیم انجام داد، ملاحظه نمود که مقاومت برشی جان تنها متأثر از کشش قطری به وجود آمده می‌باشد.

بر این اساس که وضعیت تنشی که توسط تئوری میدان کشش خالص واگنر تعریف می‌شود، شرایط حدی است و رفتار اغلب پانل‌های برشی قبل از کمانش کامل، در وضعیتی بین برش خالص و کشش خالص است، کوهن[۱] در سال‌های ۱۹۵۲ و ۱۹۵۶ [۱۶ و ۱۷] تئوری میدان کشش قطری ناقص را ارائه نمود. این تئوری بر این فرض استوار است که ظرفیت پانل برشی هم ناشی از برش و هم ناشی از کشش قطری می‌باشد.

بر مبنای فعالیت‌های واگنر و کوهن، باسلر[۲] در سال ۱۹۶۱ [۱۸] مقاومت پس از کمانش تیرورق‌ها را مورد توجه قرار داد. بر مبنای آزمایشاتی که او در دانشگاه لیهای انجام داد، مدلی از تئوری میدان کشش ناقص ارائه نمود که توسط آن می‌توان مقاومت نهایی تیر ورق را در برش، با فرض آن‌که سختی خمشی بال‌های تیر ورق قابل صرف‌نظر کردن باشد، پیش‌بینی و محاسبه کرد.

استفاده از دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک بر اساس نتایج مطالعات انجام‌شده بر روی تیرورق‌ها برای اولین بار در دهه‌ی ۸۰ میلادی در دانشگاه آلبرتای[۳] کانادا توسط کولاک[۴] و همکاران مطرح گردید.

کولاک و همکاران در سال‌های ۱۹۸۳ و ۱۹۸۷ [۴، ۵ و ۷] یک مدل تحلیلی برای پیش‌بینی و محاسبه‌ی ظرفیت نهایی دیوارهای برشی صفحات نازک ارائه دادند که در این مدل، ورق فولادی نازک توسط یک سری اعضای کششی قطری (نواری) جایگزین می‌شود که زاویه‌ی قرارگیری این اعضای مایل (میدان کششی) تابعی از طول پانل، ارتفاع پانل، ضخامت ورق، سطح مقطع عرضی تیرها و ستون‌های محیطی و ممان اینرسی ستون‌ها می‌باشد. دکتر سعید صبوری در سال‌های ۱۹۸۹ و ۱۹۹۲ [۸، ۹ و ۱۹] با انجام آزمایش‌های متعدد بر روی دیوارهای برشی فولادی، رفتار

---

۱ Kuhn. P.

۲ Basler. K.

۳ Alberta

۴ Kulak