



بررسی آزمایشگاهی ضریب رفتار و جذب انرژی دیوارهای برشی فولادی شکل‌پذیر با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده

سعید صبوری^۱، سید رامین اسعد سجادی^۲

چکیده

دیوارهای برشی فولادی به عنوان یک سیستم مقاوم در برابر بارهای جانبی دارای توانایی بالایی در میرایی انرژی زلزله می‌باشند. به علت تعداد بسیار محدود آزمایش‌های انجام شده بر روی دیوارهای برشی فولادی با سخت‌کننده، ضریب رفتار این دیوارها و جذب انرژی آن‌ها نسبت به حالت بدون سخت‌کننده به صورت آزمایشگاهی تاکنون منتشر نشده است. برای رسیدن به این هدف دو نمونه دیوار برشی فولادی شکل‌پذیر با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده با استفاده از ورق فولادی نرم (جاذب انرژی) آزمایش شده است. همچنین برای مقایسه ضریب رفتار و میزان مشارکت قاب خمشی دربرگیرنده ورق در جذب انرژی یک نمونه قاب خمشی مذکور نیز مورد آزمایش قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ضریب رفتار دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده و با سخت‌کننده به ترتیب برابر ۱۱/۵ و ۱۲/۲ است، جذب انرژی دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده در تغییر مکان‌های مختلف در حدود ۲۰ تا ۳۶ درصد کمتر از دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده است. در دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده سهم جذب انرژی قاب از کل نمونه به ترتیب ۵۰ و ۶۷ درصد می‌باشد.

کلمات کلیدی:

دیوار برشی فولادی، سخت‌کننده، ضریب رفتار، شکل‌پذیری، مقاومت افزون

Experimental Investigation of Force Modification Factor and Energy Absorption Ductile Steel Plate Shear Walls with Stiffeners and without Stiffener

Saied Sabouri, Seyed Ramin Asad Sajadi

ABSTRACT

Steel plate shear walls has high capability for earthquake energy damping as a lateral load resisting system. Since the number of steel plate shear walls with stiffeners tests are limited, therefore the comparison of force modification factor and energy absorption of them relative to steel plate shear walls without stiffener has not published up to now. For this goal two steel plate shear walls specimens with stiffeners and without stiffener was tested. Also a moment frame specimen of surround plate was tested for comparing of force modification factor and energy absorption relative to steel plate shear walls. Results show that force modification factor of steel plate shear wall with stiffeners and without stiffener is 11.5 and 12.2. Steel plate shear wall energy absorption without stiffener in various displacement is about 20 to 36 percent less than one with stiffeners. In steel plate shear walls specimens with stiffeners and no stiffener the Portion of moment frame energy absorption is about 50 and 67 percent.

Key words:

Steel Plate Shear Wall, Stiffener, Force Modification Factor, Ductility, Over Strength

۱. دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی sabouri@kntu.ac.ir

۲. دانشجوی دکتری عمران سازه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی rasajadi@yahoo.com

دیوارهای برشی فولادی می‌باشد، همچنین نتایج نشان می‌دهد که جذب انرژی در تغییر مکان‌های کوچک آغاز می‌شود [۲]. تاکا هاشی و همکاران [۶] تعدادی آزمایش بر روی ورق دیوارهای برشی فولادی انجام داده‌اند. قاب دور ورق در این آزمایش‌ها به صورت مفصل می‌باشد. هدف این آزمایش‌ها تعیین حداقل ممان اینرسی لازم برای انتقال کمانش کلی از ورق به کمانش موضعی در زیر ورق‌ها بوده است. دکتر آستانه ضرایب رفتار را برای دیوارهای برشی فولادی پیشنهاد کرده است [۷]. به علت کمی آزمایش‌های انجام شده بر روی دیوارهای برشی فولادی با سخت‌کننده تاکنون ضریب رفتار قابل اعتمادی در این مورد پیشنهاد نشده است. همچنین تاکنون مقایسه‌ای بین ضرایب رفتار و جذب انرژی دیوارهای برشی فولادی با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده منتشر نشده است.

روش‌های مختلفی برای تعیین ضریب رفتار وجود دارند که متداولترین آن‌ها روش‌های به کار گرفته شده در آیین‌نامه‌های آمریکایی، آیین‌نامه‌های اروپایی، آیین‌نامه کانادا و روش‌های انرژی می‌باشد [۵]. روش آیین‌نامه‌های آمریکایی ساده و کاربردی تر هستند. در این تحقیق برای تعیین ضریب رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی و قاب خمشی از روش دو خطی یوانگ [۸] استفاده شده است. هدف از این تحقیق تعیین و مقایسه آزمایشگاهی ضریب رفتار و مقایسه جذب انرژی دو نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی شکل‌پذیر بدون سخت‌کننده و با سخت‌کننده و مقایسه آن‌ها با نمونه قاب خمشی پیرامون ورق است. برای این کار از دو نمونه آزمایشگاهی استفاده شده است که دقیقاً دارای مشخصات یکسانی هستند فقط یکی بدون سخت‌کننده و دیگری با سخت‌کننده است. تفاوت قابل توجه در نمونه بدون سخت‌کننده در این تحقیق با سایر نمونه‌های آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی در این است که برای جلوگیری از پاره شدن اتصال ورق در گوشه‌ها که به صورت زیب شدگی ظاهر می‌شود، چهار سخت‌کننده کوچک در

دیوارهای برشی فولادی سازه‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی به خصوص زلزله هستند. این سازه‌ها دارای توانایی جذب بالای انرژی زلزله هستند و به همین علت استفاده از آن‌ها در ساختمان‌ها افزایش یافته است. این دیوارها به دو صورت ورق با سخت‌کننده و ورق بدون سخت‌کننده به کار می‌روند. تحقیقات آزمایشگاهی زیادی بر روی دیوارهای برشی بدون سخت‌کننده با ورق نسبتاً نازک انجام شده است [۱] ولی در ارتباط با دیوارهای برشی فولادی با سخت‌کننده و استفاده از فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) در ورق دیوارهای برشی فولادی آزمایش‌های بسیار محدودی انجام شده است. فولاد نرم، فولادی است که مدول الاستیسیته آن برابر فولاد معمولی است ولی حد جاری شدن آن کمتر از فولاد معمولی است [۲]. ونچورا و خرازی [۳] با مشاوره صبوری دیوارهای برشی یک دهانه و یک طبقه را آزمایش کرده‌اند. این نمونه‌ها بدون سخت‌کننده بوده و ورق دارای مقاومت جاری شدن پایین (فولاد نرم) و قاب از فولاد ساختمانی با مقاومت بالا بوده است. هدف از این آزمایش‌ها بررسی خمش و ارزیابی عملکرد کاربرد ورق با مقاومت جاری شدن پایین (فولاد نرم) بوده است. ویان و برونوی [۴] نمونه‌ای از دیوار برشی فولادی یک دهانه و یک طبقه را آزمایش کردند که ورق به کار رفته از جنس فولاد نرم بود و هدف از این آزمایش بررسی عملکرد استفاده از فولاد نرم بود. صبوری و قلهکی [۵] دو نمونه دیوار برشی فولادی یک‌دهانه سه‌طبقه بدون سخت‌کننده را آزمایش کردند. یکی از نمونه‌ها با اتصال ساده و دیگری با اتصال گیردار بود. ورق استفاده شده در این دو آزمایش از ورق مقاومت پایین (فولاد نرم) و قاب از فولاد ساختمانی مقاومت بالا استفاده شده بود. هدف از انجام این آزمایش‌ها بررسی اثر اتصال ساده و گیردار و بررسی عملکرد استفاده از فولاد نرم در ورق دیوار برشی فولادی بوده است. آزمایش‌های انجام شده ورق با فولاد نرم نشان دهنده شکل‌پذیری و توانایی جذب انرژی بالا در

گوشه‌های ورق نصب شده است. همچنین از یک نمونه آزمایشگاهی قاب خمشی استفاده شده است که مشخصات قاب خمشی برابر قاب خمشی پیرامون ورق است. نمونه‌های آزمایشگاهی توسط مولفین در آزمایشگاه سازه مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن انجام شده است.

۲- مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی

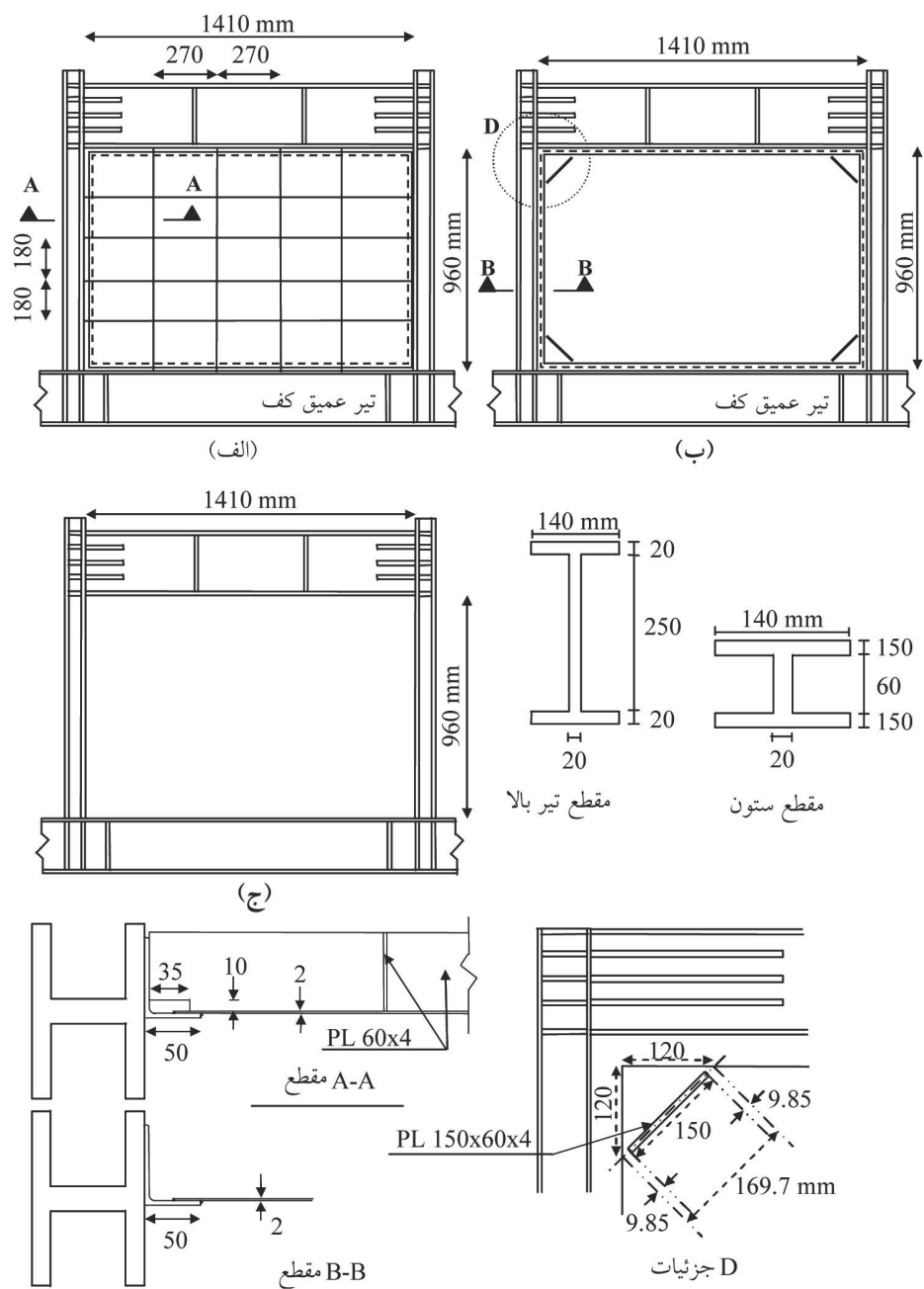
مشخصات دو نمونه دیوار برشی فولادی و یک نمونه آزمایشگاهی قاب خمشی مورد آزمایش در شکل (۱) نشان داده شده است. نمونه‌ها دارای مقیاس یک سوم بوده و ارتفاع و عرض آن‌ها به ترتیب ۱۲۵۰ و ۱۵۹۰ میلی‌متر می‌باشد. نمایی از نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل (۲) آورده شده است. در نمونه‌های آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی ضخامت ورق ۲ میلی‌متر می‌باشد. در نمونه دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده، سخت‌کننده‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که از کماتش کلی نمونه جلوگیری شود. ابعاد زیر صفحه‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که ورق زیر صفحه‌ها قبل از کماتش، ابتدا بر اثر تنش برشی جاری شده سپس با توجه به ابعادشان پس کماتش پلاستیک در آن‌ها پدیدار شود. ضخامت سخت‌کننده‌ها ۴ میلی‌متر و عرض آن‌ها ۶۰ میلی‌متر می‌باشد. سخت‌کننده‌ها در یک طرف بر روی ورق نصب شده‌اند. در نمونه دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده، چهار سخت‌کننده در چهار گوشه ورق برای جلوگیری از زیپ شدن ورق از گوشه‌ها در یک طرف ورق نصب شده است که مشخصات آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. در نمونه‌های دیوار برشی فولادی برای اتصال ورق به قاب، از نبشی $60 \times 60 \times 6$ میلی‌متر استفاده شده است. برای انجام دقیق جوشکاری اتصال ورق به لبه نبشی یکی از اضلاع نبشی تراشکاری شده تا لبه آن کاملاً صاف گردد با این کار یک ضلع نبشی به طول ۵۰ میلی‌متر کاهش داده شده است که در شکل (۱) دیده می‌شود. در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی ابتدا ورق، نبشی و سخت‌کننده‌ها به یکدیگر متصل شده سپس تیر و ستون در دور آن‌ها نصب شده

است. معمولاً در اثر جوشکاری، حرارت ایجاد شده در ورق باعث تابیدگی نبشی توسط ورق می‌شود، از همین رو از نبشی $60 \times 60 \times 6$ استفاده شده تا توانایی لازم در برابر تابیدگی را داشته باشد. به علت زیاد بودن عملیات جوشکاری در نمونه دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده، ورق به قاب نبشی و سخت‌کننده با استفاده از جوش آرگن ER70S3 به بعد جوش ۲ میلی‌متر متصل شده تا حرارت ایجاد شده در ورق به حداقل برسد. در نمونه دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده، ورق به قاب نبشی با استفاده از جوش E6013 به بعد جوش ۲ میلی‌متر متصل شده است. ستون با استفاده از جوش شیاری با نفوذ کامل به تیر عمیق کف با استفاده از الکتروود E7018 متصل شده است. در پای ستون ورق کوچکی برای اتصال ستون به تیر عمیق مورد استفاده قرار گرفته است. بال‌های تیر به بال ستون با استفاده از جوش شیاری با نفوذ کامل و جان تیر به بال ستون با استفاده از جوش گوشه با استفاده از الکتروود E7018 متصل شده است.

بار به وسیله دو جک هیدرولیکی که در دو طرف نمونه قرار دارد وارد می‌شود. در پشت هر جک یک نیرو سنج برای اندازه‌گیری نیرو قرار داده شده است. تغییر مکان نمونه توسط چهار تغییر مکان سنج نصب شده در کنار جک‌ها اندازه‌گیری می‌شود. برای اندازه‌گیری تغییر شکل ستون‌ها بر روی هر ستون چهار تغییر مکان سنج نصب شده است که یک عدد در بالای ستون و سه عدد دیگر در فواصل مساوی از یکدیگر از پایین تا بالای هر ستون قرار داده شده است. برای ثبت لغزش‌های احتمالی تیر عمیق کف، دو تغییر مکان سنج به صورت افقی و دو عدد دیگر به صورت قائم بر روی تیر عمیق کف نصب شده‌اند. برای تعیین آستانه جاری شدن ورق از تعدادی کرنش سنج پلاستیک سه محوره بر روی ورق استفاده شده است. کرنش‌سنج‌های سه محوره در میانه ورق و در نزدیکی لبه افقی و قائم ورق نصب شده‌اند. برای تعیین آستانه تشکیل مفصل پلاستیک در بالا و پایین یک ستون در نمونه‌های دیوار برشی فولادی و هر دو ستون در نمونه قاب خمشی

فلسفه فولاد نرم (فولاد جاذب انرژی) [۲] استفاده شده است که بدین ترتیب دیوارهای مذکور در رده دیوارهای برشی فولادی شکل پذیر قرار می گیرند. مشخصات مصالح که از آزمایش کشش به دست آمده، در جدول (۱) آورده شده است.

از کرنش سنج های پلاستیک یک محوره استفاده شده است. در هر یک از بالا و پایین ستون، دو کرنش سنج بر روی سطح بیرونی و دو کرنش سنج بر روی سطح درونی بال ستون نصب شده است. نمونه ها بر اساس روش اندرکنش قاب و ورق [۹] طراحی شده اند. ورق بکار گرفته شده از جنس فولاد نرم (فولاد با مقاومت جاری شدن پایین) می باشد. همچنین در طراحی از تئوری و



شکل (۱): مشخصات هندسی نمونه های آزمایشگاهی الف- دیوار برشی فولادی با سخت کننده ب- دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده ج- قاب خمشی

۳- مبانی نظری مورد استفاده در محاسبه شکل پذیری و ضریب رفتار [۸]

در این تحقیق از روش دو خطی یوانگ برای تخمین ضرایب رفتار استفاده شده است. منحنی پاسخ واقعی و دو خطی یوانگ در شکل (۳) نشان داده شده است. در این شکل محور قائم برش پایه و محور افقی تغییر مکان افقی بالای نمونه می‌باشد. در این شکل V_e حداکثر برش پایه است در صورتی که سازه در محدوده الاستیک باقی بماند و تغییر مکان متناظر آن Δ_e است. V_y بار جاری شدگی نمونه است. تغییر مکان متناظر این بار Δ_y نامیده می‌شود. V_s متناظر برش پایه‌ای است که اولین عنصر به مرحله پلاستیک می‌رسد و از این مرحله به بعد سازه به‌طور قابل توجهی از مرحله الاستیک خارج شده و تحلیل خطی برقرار نمی‌باشد. این تراز نیرو معمولاً در آیین‌نامه‌هایی کاربرد دارد که در طراحی از روش‌های بار نهایی استفاده می‌کنند. برخی آیین‌نامه‌هایی که در طراحی از روش تنش مجاز استفاده می‌کنند بار V_w را به کار می‌برند. تغییر مکان متناظر بارهای V_s و V_w به ترتیب Δ_s و Δ_w نامیده می‌شوند. حداکثر تغییر مکان سازه Δ_{max} نامیده شده و در شکل (۳) نشان داده شده است. ضریب شکل پذیری سازه (μ_s) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_s = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \quad (1)$$

ضریب مقاومت افزون (Ω) برابر است با:

$$\Omega = \frac{V_y}{V_s} = \frac{\Delta_y}{\Delta_s} \quad (2)$$

ضریب تنش مجاز (Y) به صورت زیر تعریف شده و مقدار آن در این تحقیق ۱/۴ فرض شده است [۸]:

$$Y = \frac{V_s}{V_w} = \frac{\Delta_s}{\Delta_w} \quad (3)$$

ضریب تغییر مکان جانبی (C_d) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_d = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_s} = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \frac{\Delta_y}{\Delta_s} = \mu\Omega \quad (4)$$

ضریب تغییر مکان جانبی متناظر با حد مجاز تنش‌ها (C_w) از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$C_w = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_w} = \frac{\Delta_{max}}{\Delta_y} \frac{\Delta_y}{\Delta_s} \frac{\Delta_s}{\Delta_w} = \mu\Omega Y \quad (5)$$

ضریب رفتار ناشی از بار جاری شدگی (R_μ) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_\mu = \frac{V_e}{V_y} \quad (6)$$

ضریب رفتار (R) برابر است با:

$$R = \frac{V_e}{V_s} = \frac{V_e}{V_y} \frac{V_y}{V_s} = R_\mu \Omega \quad (7)$$

ضریب رفتار ناشی از تنش‌های مجاز (R_w) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_w = \frac{V_e}{V_w} = \frac{V_e}{V_y} \frac{V_y}{V_s} \frac{V_s}{V_w} = R_\mu \Omega Y = RY \quad (8)$$

نیومارک و هال [۱۰] ضریب رفتار ناشی از بار جاری شدگی (R_μ) را با توجه به مقدار شکل‌پذیری سازه (μ_s) بر اساس منحنی طیفی به صورت زیر پیشنهاد کردند:

$$R_\mu = \mu_s \quad (9) \quad \text{در نواحی سرعت و تغییر مکان ثابت}$$

$$R_\mu = \sqrt{2\mu_s - 1} \quad (10) \quad \text{در نواحی شتاب ثابت}$$

در رابطه (۹) و (۱۰) باید شرط $R_\mu / \mu_s \leq 1$ برقرار باشد. نیومارک و هال برای نواحی سرعت و تغییر مکان ثابت با فرکانس حدود کمتر از ۲ هرتز برای سازه‌های نسبتاً نرم رابطه (۹) را پیشنهاد نمودند و برای نواحی شتاب ثابت منحنی طیفی با فرکانس حدود بیش از ۲ هرتز برای سازه‌های نسبتاً سخت رابطه (۱۰) را پیشنهاد نمودند [۱۰].

۴- شرح مختصر و نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی

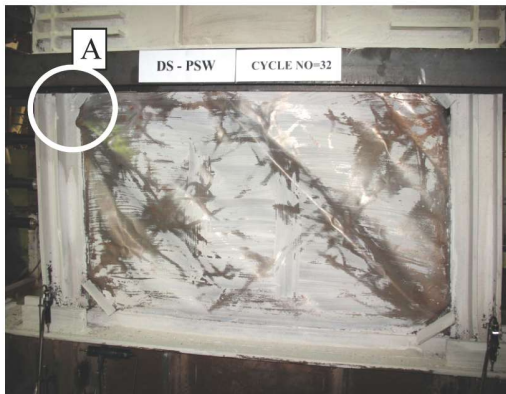
نمونه‌ها مطابق استاندارد ATC-24 [۱۱] زیر بار دوره‌ای قرار گرفته‌اند. بار به وسیله دو جک در دو طرف نمونه وارد شده و بار و تغییر مکان ثبت شده است.



شکل (۴): تغییر شکل نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی با سخت کننده در تغییر مکان ۶۱/۸ میلیمتر



(الف)



جزئیات A

شکل (۵): تغییر شکل و پارگی ورق از گوشه سخت کننده در نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده در تغییر مکان ۵۱/۳ میلیمتر

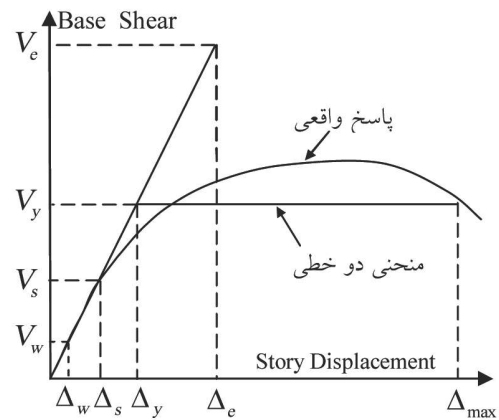
جدول (۱): خصوصیات مکانیکی اعضای نمونه های آزمایشگاهی

اعضا	تنش جاری شدن (N/mm ²)	تنش نهایی (N/mm ²)
ورق	192.4	288.7
ستون	414.8	551.7



(ب)

شکل (۲): شمای نمونه های دیوار برشی فولادی الف- با سخت کننده ب- بدون سخت کننده



شکل (۳): منحنی واقعی نمونه و مشخصات منحنی دو خطی یوانگ

۱-۴ - نمونه دیوار برشی فولادی با سخت کننده

شده در گوشه‌های ورق تاثیر قابل توجهی بر مقاومت نمونه نگذاشت. در نمونه پارگی وسط ورق به تدریج و آرامی صورت می‌گرفت. مقاومت ورق زمانی از بین رفت که گسترش پارگی در وسط زیر صفحه‌ها به اندازه‌ای گسترش یافت که تقریباً وسط ورق زیر صفحه پیوستگی خود را از دست داد. تا زمان از بین رفتن مقاومت ورق هیچگونه کماتش کلی یا موضعی در بال و جان ستون دیده نشد. تغییر شکل نمونه در شکل (۴) دیده می‌شود.

۲-۴ - نمونه دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده

در شش دوره اول بارگذاری بار به تدریج افزایش داده شد و تقریباً جاری شدگی قابل توجهی در نمونه ایجاد نشد. بار آستانه جاری شدن ورق تقریباً $1/7$ میلیمتر است. به علت کوچک بودن تغییر مکان آستانه جاری شدن و جلوگیری از خستگی نمونه در زمان آزمایش گام تغییر مکانی تا دوره بارگذاری بیست و یکم برابر سه میلیمتر و مابقی شش میلیمتر در نظر گرفته شد. بیشترین بار قابل تحمل نمونه $789/6$ کیلونیوتن در تغییر مکان 39 میلیمتر ایجاد شد. نسبت حداکثر تغییر مکان جانبی نمونه به ارتفاع ستون $5/34$ درصد می‌باشد. تعداد بارگذاری دوره‌ای 32 حلقه بوده است.

در دوره بارگذاری سیزدهم در تغییر مکان 9 میلیمتر شکستگی در گوشه‌های اتصال دو نبشی ایجاد شد شکستگی ایجاد شده در گوشه‌های نبشی با افزایش تغییر مکان بیشتر شد و امتداد این شکست با زاویه 45 درجه باعث ایجاد پارگی در ورق محصور بین نبشی و سخت کننده می‌شد. به علت وجود سخت کننده رشد ترک از گوشه نبشی به آرامی در ورق گسترش می‌یافت و باعث ایجاد شکستگی جلدی در ورق نمی‌شد. آزمایش‌های انجام شده در دیوارهای برشی فولادی بدون سخت کننده نشان می‌دهند که خرابی نمونه‌ها به علت پارگی ورق به صورت زیپ شدن لبه ورق می‌باشد که این پارگی از گوشه ورق شروع و با افزایش اندک بار به سرعت در لبه ورق گسترش می‌یابد [۵]. برای جلوگیری

در شش دوره اول بارگذاری بار به تدریج افزایش داده شد و تقریباً جاری شدگی قابل توجهی در نمونه ایجاد نشد. در دوره ششم بارگذاری نمونه کرنش سنج‌های نصب شده بر روی ورق نشان داد که تغییر مکان آستانه جاری شدن ورق تقریباً $1/58$ میلیمتر است. در میانه دوره هفتم بارگذاری کرنش سنج‌های نصب شده بر روی ورق نشان داد که تقریباً تمام ورق جاری شده است. به علت کوچک بودن تغییر مکان آستانه جاری شدن و جلوگیری از خستگی نمونه در زمان آزمایش گام تغییر مکانی برابر $4/4$ میلیمتر در نظر گرفته شد. بیشترین بار قابل تحمل نمونه 808 کیلونیوتن در تغییر مکان $34/05$ میلیمتر ایجاد شد. نسبت حداکثر تغییر مکان جانبی نمونه به ارتفاع ستون $6/44$ درصد می‌باشد. تعداد بارگذاری دوره‌ای 34 حلقه بوده است. در روند بارگذاری زیر صفحه‌ها تا قبل از جاری شدن کماتش نکردند. کماتش زیر صفحه‌ها پس از جاری شدن ورق از تغییر مکان $1/7$ برابر تغییر مکان آستانه جاری شدن ورق شروع شد.

در دوره دهم بارگذاری در تغییر مکان $8/6$ میلیمتر گوشه اتصال نبش‌ها شکست. این شکستگی داخل ورق ادامه یافت ولی به علت وجود سخت کننده تقریباً تاثیری در باربری ایجاد نمی‌کرد. همچنین باعث زیپ شدگی نمی‌شد. در طول دوره بارگذاری کماتش قابل توجهی در سخت کننده‌ها ایجاد نشد همچنین هیچگونه پارگی بین ورق و سخت کننده ایجاد نشد. در زمان آزمایش ورق از وسط زیر صفحه‌ها شروع به پارگی‌های موضعی نمود. اولین پارگی در دوره بارگذاری بیستم در تغییر مکان $21/6$ میلیمتر بصورت سوراخ کوچکی در یکی از زیر صفحه‌ها ایجاد شد. با افزایش بار، پارگی‌ها رشد کرد. در این نمونه هیچگونه پارگی به صورت زیپ شدگی بین ورق و لبه نبشی بوجود نیامد. خرابی نمونه به علت پارگی گسترده در وسط زیر صفحه‌ها بود و ستون‌ها تا زمان از بین رفتن ورق دچار کماتش و خرابی نشد. پارگی‌های کوچک موضعی ایجاد شده در وسط زیر صفحه‌ها و پارگی ایجاد

از زیپ شدن در این نمونه در چهار گوشه ورق سخت‌کننده‌های کوچکی نصب شده‌اند. در دوره بارگذاری سیزدهم در تغییر مکان ۹ میلیمتر پارگی کوچکی در ورق از گوشه سخت‌کننده‌ها شروع شد و ابتدا با افزایش بار پارگی از یک گوشه نبشی به داخل ورق مثلثی محصور به سخت‌کننده و نبشی‌ها گسترش یافته سپس به طرف قسمت بیرون ورق مثلثی در لبه ورق و نبشی گسترش یافت. پارگی ورق آرام صورت می‌گرفت. ورق از لبه نبشی فقط از یک طرف سخت‌کننده جدا می‌شد و نتایج آزمایش نشان داد که حتی زمانی که پارگی ورق زیاد شده است ولی سخت‌کننده‌ها توانایی تشکیل میدان پس‌کمانش را دارند. تا زمان رشد زیاد پارگی و از بین رفتن مقاومت ورق هیچ‌گونه کمانش کلی یا موضعی در بال و جان ستون دیده نشد. تغییر شکل نمونه در شکل (۵) دیده می‌شود.

۴-۳- نمونه آزمایشگاهی قاب خمشی

در شش دوره اول بارگذاری بار به تدریج افزایش داده شد و تقریباً جاری شدگی قابل توجهی در نمونه ایجاد نشد. در دوره هفتم بارگذاری نمونه کرنش سنج‌های نصب شده بر روی بال ستون نشان داد که تغییر مکان آستانه جاری شدن بال ستون‌ها تقریباً ۸/۵ میلیمتر است. در آزمایش گام تغییر مکانی برابر ۸/۵ میلیمتر در نظر گرفته شد. بیشترین بار قابل تحمل نمونه ۴۰۵ کیلو نیوتن در تغییر مکان ۵۹/۶ میلیمتر ایجاد شد. نسبت حداکثر تغییر مکان جانبی نمونه به ارتفاع ستون ۶/۶۸ درصد می‌باشد. تعداد بارگذاری دوره‌ای ۲۶ حلقه بوده است. پایان آزمایش به علت شکست پای ستون بود و تا پایان آزمایش هیچ‌گونه کمانش موضعی در بال و جان ستون دیده نشد.

۵- محاسبه ضریب رفتار و اثری میراشده در نمونه‌های آزمایشگاهی

منحنی دو خطی یوانگ در شکل‌های (۶) تا (۸) برای نمونه‌های آزمایشگاهی نشان داده شده است. در دو نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی ابتدا منحنی سه خطی

کشیده شده سپس با استفاده از آن، منحنی دو خطی رسم شده است. با استفاده از منحنی‌های دو خطی ضرایب رفتار، شکل‌پذیری، ضرایب تغییر مکانی و مقاومت افزون در جدول (۲) بر اساس رابطه (۱۰) و در جدول (۳) بر اساس رابطه (۹) آورده شده است. همانطور که در جدول‌های (۲) و (۳) دیده می‌شود ضرایب رفتار به دست آمده در جدول (۲) کمتر از ضرایب رفتار جدول (۳) است که نشان می‌دهد نمونه‌های آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی در رده سازه‌های نسبتاً سخت با فرکانس حدوداً بیش از ۲ هرتز قرار داشته و ضریب رفتار آن‌ها باید از رابطه (۱۰) بدست آید. تعیین فرکانس سازه نیازمند جرم، ارتفاع، چیدمان دیوار برشی فولادی و غیره در ساختمان می‌باشد که بحث آن از حوصله این تحقیق خارج است. در این تحقیق هدف تعیین ضرایب رفتار دیوارهای برشی فولادی نمونه‌های آزمایشگاهی یاد شده می‌باشد. بنابراین از آنجایی که در آزمایش‌هایی که مطابق استاندارد ATC-24 [۱۱] با روش بار چرخه‌ای استاتیکی انجام می‌شود جرمی بر روی نمونه آزمایشگاهی قرار داده نمی‌شود تعیین فرکانس نمونه آزمایشگاهی قابل محاسبه نیست. بنابراین در این تحقیق ضرایب رفتار از هر یک از رابطه‌های (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شود تا طراحان بتوانند قضاوت روشنی از ضرایب رفتار متناسب با فرکانس سازه مورد طراحی داشته باشند. ولی نمونه‌های آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی این تحقیق دارای دو ویژگی متمایز با سایر آزمایش‌های دیوارهای برشی فولادی هستند اول آن که دیوارهای برشی مورد آزمایش در دنیا معمولاً دارای ورق دیوار نسبتاً نازک بوده‌اند در حالی که در دیوارهای برشی فولادی با سخت‌کننده آزمایش شده در این تحقیق با این هدف که زیر صفحه‌ها قبل از جاری شدن کمانش نکنند برای افزایش فاصله سخت‌کننده‌ها از یکدیگر لازم است تا از ورق دیوار با ضخامت متوسط استفاده شود و برای مقایسه دقیق دو نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده ضخامت ورق به کار رفته در نمونه با سخت‌کننده در

نمونه بدون سخت‌کننده نیز به کار رفته است. دوم استفاده از فولاد نرم در ورق دیوار برشی فولادی باعث افزایش ضخامت دیوار می‌شود. این دو ویژگی باعث افزایش سختی اولیه به طور قابل توجهی می‌شود. سختی بالای نمونه‌های آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی باعث افزایش فرکانس سازه شده و ضرایب رفتار آن باید از رابطه (۱۰) محاسبه شود. بنابراین ضرایب رفتار به دست آمده از جدول (۲) برای نمونه‌های آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی منطقی تر است.

انرژی میرا شده متناظر تغییر مکان مطابق شکل (۹) مساحت زیر منحنی چرخه‌ای در هر حلقه می‌باشد. مقدار انرژی میرا شده متناظر تغییر مکان برای نمونه‌های آزمایشگاهی در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

۶- مقایسه ضریب رفتار، شکل‌پذیری و انرژی میرا شده در نمونه‌های آزمایشگاهی

ضرایب رفتار، شکل‌پذیری و انرژی میرا شده ابتدا در دو نمونه آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده با یکدیگر مقایسه شده سپس بین نمونه آزمایشگاهی قاب خمشی و نمونه‌های دیوارهای برشی فولادی مقایسه انجام گرفته است. برای بدست آمدن درک بهتری از مقایسه قاب خمشی و دیوارهای برشی فولادی درصد افزایش یا کاهش موارد یاد شده بین نمونه قاب خمشی و هریک از نمونه‌های آزمایشگاهی دیوارهای برشی فولادی به دست آمده و میانگین آن‌ها در این تحقیق آورده شده است.

۶-۱- مقایسه دو نمونه آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده و با سخت‌کننده

مقدار نسبت حداکثر تغییر مکان جانبی نمونه به ارتفاع ستون نمونه دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده در حدود ۱۷ درصد کمتر از نمونه با سخت‌کننده است. مطابق جدول (۲)، مقدار ضریب رفتار ناشی از بار جاری

شدگی (R_H) در نمونه بدون سخت‌کننده در حدود ۱۴ درصد کمتر از نمونه با سخت‌کننده است. ضریب رفتار ناشی از تنش‌های مجاز (R_W) در نمونه بدون سخت‌کننده در حدود ۶ درصد کمتر از نمونه با سخت‌کننده است. ضریب شکل‌پذیری سازه (μ_s) در نمونه بدون سخت‌کننده در حدود ۲۵ درصد کمتر از نمونه با سخت‌کننده است. ضرایب تغییر مکان C_H و C_W در نمونه بدون سخت‌کننده در حدود ۱۷ درصد کمتر از نمونه با سخت‌کننده است. ضریب مقاومت افزون (Ω) در نمونه بدون سخت‌کننده در حدود ۱۰ درصد بیشتر از نمونه با سخت‌کننده است. منحنی چرخه‌ای دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده شکل (۶) بیشتر به سمت دوکی شکل متمایل است در حالی که منحنی چرخه‌ای دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده شکل (۷) به صورت S شکل است. تفاوت عمده این دو منحنی به این علت است که در نمونه بدون سخت‌کننده، کل ورق کماتش می‌کند در حالیکه در نمونه با سخت‌کننده فقط زیر صفحه‌ها دچار کماتش می‌شوند. تفاوت در نوع کماتش باعث می‌شود تا مطابق شکل (۱۰) مقدار انرژی میرا شده در دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده در تغییر مکان‌های کوچک تا بزرگ به ترتیب در حدود ۲۰ تا ۳۶ درصد کمتر از دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده باشد. استفاده از سخت‌کننده‌ها باعث شده است تا پارگی ورق در هر دو نمونه به تعویق افتاده و شکل‌پذیری بالا رود به طوریکه ضریب شکل‌پذیری سازه (μ_s) به دست آمده در این دو نمونه آزمایشگاهی در حدود ۲ برابر ضریب شکل‌پذیری گزارش شده [۵] در مورد آزمایش‌های دیوارهای برشی فولادی با ورق نازک است.

۶-۲- مقایسه نمونه آزمایشگاهی قاب خمشی با دیوارهای برشی فولادی

مطابق جدول (۲)، مقدار ضریب رفتار ناشی از بار جاری شدگی (R_H) در قاب خمشی در حدود ۴۴ درصد کمتر از متوسط مقدار در نمونه‌های دیوارهای برشی فولادی

ضریب رفتار قاب خمشی ویژه در آیین‌نامه ASCE7-05 [۱۲] همخوانی مناسبی دارد. ضریب رفتار $R=8$ در آیین‌نامه یاد شده بالاترین ضریب رفتار ممکن برای سازه‌های مختلف در برابر زلزله است که قاب خمشی ویژه نیز جزء آن‌ها می‌باشد. بنابراین ضریب رفتار (R) نمونه‌های آزمایشگاهی دیوار برشی فولادی در حدود ۳۴ درصد بیشتر از نمونه آزمایشگاهی قاب خمشی است که به علت استفاده از فولاد نرم در ورق دیوارهای برشی فولادی می‌باشد که ضریب رفتار آن‌ها را بیشتر از کلیه سازه‌های مقاوم در برابر زلزله موجود در آیین‌نامه ASCE7-05 قرار داده است. مطابق شکل (۱۰) در تغییر مکان‌های کوچک در حالی که جذب انرژی قاب بسیار کم می‌باشد ورق جذب انرژی مناسبی دارد و این نشان می‌دهد که در هنگام زلزله در تغییر مکان‌های کوچک ورق شروع به جذب انرژی می‌کند. این پدیده به علت استفاده از روش طراحی اندرکنش ورق و قاب [۹] و استفاده ورق با فولاد نرم تر بر اساس تئوری و فلسفه فولاد نرم (جذب انرژی) [۲] می‌باشد که در تغییر مکان‌های کوچک ورق وارد ناحیه غیر خطی شده و انرژی را به خود جذب می‌کند. بدین ترتیب می‌توان بیان نمود که انرژی زلزله به صورت هدایت شده توسط ورق که به عنوان عضوی برای جذب انرژی تعیین گردیده است جذب می‌شود. این نوع دیوارها به عنوان دیوارهای برشی فولادی شکل‌پذیر نامیده می‌شوند.

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق برای تعیین و مقایسه ضریب رفتار، شکل‌پذیری، ضرایب تغییر مکان و انرژی میرا شده در دیوارهای برشی فولادی بدون سخت‌کننده و با سخت‌کننده سه آزمایش انجام شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد:

۱- ضریب رفتار ناشی از بار جاری شدگی (R_{II}) در دیوار برشی فولادی شکل‌پذیر با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده با فرض فرکانس بالای ۲ هرتز به ترتیب ۵/۸

است. ضریب رفتار (R) و ضریب رفتار ناشی از تنش‌های مجاز (R_w) در قاب خمشی در حدود ۶۰ درصد کمتر از متوسط مقدار در دیوارهای برشی فولادی است. ضریب شکل‌پذیری سازه (μ_s) در قاب خمشی در حدود ۶۷ درصد کمتر از متوسط ضریب شکل‌پذیری در دیوارهای برشی فولادی است. ضرایب تغییر مکان C_H و C_w در قاب خمشی در حدود ۷۶ درصد کمتر از متوسط مقدار در دیوارهای برشی فولادی است. ضریب مقاومت افزون (Ω) در قاب خمشی در حدود ۲۷ درصد کمتر از متوسط مقدار در دیوارهای برشی فولادی است. قاب‌های خمشی عموماً دارای سختی پایین بوده و ضریب رفتار به دست آمده از رابطه (۹) برای آن‌ها منطقی تر است. از همین رو ضریب رفتار به دست آمده برای نمونه قاب خمشی در جدول (۳) قابل قبول تر از مقدار منناظر جدول (۲) می‌باشد. با مقایسه ضریب رفتار قاب خمشی به دست آمده از جدول (۳) و ضرایب رفتار دیوارهای برشی فولادی در جدول (۲) دیده می‌شود که مقدار ضریب رفتار ناشی از بار جاری شدگی (R_{II}) در قاب خمشی در حدود ۹ درصد کمتر از متوسط مقدار در دیوارهای برشی فولادی است. ضریب رفتار (R) و ضریب رفتار ناشی از تنش‌های مجاز (R_w) در قاب خمشی در حدود ۳۴ درصد کمتر از متوسط مقدار در دیوارهای برشی فولادی است. مطابق شکل (۱۰) در دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده سهم جذب انرژی قاب خمشی از کل نمونه در تغییر مکان‌های مختلف بین ۷ تا ۵۰ درصد می‌باشد. در دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده سهم جذب انرژی قاب خمشی از کل نمونه در تغییر مکان‌های مختلف بین ۹ تا ۶۷ درصد است. در تغییر مکان‌های پایین ورق جاری شده در حالی که ستون در ناحیه الاستیک قرار دارد.

۳-۶- اثر استفاده از فولاد نرم در ورق دیوارهای برشی فولادی

ضریب رفتار (R) به دست آمده از جدول (۳) برای نمونه آزمایشگاهی قاب خمشی برابر ۷/۸ می‌باشد که با

و ۵ می‌باشد. و مقدار این ضریب در دیوار برشی بدون سخت‌کننده ۱۴ درصد کمتر از دیوار برشی با سخت‌کننده است. در صورت فرض فرکانس کمتر از ۲ هرتز ضرایب یاد شده به طور محسوسی افزایش می‌یابند.

۲- ضریب رفتار (R) در دیوار برشی فولادی شکل‌پذیر با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده با فرض فرکانس بالای ۲ هرتز به ترتیب ۱۲/۲ و ۱۱/۵ می‌باشد. و مقدار این ضریب در دیوار برشی بدون سخت‌کننده ۶ درصد کمتر از دیوار برشی با سخت‌کننده است. در صورت فرض فرکانس کمتر از ۲ هرتز ضرایب یاد شده به طور محسوسی افزایش می‌یابند.

۳- مقدار ضریب رفتار ناشی از بار جاری شدگی (R_w) در دیوار برشی فولادی شکل‌پذیر با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده با فرض فرکانس بالای ۲ هرتز به ترتیب ۱۷/۱ و ۱۶/۱ می‌باشد. و مقدار این ضریب در دیوار برشی بدون سخت‌کننده ۶ درصد کمتر از دیوار برشی با سخت‌کننده است. در صورت فرض فرکانس کمتر از ۲ هرتز ضرایب یاد شده به طور محسوسی افزایش می‌یابند.

۴- ضریب شکل‌پذیری سازه (μ_s) در دیوار برشی فولادی شکل‌پذیر با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده به ترتیب ۱۷/۱ و ۱۲/۹ می‌باشد. و مقدار این ضریب در

دیوار برشی بدون سخت‌کننده ۲۵ درصد کمتر از دیوار برشی با سخت‌کننده است.

۵- ضریب مقاومت افزون (Ω) در دیوار برشی فولادی شکل‌پذیر با سخت‌کننده و بدون سخت‌کننده به ترتیب ۲/۱ و ۲/۳ می‌باشد. و مقدار این ضریب در دیوار برشی بدون سخت‌کننده ۱۰ درصد بیشتر از دیوار برشی با سخت‌کننده است.

۶- مقدار انرژی میرا شده در دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده در تغییر مکان‌های کوچک تا بزرگ به ترتیب در حدود ۲۰ تا ۳۶ درصد کمتر از دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده است.

۸- در دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده سهم جذب انرژی قاب از کل نمونه در تغییر مکان‌های کوچک ۷ درصد و در نهایت در تغییر مکان‌های بزرگ به ۵۰ درصد می‌رسد. در دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده سهم جذب انرژی قاب از کل نمونه در تغییر مکان‌های کوچک ۹ درصد و در نهایت در تغییر مکان‌های بزرگ به ۶۷ درصد می‌رسد.

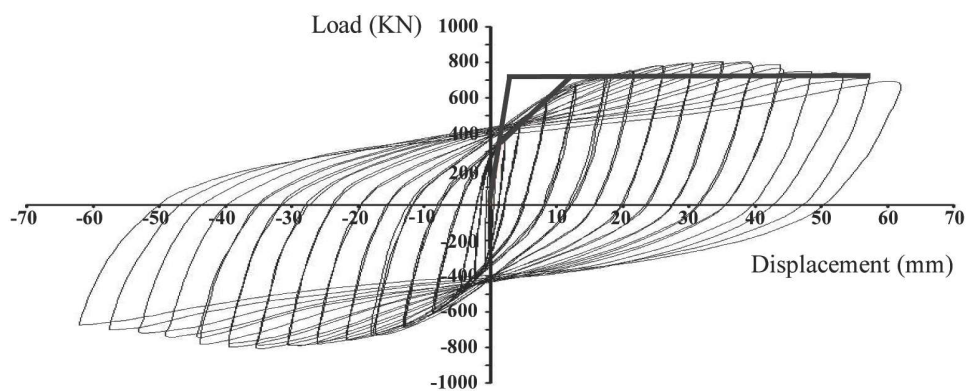
۹- در دیوارهای برشی فولادی شکل‌پذیر ورق قبل از قاب در تغییر مکان کوچکتر وارد ناحیه پلاستیک شده و عمده انرژی زلزله را جذب می‌کند.

جدول (۲): نتایج آزمایشگاهی محاسبه شکل‌پذیری، ضرایب تغییر مکانی، مقاومت افزون و ضریب رفتار با استفاده از رابطه ۱۰

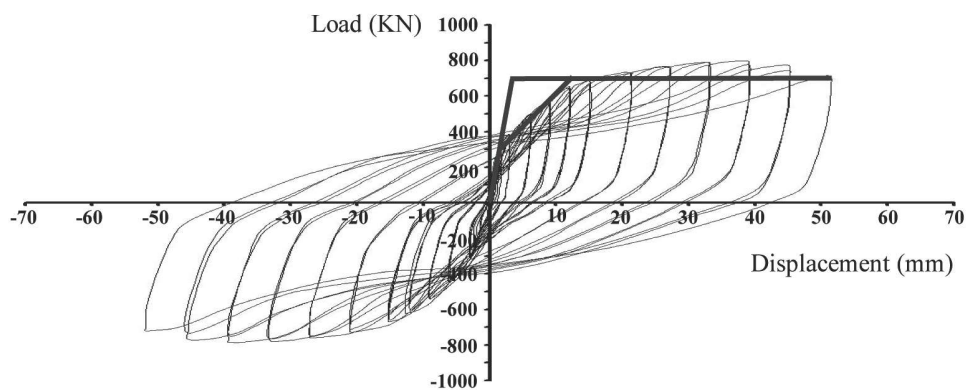
نمونه	R_μ	R	R_w	μ_s	C_d	C_w	Ω
دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده	5.8	12.2	17.1	17.1	35.9	50.3	2.1
دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده	5.0	11.5	16.1	12.9	29.7	41.6	2.3
قاب خمشی	3.0	4.8	6.7	4.9	7.8	10.9	1.6

جدول (۳): نتایج آزمایشگاهی محاسبه شکل‌پذیری، ضرایب تغییر مکانی، مقاومت افزون و ضریب رفتار با استفاده از رابطه ۹

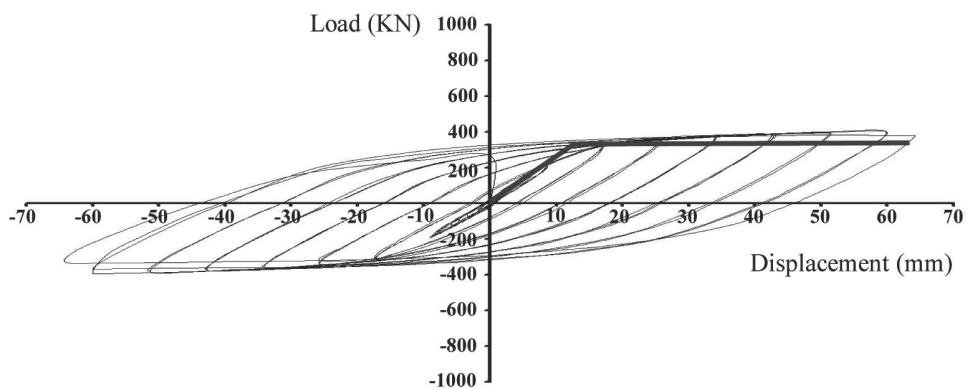
نمونه	R_μ	R	R_w	μ_s	C_d	C_w	Ω
دیوار برشی فولادی با سخت‌کننده	17.1	35.9	50.3	17.1	35.9	50.3	2.1
دیوار برشی فولادی بدون سخت‌کننده	12.9	29.7	41.6	12.9	29.7	41.6	2.3
قاب خمشی	4.9	7.8	10.9	4.9	7.8	10.9	1.6



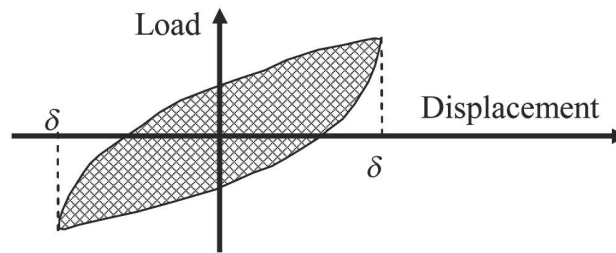
شکل (۶): منحنی چرخه‌ای آزمایشگاهی، منحنی دوخطی یوانگ در نمونه دیوار برشی فولادی با سخت کننده



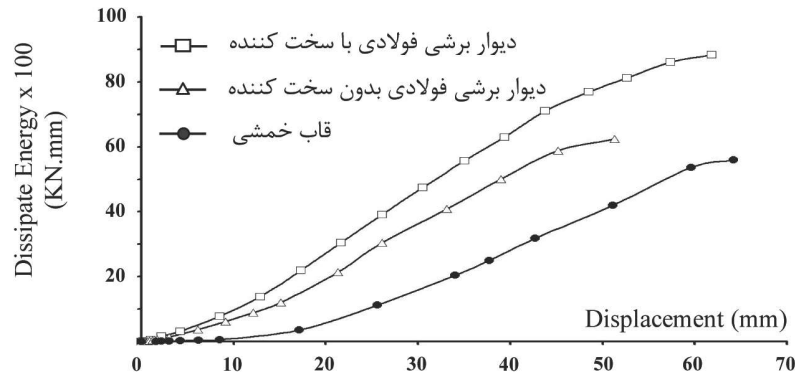
شکل (۷): منحنی چرخه‌ای آزمایشگاهی، منحنی دوخطی یوانگ در نمونه دیوار برشی فولادی بدون سخت کننده



شکل (۸): منحنی چرخه‌ای آزمایشگاهی، منحنی دوخطی یوانگ در نمونه قاب خمشی



شکل (۹): انرژی میرا شده متناظر تغییر مکان در منحنی های چرخه‌ای



شکل (۱۰): انرژی میرا شده در نمونه های آزمایشگاهی

مراجع

and Particular Steel Bracings under Alternative Horizontal Load", Researchers of Structural Engineering Laboratory Technical Research Institute Ohbayashi-Gumi Ltd. Tokyo, Japan.

7- Abolhassan Astaneh-Asl, "Seismic Behavior and Design of Steel Shear Walls", AISC Web Page (www.aisc.org), August 2001.

8-Chia-Ming Uang, "Establishing R (or R_w) and Cd Factors for Building Seismic Provisions", Journal of Structural Engineering. Vol.117, NO.1, January, 1991.

۹- سعید صبوری قمی، «سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی مقدمه‌ای بر دیوارهای برشی فولادی» نشر انگیزه، ۱۳۸۰.

10- N.M.Newmark, W.J.Hall, "Eathquake Spectra and Design", Earthquake Engineering Research Institute, El Cerrito, Calif, 1982.

11-ATC, "Guildines for Seismic Testing of Components of Steel Structures", Applied Technology Council, Report 24, 1992.

12- ASCE/SEI 7-05," Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures", Published by the American Society of Civil Engineers, 2006.

1-Rafael Sabelli, Michel Bruneau, "Steel Plate Shear Walls ", AISC, Steel Design Guide 20, May 2007.

۲- سعید صبوری قمی، «سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی طرح اندیشه استفاده از فولاد نرم» نشر انگیزه، ۱۳۸۳.

3- M.H.K Kharrazi, "Rational Method for Analysis and Design of Steel Plate Shear Walls" Ph.D. Dissertation, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, 2005.

4-Darren Vian ,Michel Bruneau, "Testing of Special LYS Steel Plate Shear Walls", 13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C.Canada, August 1-6-2004, Paper No.978.

۵- سعید صبوری، مجید قلهکی، «بررسی رفتار دیوارهای برشی فولادی شکل‌پذیر با ورق نازک و اثر نوع اتصال تیر به ستون در آن‌ها»، رساله دکترا، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، شهریور ۱۳۸۶.

6- Y.Takahashi, T.Takeda, Y.Takemoto, M.Takagi, "Experimental Study on Thin Steel Shear Walls