

## بررسی رفتار خرابی سیستم دیوار برشی فولادی

حسین علیزاده  
محمدرضا چناقلو  
کریم عابدی

کارشناس ارشد مهندسی سازه، دانشگاه صنعتی سهند تبریز  
دانشیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز  
استاد دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی سهند تبریز

### چکیده

دیوار برشی فولادی، سیستم ابتکاری نسبتاً جدیدی برای مقاومت در برابر بارهای جانبی باد و زلزله می‌باشد که به دلیل مزایای ویژه آن در مقایسه با سایر سیستم‌های مقاوم سازه‌ای مانند قاب خمشی و دیوار برشی بتنی در برابر بارهای جانبی، مورد توجه قرار گرفته است. این سیستم در دهه‌های اخیر (از سال ۱۹۷۰) در تعدادی از ساختمان‌های بلند دنیا مخصوصاً در آمریکای شمالی و ژاپن مورد استفاده قرار گرفته است. در این مقاله رفتار خرابی دیوار برشی فولادی مورد توجه قرار گرفته است. روش به کار رفته برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار خرابی روش عناصر محدود می‌باشد. نرم‌افزار به کار رفته در انجام تحلیل‌ها، نرم‌افزار عناصر محدود ANSYS می‌باشد. جهت بررسی صحت و دقت نتایج حاصل از تحلیل، نتایج تحلیل‌ها با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی هندسی و مصالح با نتایج حاصل از آزمایشات معتبر مقایسه گردید که نتیجه بررسی حاکی از دقت مناسب و قابل اعتماد نتایج تحلیلی می‌باشد. رفتار پس کمانشی دیوار برشی فولادی، تأثیر نحوه اتصال تیر به ستون در قاب محیطی، تأثیر مدل رفتاری مصالح، تأثیر نحوه اتصال ورق فولادی به قاب محیطی و تأثیر پارامتر ضریب لاغری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: دیوار برشی فولادی، روش عناصر محدود، رفتار خرابی، رفتار پس کمانشی، بارهای جانبی.

## Investigation into the Collapse Behaviour of Shear Steel Walls

H. Alizadeh, M. R. Chenaghloou and K. Abedi

Department of Civil Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz

### Abstract

Steel shear wall is a novel system used to resist against the lateral loads of wind and earthquake. Nowadays, due to the special benefits of this innovative system, in comparison with the other lateral loading-resistant systems such as concrete shear walls and moment frames, shear steel walls are used widely in the construction practice, especially in tall buildings in North America and Japan. In the present paper, the collapse behavior of shear steel walls is studied. The finite element method has been used to investigate into the effects of various parameters on the collapse behavior of these systems. All of the analyses have been undertaken using ANSYS. In order to verify the accuracy and validity of the finite element modeling, the theoretical results, obtained from material and geometric nonlinear static analyses, have been compared with the available experimental results of steel shear walls. It has been found that the finite element model is reliable enough to be used to undertake nonlinear collapse analysis for parametric investigation. The effects of these parameters have been studied: post buckling behavior, type of connections of frames, material model, type of connection of shear steel wall to the frame, and slenderness ration of plate.

**Key words:** Shear steel wall, Finite element method, Collapse behavior, Post buckling behavior.

## ۱- مقدمه

به لحاظ عملکرد سازه‌های دیوارهای برشی فولادی در دو گروه؛ دیوار برشی تقویت شده و دیوار برشی تقویت نشده تقسیم‌بندی می‌گردند. با توجه به مقاومت بالای برشی ورق فولادی و بهره‌گیری از مقاومت پس کمانشی آن، ضخامت ورق فولادی حتی در دیوارهای برشی فولادی بلند و برای نیروهای برشی بزرگ نیز کم می‌باشد. بدین لحاظ می‌توان برای جلوگیری از کمانش ورق در ناحیه الاستیک از سخت کننده‌ها برای تقویت آن استفاده کرد. در نوع دیگر دیوار برشی فولادی، ورق، بدون استفاده از سخت کننده بکار می‌رود.

در بیشتر ساختمان‌های ساخته شده با دیوارهای برشی فولادی، برای جلوگیری از کمانش خارج از صفحه، پانل‌ها از ورق‌های فولادی ضخیم یا تقویت شده ساخته می‌شوند. این امر سبب افزایش چشمگیری در جذب انرژی بارهای چرخه‌ای می‌شود، اما هزینه استفاده از صفحات ضخیم و سخت کننده‌ها که هم بصورت طولی وهم بصورت عرضی اجرا می‌شوند تقریباً در بعضی مواقع، مانع از اجرای آن می‌باشد. ولی با توجه به اینکه مقاومت پس کمانشی ورق خیلی بیشتر از مقاومت حد کمانش همان ورق، حتی بصورت تقویت شده، می‌باشد توجه به استفاده از ظرفیت پس کمانشی صفحات فولادی زیادتر شده است. کمانش صفحه به معنای خرابی سازه نیست و اگر صفحه به اندازه کافی تکیه گاه مرزی داشته باشد، نیروهای پس کمانشی، چندین برابر نیروی حد کمانش آن خواهد بود.

زمانی که ضخامت پانل نسبت به ابعاد دیگر آن کم باشد و یا اصطلاحاً پانل لاغر باشد، کمانش در بارهای خیلی پایین اتفاق می‌افتد. در نقطه کمانش، مکانیزم بار-مقاومت از برش داخل صفحه به میدان کششی مورب تبدیل می‌شود، بنابراین مقاومت پانل با عمل میدان کششی کنترل می‌شود. از این رو وقتی که دیوار برشی در معرض بارهای جانبی قرار می‌گیرد، برش موجود توسط میدان کششی قطری که در تراز پانل‌ها ایجاد می‌شود، تحمل می‌گردد. مقاومت برشی این اجزا امکان انتقال بارها بصورت دو نیروی کوپل فشاری و کششی به ستون‌ها و متعاقباً به پی‌ها را فراهم می‌آورد. بدیهی است اگر تیرها و ستون‌های محیطی سخت تر باشند مقاومت پس کمانشی دیوار برشی فولادی به مراتب بیشتر از دیوار با تیر و ستون‌های انعطاف پذیر خواهد بود [۱۱]. بطور کلی در سیستم دیوار برشی فولادی تقویت شده هدف، جلوگیری از کمانش صفحه تا جاری شدن آن در

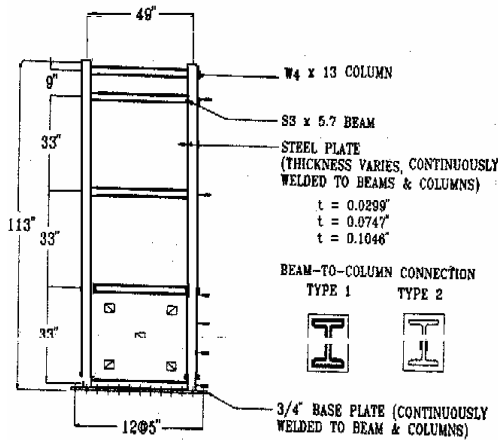
برش می‌باشد. ولی در سیستم دیوار برشی فولادی تقویت نشده، کمانش صفحه حتی در بارهای کم نیز مجاز بوده و هدف، استفاده از عمل میدان کششی قطری می‌باشد [۳]. استفاده از دیوارهای برشی تقویت شده با ضخامت بالا به خاطر مقاومت پس کمانشی بالای این گونه صفحات باعث کمانش ستون‌ها و در نتیجه انهدام کل سازه، قبل از خرابی دیوار برشی می‌گردد و حال آنکه در دیوارهای تقویت نشده با صفحات نازک، کنترل خرابی سازه توسط تشکیل میدان کششی قطری و خرابی دیوار برشی صورت می‌گیرد نه ستون‌ها [۱۱]. ولی در انتخاب سیستم تقویت شده و سیستم تقویت نشده، طراح می‌تواند با توجه به نکات رفتاری در برابر بارهای لرزه‌ای و ملاحظات معماری، اقتصادی، امکان ساخت در کارخانه و حمل و نقل، تصمیم‌گیری نماید [۳]. در مطالعه حاضر برای بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر رفتار خرابی و مطالعه رفتار پس کمانشی دیوار برشی فولادی، به دلیل دقت مناسب نتایج تحلیلی عناصر محدود و امکان بررسی پارامترهای مختلف در طی یک تحلیل و اقتصادی بودن آن، به عنوان مثال مطالعه گام به گام کمانش و رفتار پس کمانشی دیوار و امکان تحلیل تعداد زیادی از نمونه‌ها از روش عناصر محدود بهره‌گرفته شده است. نرم‌افزار عناصر محدود ANSYS به لحاظ قابلیت‌های بالا در دارا بودن عنصرهای مورد نیاز برای مدل کردن دیوار برشی فولادی و نیز امکان اعمال رفتار غیر خطی هندسی و مصالح، تغییر شکل‌های بزرگ همچون کمانش ورق فولادی، جاری شدن مقاطع تیر و ستون به خوبی جوابگوی نیاز ما می‌باشد.

## ۲- مدل‌سازی عناصر محدود دیوار برشی فولادی

از نرم‌افزار عناصر محدود ANSYS با قابلیت تحلیل‌های غیرخطی هندسی و مصالح و مطالعه کمانش و رفتار پس کمانشی ورق فولادی استفاده شده است. عنصرهای مورد استفاده در مدل‌سازی عناصر محدود ANSYS مقاطع مختلف به قرار زیر می‌باشد:

۱- عنصر اجزاء قاب: برای مدل‌سازی قاب محیطی فولادی پانل، از عنصر BEAM188 و BEAM189 استفاده گردید. دلیل عمده استفاده از این عنصر بجای عنصر تیر سه‌بعدی عمومی توصیه ANSYS برای تحلیل‌های غیرخطی و تغییر شکل‌های بزرگ می‌باشد. این عنصر برای تیر و ستون‌های لاغر و متوسط در سازه

عناصر محدود به همراه نتایج آزمایش بصورت نمودار بار تغییر مکان تراز بام در شکل (۲) آورده شده است.



شکل ۱- نمای کلی و جزئیات هندسی نمونه آزمایشگاهی Caccese و Elgaaly

در شکل مزبور همچنین نتایج تحلیلی که توسط Caccese و Elgaaly (تحلیل غیرخطی و مصالح)، برای بررسی نمونه آزمایشگاهی انجام گرفته بود، نیز آمده است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیل نشان می‌دهد که سختی اولیه مدل عناصر محدود بیشتر از سختی اولیه نمونه آزمایشگاهی است ولی مقدار بار حد تسلیم برای نمونه آزمایشگاهی و مدل تحلیل عناصر محدود با ANSYS دارای اختلاف اندکی می‌باشد. یک نکته قابل توجه در ارتباط با تحلیل این نمونه این است که مشابه نتیجه آزمایش، مقاومت سیستم با خرابی ستون کنترل می‌شود، به عبارت دیگر رفتار سیستم با جاری شدن ستون در محل اتصال به صفحه ستون، کنترل می‌گردد. شکل‌های (۳) و (۴) کماتش ستون جاری شده در آزمایش و تحلیل عناصر محدود را نشان می‌دهند. یک نکته قابل توجه در ارتباط با تحلیل این نمونه این است که مشابه نتیجه آزمایش، مقاومت سیستم با خرابی ستون کنترل می‌شود، به عبارت دیگر رفتار سیستم با جاری شدن ستون در محل اتصال به صفحه ستون، کنترل می‌گردد [۱۲].

بکار می‌رود و بر اساس تئوری تیر تیموشینکو می‌باشد که اثرات تغییر شکل برشی در آن لحاظ گردیده است [۵].

۲- عنصر اتصال: برای مدل‌سازی اتصالات مفصلی تیر و ستون از عنصر COMBIN7 استفاده گردیده است. این عنصر برای اتصال دو یا چند مدل در یک نقطه به کار می‌رود و قابلیت اعمال سختی، میرایی و اصطکاک را دارا می‌باشد. مهمترین مشخصه این عنصر قابلیت کاربرد برای تغییر شکل‌های بزرگ می‌باشد [۵].

۳- عنصر پوسته فولادی: برای مدل‌سازی پانل دیوار برشی از عنصر SHELL 181 استفاده گردید. مهمترین دلایل برای انتخاب این عنصر به قرار زیر می‌باشد:

- مناسب بودن این عنصر برای ورق‌های متوسط و ضخیم
- همگرایی قابل توجه نسبت به عنصر پوسته عمومی (SHELL 43)

• مناسب بودن این عنصر برای تحلیل‌های غیرخطی و تغییر شکل‌های بزرگ مانند کمانش ورق [۵].

از آنجایی که نتایج حاصل از روش‌های ریاضی (عناصر محدود)، باید با استفاده از نتایج آزمایشگاهی تأیید گردند، لذا از ۳ نمونه مختلف (در این مقاله به دو نمونه اشاره شده است) برای تصدیق نتایج حاصل از روش عناصر محدود استفاده نمودیم. نمونه اول قاب سه طبقه‌ای را شامل می‌شد که توسط Caccese و Elgaaly آزمایش شده و مشخصات کامل و نتایج آن در دسترس بود. قاب چهار طبقه آزمایش شده توسط Driver و همکارش با داشتن اطلاعات لازم و گزارش نتایج آن به عنوان نمونه دوم اختیار و با روش انتخابی عناصر محدود مدل‌سازی گردید. بررسی‌های کلی نتایج درمدل‌های مختلف نشان داد با توجه به خطاهای آزمایشگاهی و میزان دقت وسایل اندازه‌گیری، مدل‌سازی عناصر محدود از دقت مناسبی برخوردار است. در نتیجه یک مدل عناصر محدود حاصل گردید که با استفاده از آن می‌توان مطالعه پارامتریک خود را بر روی رفتار خرابی دیوار برشی فولادی انجام داد.

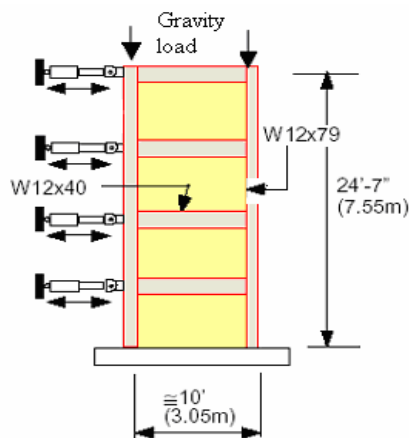
## ۲-۱- مدل شماره ۱

این مدل بر اساس نمونه مورد آزمایش Caccese و Elgaaly می‌باشد. نمونه قاب سه طبقه یک دهنه‌ای را شامل می‌شود که در تراز بام، تحت بارگذاری جانبی قرار گرفته است [۳]. شکل (۱) نمای کلی نمونه مورد تحلیل را نمایش می‌دهد. نتایج تحلیل

بنابراین با توجه به انعکاس رفتار صحیح نمونه آزمایشگاهی، شامل شکل پس کمانشی ورق که در شکل (۴) ارائه شده است و نحوه خرابی سیستم و کنترل آن با جاری شدن ستون، نتایج تحلیل قابل قبول می‌باشد و عمده اختلاف موجود در سختی اولیه، به عدم آگاهی از سختی سیستم مهاربند، تغییر مکان خارج از صفحه قاب و ناکاملی در نمونه آزمایشگاهی مربوط می‌گردد.

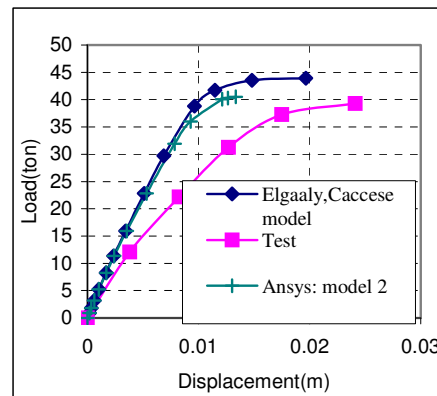
### ۲-۲- مدل شماره ۲

مدل دوم، بر اساس نمونه آزمایشگاهی Kulak و Driver و همکارانشان (۱۹۹۷) می‌باشد. این مدل قاب ۴ طبقه یک دهنه‌ای در مقیاس ۵۰٪ ابعاد واقعی را شامل می‌شود که تحت بارگذاری قائم و جانبی قرار گرفته است. مشخصات هندسی، سطح مقطع تیر و ستون‌ها و ضخامت ورق در پانل‌های مختلف در شکل (۵) نشان داده شده است. در تراز بام، بار قائم به میزان ۷۳/۴۲ تن با خروج از مرکزیتی برابر ۲۰۹/۶۳ میلی‌متر اعمال گردیده است. در تراز طبقات، بار جانبی یکسان معادل ۸۱/۵۸ تن در نظر گرفته شده است [۳].

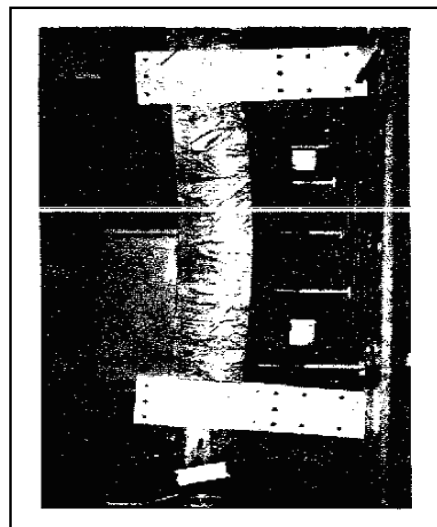


شکل ۵- مشخصات هندسی و فیزیکی نمونه آزمایشگاهی Driver و Kulak

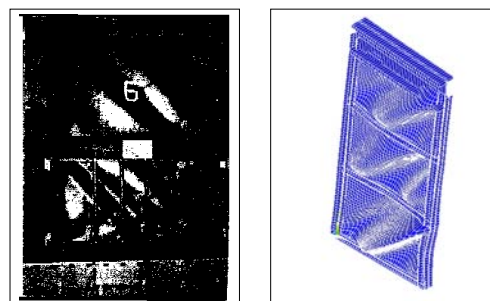
یک تحلیل غیر خطی هندسی و مصالح بر روی این نمونه انجام گرفت که نتایج آن بصورت نمودار بار تغییر مکان افقی برای تراز طبقه همکف در شکل (۶) آورده شده است. همچنین نتیجه آزمایش به همراه پاسخ تحلیل عناصر محدود صورت گرفته توسط Driver، Kulak و همکارانشان [۳]، در شکل (۶) آمده



شکل ۲- مقایسه نتایج آزمایش، تحلیل عناصر محدود و تحلیل Elgaaly و Caccese

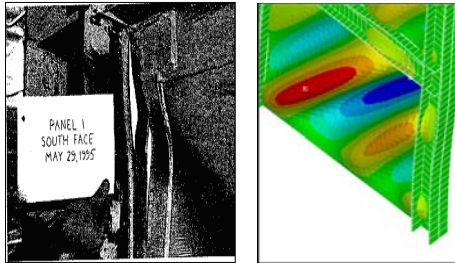


شکل ۳- کمانش ستون در تراز تغییر مکان نهایی در نمونه آزمایشگاهی Elgaaly و Caccese

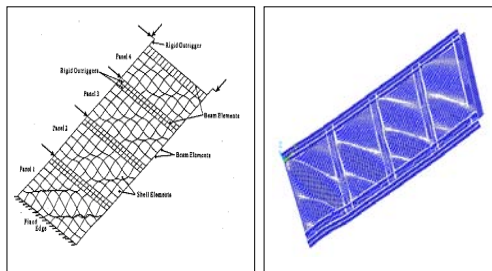


شکل ۴- حالت تغییر شکل نهایی مدل عناصر محدود

است [۵]. بررسی‌های کلی نتایج در مدل‌های مختلف نشان داد با توجه به خطاهای آزمایشگاهی و میزان دقت وسایل اندازه‌گیری، مدل‌سازی عناصر محدود از دقت مناسبی برخوردار است.



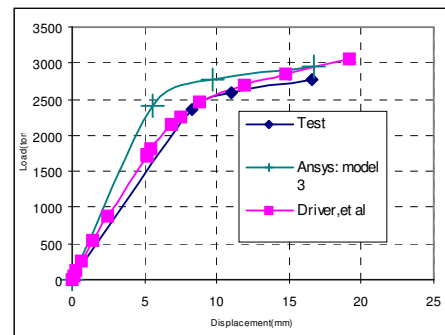
شکل ۸- مقایسه نحوه خرابی و محل آن در نمونه آزمایشگاهی Driver و Kulak [۳]



شکل ۹- مقایسه تغییر شکل نهایی مدل عناصر محدود ANSYS و مدل عناصر محدود ABAQUS انجام یافته توسط Driver [۶]

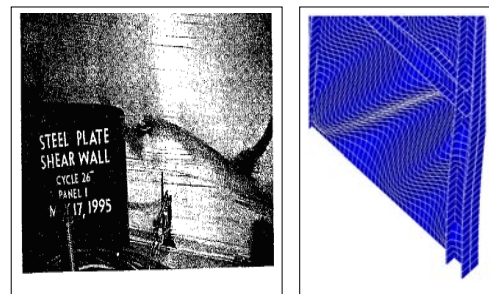
بنابراین یک مدل‌سازی عناصر محدود حاصل گردیده است که با استفاده از آن می‌توانیم مطالعه پارامتریک خود را بر روی رفتار خرابی دیوار برشی فولادی انجام دهیم. با توجه به بررسی‌های صورت گرفته و مقایسه نتایج مدل عناصر محدود و نتایج تجربی (نمونه‌های آزمایشگاهی و تئوریک) و تصدیق نتایج روش عناصر محدود، برآنیم که با انتخاب یک نمونه تحلیلی و مدل‌سازی آن با المان‌ها و شرایط تأیید شده، به بررسی رفتار دیوار برشی فولادی بپردازیم. بر این اساس با توجه به اندازه‌های معمول در ساختمان‌ها و نیز معیار طراحی براساس رفتار شکست نرم، نمونه تحلیلی به صورت زیر انتخاب گردید. شکل (۱۰)، ابعاد و مشخصات مقطع اجزا قاب و نحوه اتصالات آن را نشان می‌دهد.

است. مقایسه نتایج آزمایشگاهی و تحلیل عناصر محدود نشان می‌دهد که سختی نمونه آزمایشگاهی و مدل عناصر محدود (ANSYS) اختلاف اندکی دارند. ولی همانند مدل قبلی، نحوه خرابی مدل تحلیلی عناصر محدود، دقیقاً مشابه نمونه آزمایشگاهی می‌باشد و خرابی سیستم با جاری شدن پای ستون و گسیختگی در محل اتصال ورق به ستون در طبقه همکف کنترل می‌گردد.



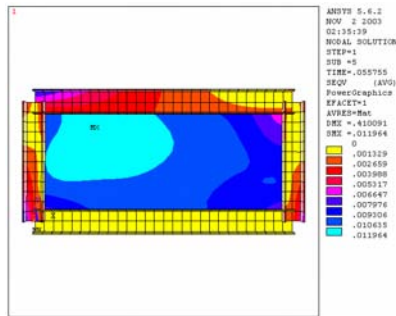
شکل ۶- مقایسه نتایج تحلیل و آزمایش نمونه آزمایشگاهی Driver و Kulak

در شکل‌های (۷، ۸ و ۹) نحوه خرابی نمونه آزمایشگاهی و مدل تحلیلی مقایسه شده است.

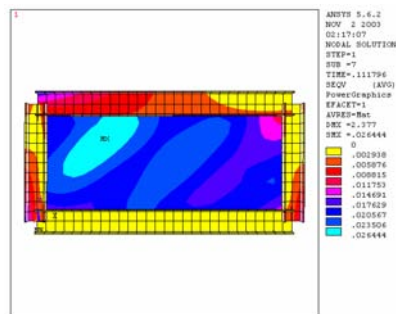


شکل ۷- مقایسه نحوه خرابی و محل آن در نمونه آزمایشگاهی Driver و Kulak [۳]

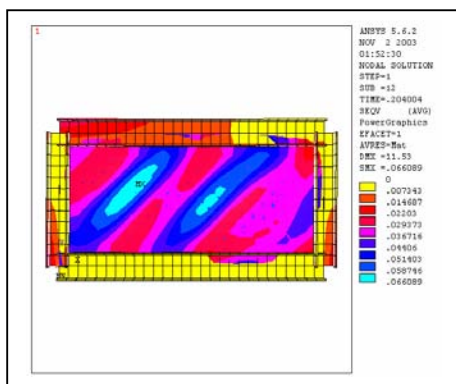
همچنانکه در شکل (۹) نیز دیده می‌شود که کماتش‌های بوجود آمده در پانل‌ها، جهت و تعداد آنها با آنچه که در مدل عناصر محدود Driver ارائه شده است، یکسان می‌باشد. از طرفی نتایج مدل مذکور، با نتیجه آزمایش سازگاری کامل داشته



شکل ۱۲- (الف) کانتور تنش در دیوار برشی فولادی قبل از کمانش ورق



شکل ۱۲- (ب) کانتور تنش در دیوار برشی فولادی در نزدیکی کمانش



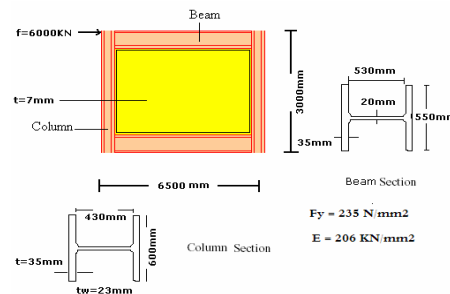
شکل ۱۲- (پ) کانتور تنش بعد از کمانش ورق

با بررسی تراز بار ۲۲۲ کیلو نیوتن مشخص گردید در این تراز بار کمانش قابل ملاحظه‌ای در ورق اتفاق می‌افتد و کاهش سختی اتفاق افتاده در منحنی بار- تغییر مکان، به دلیل کمانش ورق

### ۳- رفتار خرابی سیستم دیوار برشی فولادی

در این مقاله، رفتار خرابی سیستم دیوار برشی فولادی با استفاده از ورق نازک و بدون بکارگیری سخت کننده مورد مطالعه قرار گرفته است. در بررسی رفتار خرابی این سیستم پارامترهای زیر مورد توجه قرار گرفته است:

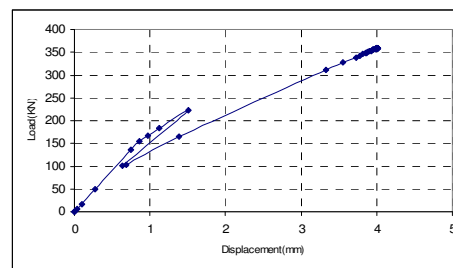
- بررسی رفتار پس کمانشی دیوار برشی فولادی
- تأثیر نحوه اتصال تیر به ستون در قاب محیطی
- تأثیر مدل رفتاری مصالح
- تأثیر نحوه اتصال ورق فولادی به قاب محیطی
- تأثیر نسبت عرض ورق فولادی به ضخامت آن



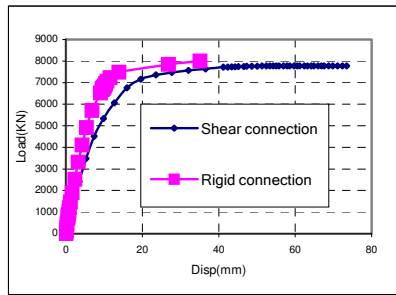
شکل ۱۰- مدل عناصر محدود نمونه‌های تحلیلی

### ۳-۱- بررسی رفتار پس کمانشی دیوار برشی فولادی

برای بررسی چگونگی رفتار سیستم در برابر بارهای جانبی پس از وقوع کمانش به بررسی رفتار پس کمانشی سیستم دیوار برشی فولادی پرداختیم. در این راستا با توجه به کمانش ورق و امکان پرش در منحنی بار- تغییر مکان سیستم، تحلیل عناصر محدود را با کنترل تغییر مکان و با استفاده از روش طول کمان انجام دادیم (Riks Method). شکل (۱۱) نمودار بار تغییر مکان نمونه تحلیلی (شکل ۱۰) را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودار ملاحظه می‌گردد، به ازای بار جانبی معادل (۲۲۲ KN) پرشی در منحنی بار- تغییر مکان اتفاق می‌افتد.



شکل ۱۱- منحنی بار تغییر مکان نمونه تحلیلی (شکل ۱۰)



شکل ۱۴- مقایسه منحنی بار- تغییر مکان نمونه‌های با اتصال مفصلی و گیردار تیر به ستون

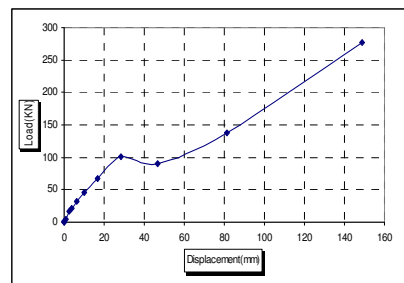
همان‌گونه که در شکل نیز مشاهده می‌گردد، اتصال تیر به ستون تأثیر اندکی بر سختی اولیه و مخصوصاً تأثیر کمتری بر مقاومت نهایی سیستم دارد و با توجه به اینکه برش طبقه، عمدتاً توسط پانل برشی تحمل می‌شود اتصال تیر به ستون بر خلاف قاب‌های خمشی مهار نشده، نیاز به گیردار بودن کامل ندارد. علت این امر را می‌توان در گستردگی اتصال صفحه به قاب محیطی جست، به گونه‌ای که اگرچه اتصال تیر به ستون مفصلی می‌باشد، ولی به دلیل پیوستگی اتصال ورق به قاب، مشابه اتصال صلب خواهد بود.

یک نکته قابل توجه در مقایسه دو نمونه، شکل‌پذیری بیشتر نمونه دارای اتصال مفصلی می‌باشد. بطوری که برای نمونه با اتصال مفصلی تیر به ستون شکل‌پذیری حدود ۱۰ به دست آمد، در حالی که برای نمونه مشابه با اتصال گیردار شکل‌پذیری ۸ به دست آمد. همچنین از بررسی کانتور تنش در هر دو نمونه ملاحظه می‌گردد که در نمونه دارای اتصال مفصلی تیر به ستون، سطح جاری شده عناصر قاب به مراتب بیشتر از نوع گیردار می‌باشد، ولی سطح جاری شده ورق فولادی در نمونه دارای اتصال گیردار بیشتر می‌باشد. ولی در کل، رفتار سیستم دیوار برشی فولادی، با هر دو نوع اتصال تیر به ستون، تقریباً یکسان بوده و به جز اختلاف در سختی اولیه، سایر پارامترهای سازه‌ای در دو نوع اتصال مشابه می‌باشند (شکل‌های ۱۵ و ۱۶).

### ۳-۳- تأثیر نحوه مدل رفتاری مصالح بر روی رفتار سیستم دیوار برشی فولادی

برای بررسی تأثیر مدل رفتاری مصالح بر روی رفتار سیستم، دو نمونه با مدل رفتاری متفاوت مورد تحلیل قرار گرفت؛ در

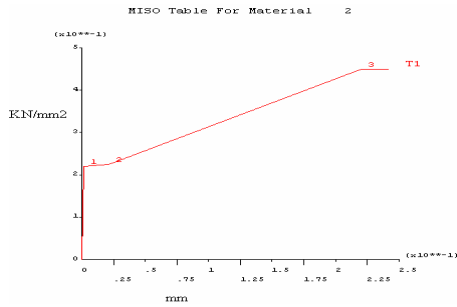
می‌باشد. بعد از این مرحله با تشکیل میدان کششی قطری در ورق مجدداً منحنی بار- تغییر مکان حالت صعودی پیدا می‌کند. شکل‌های (۱۲- الف)، (۱۲- ب) و (۱۲- پ) مراحل کمانش ورق و تشکیل میدان کششی قطری در آن را نشان می‌دهد. تحلیل دوم بر روی نمونه آزمایشی سه طبقه Caccese و Elgaaly انجام گرفت [۳]. شکل (۱۳) نمودار بار- تغییر مکان پانل طبقه اول نمونه مورد نظر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل (۱۳) نیز دیده می‌شود، در این نمونه نیز پدیده Snap-through هنگام کمانش ورق فولادی اتفاق می‌افتد و در لحظه کمانش قطر فشاری، تا رسیدن به نقطه تعادل بعدی که آن، با تبدیل عمل مقاومت سیستم به عمل میدان کششی قطری بوجود می‌آید، در نمودار بار- تغییر مکان پرش اتفاق می‌افتد. این بدان معنی است که در این سیستم کمانش ورق، به منزله ناپایداری سیستم تلقی نمی‌گردد و نقطه کاهش مقاومت و سختی نمی‌باشد و در نقطه کمانش با افزایش بار، سیستم با تغییر شکل هندسی به نقطه تعادل جدیدی می‌رسد و در حین این تغییر شکل، رفتار سیستم از برش داخل صفحه به میدان کشش قطری تبدیل می‌شود.



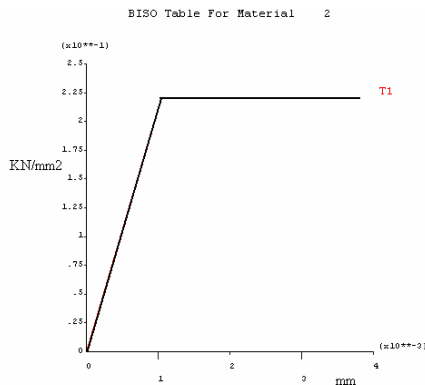
شکل ۱۳- نمودار بار- تغییر مکان نمونه سه طبقه Caccese و Elgaaly

### ۳-۲- بررسی تأثیر نحوه اتصال تیر به ستون بر رفتار خرابی دیوار برشی فولادی

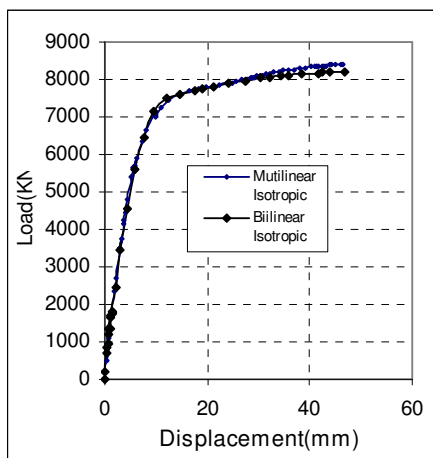
برای بررسی اهمیت اتصال تیر به ستون در سیستم دیوار برشی فولادی، نمونه‌ای با اتصال مفصلی تیر به ستون تحلیل شده و با اتصال گیردار، مقایسه گردیده است. برای ایجاد اتصال مفصلی تیر به ستون از عنصر 7 COMBIN استفاده گردید. شکل (۱۴) نتیجه تحلیل دو نمونه را بصورت نمودار بار- تغییر مکان نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- نمودار تنش - کرنش مصالح فولادی نمونه‌های تحلیلی

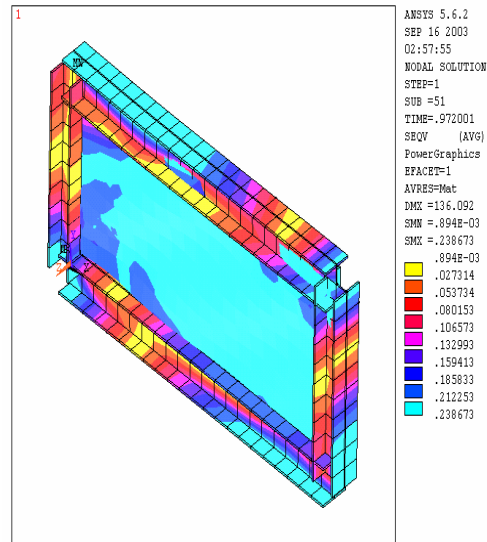


شکل ۱۸- نمودار تنش - کرنش مصالح فولادی نمونه‌های تحلیلی

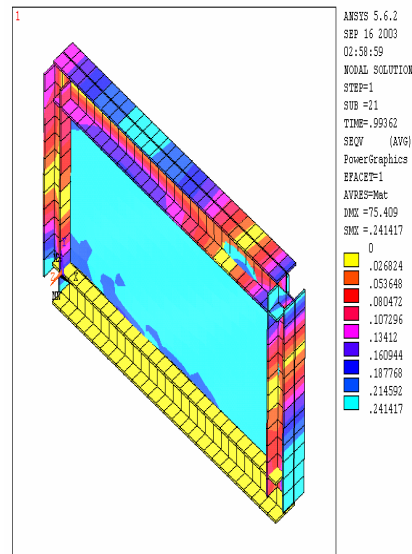


شکل ۱۹- تأثیر سخت‌شدگی کرنشی مصالح فولادی بر روی رفتار دیوار برشی فولادی

نمونه دوم، اثر سخت شدگی کرنشی مصالح فولادی منظور شده است. ولی در نمونه اول رفتار مصالح بصورت الاستوپلاستیک منظور شده است. مشخصات فیزیکی نمونه‌ها بر اساس ASTM A36 می‌باشد. در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) نمودار تنش کرنش نمونه‌ها آورده شده است.



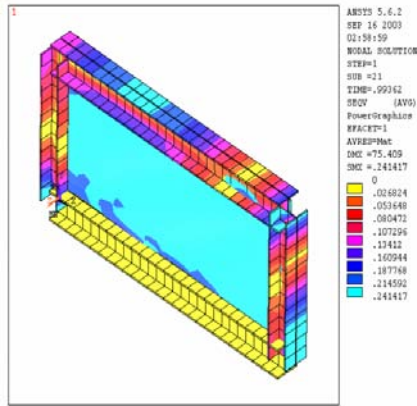
شکل ۱۵- کانتور تنش در نمونه با اتصال مفصلی تیر به ستون



شکل ۱۶- کانتور تنش در نمونه با اتصال گیردار تیر به ستون



مفصلی بیشتر می‌باشد ولی در اتصال گیردار تقریباً تمام سطح ورق بدون جاری شدن اجزاء قاب جاری شده است.

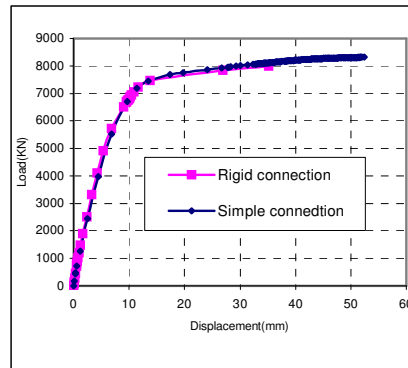
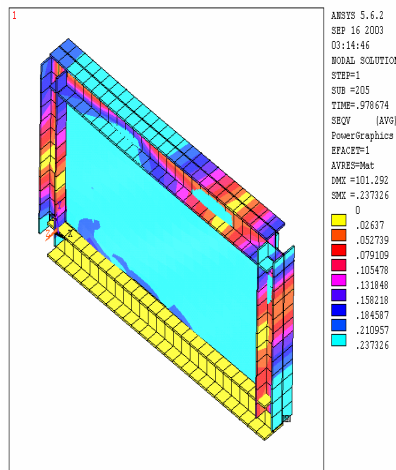


نتیجه تحلیل‌ها در شکل (۱۹) ارائه شده است. تأثیر اعمال سخت‌شدگی کرنشی، در نمودار مربوطه مشاهده می‌گردد. همان طوری که ملاحظه می‌شود، بعد از حد تسلیم و کاهش شدید در سختی اولیه، در نمونه‌ای که سخت‌شدگی کرنشی در رفتار مصالح آن اعمال شده است، با افزایش بار، مجدداً سختی سازه، افزایش می‌یابد.

۴-۳- تأثیر نحوه اتصال ورق فولادی به قاب محیطی

در یک بررسی دیگر دو مدل با اتصال مفصلی و گیردار ورق فولادی به قاب محیطی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل (۲۰) نمودار بار- تغییر مکان هر دو نمونه آورده شده است. برای ایجاد اتصال مفصلی تیر و ستون مجاور با ورق فولادی از عنصر COMBIN 7 استفاده گردید.

شکل ۲۱- کانتور تنش در نمونه با اتصال گیردار ورق به قاب



شکل ۲۰- تأثیر نحوه اتصال ورق فولادی به قاب محیطی بر روی رفتار سیستم

شکل ۲۲- کانتور تنش در نمونه با اتصال مفصلی ورق به قاب

همانگونه که در شکل ملاحظه می‌گردد، سختی اولیه نمونه با اتصال گیردار، بیشتر از نمونه مشابه با اتصال مفصلی می‌باشد. همچنین شکل‌پذیری سیستم با اتصال مفصلی به مراتب بیشتر از نوع گیردار می‌باشد (شکل‌پذیری نمونه با اتصال مفصلی حدود ۱۰ می‌باشد، در حالی که شکل‌پذیری نمونه با اتصال گیردار حدود ۸ می‌باشد). همچنین در اتصال مفصلی ورق فولادی به قاب محیطی سطح جاری شده اجزاء قاب بیشتر از اتصال گیردار می‌باشد. همانگونه که در شکل‌های (۲۱) و (۲۲) نیز مشخص می‌باشد، سطح جاری شده اجزاء قاب در نمونه

۵-۳- تأثیر نسبت عرض ورق فولادی به ضخامت آن،

برروی رفتار خرابی سیستم دیوار برشی فولادی

کمانش ورق متأثر از نسبت عرض ورق فولادی به ضخامت آن می‌باشد [۱۲]. برای تعیین تأثیر ضریب لاغری، بر روی رفتار سیستم دیوار برشی فولادی، به ازای مقادیر مختلف  $\frac{h}{t}$  تحلیل‌های غیر خطی هندسی و مصالح برروی نمونه کالیبره شده انجام دادیم. بر این اساس ۲۳ نمونه تحلیلی با نسبت  $\frac{h}{t}$  مختلف

را، مورد بررسی قرار دادیم و مقادیر تنش بحرانی و تنش حد تسلیم را برای هر یک بدست آوردیم. نتایج این تحلیل‌ها در شکل (۲۳) بصورت نمودار ارائه شده است. مقایسه این شکل، با مندرجات AISC 1999، که برای تیر ورق‌ها ارائه شده است، با در نظر گرفتن نقاط شاخص  $1.10 \sqrt{\frac{k_y E}{F_{yw}}}$  و  $1.37 \sqrt{\frac{k_y E}{F_{yw}}}$  که به ترتیب  $\lambda_p$  و  $\lambda_r$  نامیده می‌شوند، و نسبت  $\frac{V}{V_y}$ ، نشان می‌دهد مطالب و روابط حاکم بر تیر ورق‌ها در مورد دیوار برشی فولادی نیز صادق می‌باشد.

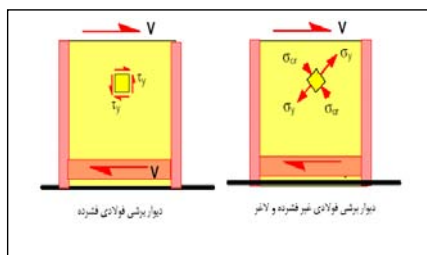
بر مبنای نتایج تحلیل‌ها سیستم دیوار برشی فولادی براساس لاغری، قابل تفکیک به سه قسمت دیوار برشی فولادی فشرده، غیرفشرده و لاغر می‌باشد. شکل (۲۴)، نحوه عملکرد دیوار برشی فولادی به ازای ضرایب لاغری مختلف را نشان می‌دهد [۴]:

### ۲- دیوار برشی غیر فشرده

در این قسمت که ضریب لاغری ما بین  $\lambda_p$  و  $\lambda_r$  متغیر است، بعد از تسلیم شدن قسمتی از ورق، در آن کمناش اتفاق می‌افتد.

### ۳- دیوار برشی لاغر

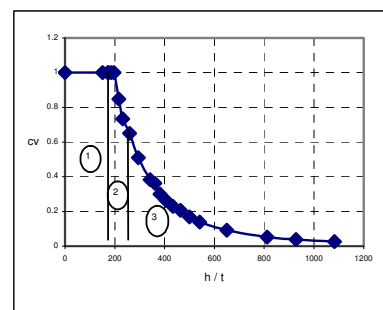
به ازای ضرایب لاغری بیشتر از  $\lambda_r$  دیوار برشی فولادی لاغر نامیده می‌شود. رفتار نمونه‌ها در این حالت تفاوت اساسی با سایر حالات داشت. در این ناحیه به ازای مقادیر اندک بار جانبی، ورق کمناش کرده و عمده ظرفیت برشی سیستم با عمل میدان کششی ورق فولادی تأمین می‌گردد. در این قسمت، خرابی با جاری شدن ورق شروع می‌شود (شکست نرم) و با افزایش بار با جاری شدن قسمت قابل ملاحظه‌ای از ورق، از ظرفیت آن، حداکثر استفاده بعمل می‌آید. در شکل (۲۷)، تغییر مکان حد تسلیم یک نمونه لاغر با تغییر مکان نهایی آن مقایسه شده است. برای این نمونه شکل‌پذیری، برابر ۷ بدست آمد. نمودار شکل (۲۸)، تأثیر ضخامت ورق فولادی بر روی مقاومت نهایی را نشان می‌دهد. براساس بررسی انجام شده ضریب همبستگی در داده‌های نمودار شکل (۲۸)،  $0.988$  می‌باشد.



شکل ۲۴- نحوه عملکرد دیوار برشی فولادی به ازای ضرایب لاغری مختلف

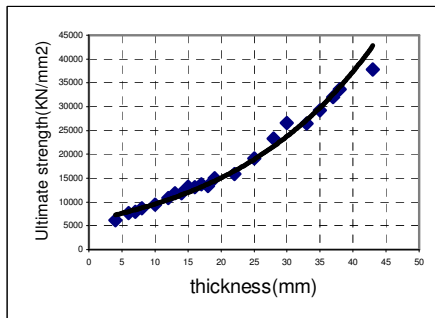
۱- دیوار برشی فشرده

به ازای مقادیر ضریب لاغری کمتر از  $\lambda_p$  که میزان آن بر اساس AISC (1999)،  $1.10 \sqrt{\frac{k_y E}{F_{yw}}}$  می‌باشد، دیوار برشی فولادی در زمره دیوار برشی فشرده قرار می‌گیرد. در این حالت خرابی سیستم دیوار برشی فولادی با تشکیل مفصل پلاستیک در ستون‌ها شروع می‌شود و قبل از وقوع کمناش، ورق جاری می‌گردد.

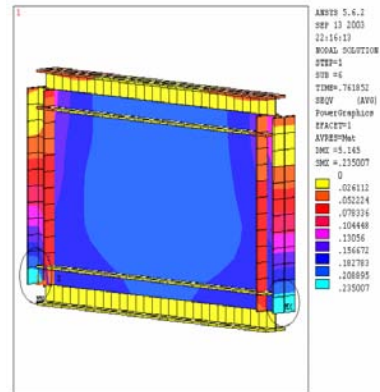


شکل ۲۳- رابطه ضریب لاغری با نسبت تنش برشی حد کمناش به تنش برشی حد جاری شدن  $C_V$

همان‌گونه که در شکل (۲۵) نیز دیده می‌شود درحالی که تنش در قسمت عمده‌ای از ورق هنوز دارای مقدار اندکی می‌باشد، در ستون‌ها مفصل پلاستیک ایجاد شده و نمونه خراب می‌شود

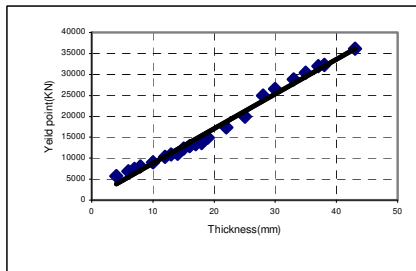


شکل ۲۸- رابطه ضخامت ورق فولادی با بار نهایی سیستم

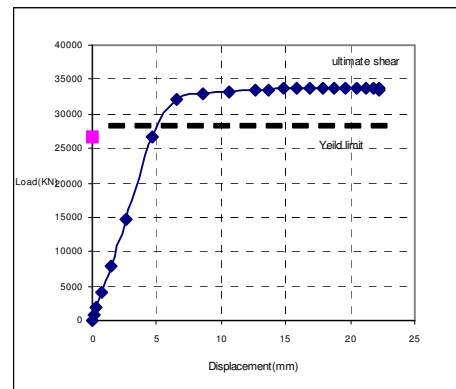


شکل ۲۵- ایجاد مفصل پلاستیک در ستونها قبل از کمانش ورق

همچنین شکل (۲۹)، تأثیر افزایش ضخامت ورق فولادی بر روی بار حدی سیستم را نشان می‌دهد. بر اساس بررسی انجام شده، ضریب همبستگی در این مورد برابر ۰/۹۹۳ می‌باشد.



شکل ۲۹- تأثیر ضخامت ورق فولادی بر روی بار حد تسلیم سیستم

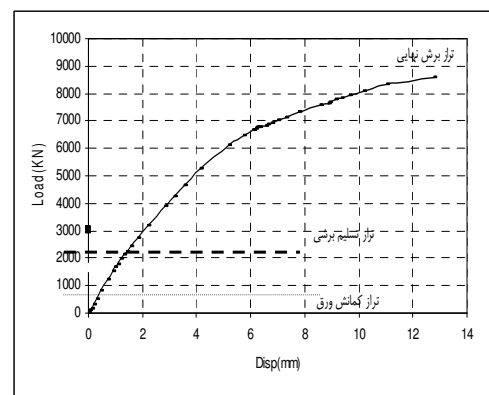


شکل ۲۶- تغییر مکان حد تسلیم در مقایسه با تغییر مکان نهایی

همانطوری که ملاحظه می‌شود با افزایش ضخامت ورق فولادی در نمونه‌های تحلیل شده، بار حد تسلیم سیستم بصورت خطی افزایش می‌یابد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

برای بررسی رفتار خرابی دیوار برشی فولادی با استفاده از ورق نازک، اصولاً بایستی آزمایشات بارگذاری یکنواخت یا چرخه‌ای بر روی آن انجام می‌گرفت، ولی با توجه به پرهزینه بودن و زمان بر بودن انجام چنین آزمایشاتی و با توجه به کثرت پارامترهای مورد بررسی، از روش عناصر محدود استفاده کردیم. بطوری که برای بدست آوردن رفتار و مطالعه رفتار خرابی سیستم دیوار برشی فولادی، تحلیل‌های غیرخطی هندسی و



شکل ۲۷- مقایسه تنش حد کمانش، حد تسلیم و مقاومت نهایی دیوار برشی لاغر

## مراجع

- مصلح بر روی مدل‌هایی که قبلاً ایجاد کرده و صحت مدل‌سازی و نتایج آنها بررسی شده بود، انجام گرفتند. نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده در این فصل عبارتند از:
- با توجه به تحلیلی که با روش کنترل تغییر مکان انجام شد، مشخص گردید گرچه ورق فولادی بعد از رسیدن به بار حدی کمانش می‌نماید ولی این موضوع به معنی ناپایداری سیستم نمی‌باشد و با کمانش قطر فشاری دیوار برشی فولادی، تا رسیدن به نقطه تعادل بعدی و تغییر نحوه رفتار سیستم از برش داخل صفحه به میدان کششی قطری، پدیده Snap - Through در منحنی بار- تغییر مکان بوجود می‌آید و بعد از نقطه حد کمانش که در آن سختی سیستم بطور آنی کاهش می‌یابد، با افزایش بار و تشکیل میدان کشش قطری سختی سیستم افزایش می‌یابد.
  - تغییر نحوه اتصال تیر به ستون، تأثیر چندانی در رفتار خرابی سیستم دیوار برشی فولادی نداشت. سختی و مقاومت نهایی دیوار با اتصال گیردار، اندکی بیشتر از دیوار با اتصال مفصلی بود.
  - نحوه مدل رفتاری مصالح فولادی تأثیر چندانی بر رفتار خرابی نداشت و با فرض مدل رفتاری با سخت‌شدگی کرنشی سختی ثانویه افزایش یافت.
  - نحوه اتصال ورق به اجزا قاب مجاور تأثیر چندانی بر نحوه خرابی سیستم دیوار برشی فولادی نداشت.
  - به ازای مقادیر مختلف ضریب لاغری نحوه خرابی سیستم به شدت تغییر می‌کند. بطوری که به ازای مقادیر ضریب لاغری کمتر از  $1.10 \sqrt{\frac{k_v E}{F_{yw}}}$  خرابی سیستم با تشکیل مفصل پلاستیک در ستون‌ها شروع می‌شود (شکست ترد). در این ناحیه بار حد تسلیم در نمونه‌های تحلیلی حدود ۸۰٪ بار نهایی می‌باشد. به عبارت دیگر با شروع تسلیم در نمونه‌ها سیستم ناپایدار می‌شود ولی به ازای مقادیر لاغری بیشتر از  $1.37 \sqrt{\frac{k_v E}{F_{yw}}}$ ، خرابی سیستم با جاری شدن ورق شروع شده (شکست نرم) و با تشکیل مفصل پلاستیک در ستون‌ها سیستم ناپایدار می‌گردد. در این نمونه‌ها بار حد تسلیم نمونه‌ها حدود ۲۵٪ بار نهایی سیستم می‌باشد. به عبارت دیگر علی‌رغم جاری شدن قسمت عمده‌ای از دیوار سیستم همچنان به تحمل بار ادامه می‌دهد (در عبارات فوق  $K_v$ ، ضریب کمانش ورق،  $E$ ، مدول ارتجاعی و  $F_{yw}$ ، مقاومت حد تسلیم دیوار برشی فولادی می‌باشد).
- [۱] سعید صبوری، "سیستم‌های مقاوم در برابر بارهای جانبی مقدمه‌ای بر دیوارهای برشی فولادی".
- [2] Robert G. Driver, Member, ASCE, Geoffrey L. Kulak, Fellow, ASCE, D. J. Laurie Kennedy, Fellow, ASCE, and Alaa E. Elwi, Member, Asce "Cyclic Test of Four-Story Steel Plate Shear Wall", Journal of structurak Eng, vol. 124, no 2, feb, 1998.
- [3] Abolhassan Staneh-Asl, "Seismic Behavior and Design of steel shear walls" Steel Tips Report, Jan, 2001.
- [4] Robert G. Driver, Geoffrey L. Kulak, Alaa E. Elwi, D. J. Laurie Kennedy, "FE and Simplified Models of Steel Plate Shear Wall", Journal of structural Eng, vol. 124, no. 2, Feb. 1998.
- [5] ANSYS (VER 5.6.2) Reference Manuals (Theory, Elements, Analysis Guide, and Components). AS IP Inc.
- [6] Vicent Caccese, Mohamed Elgaaly, Rubo Chen, "Experimental Study of Thin Steel – Plate Shear Walls Under Cyclic Load", Journal of structural Eng. ,vol. 119, no. 2, Feb. 1993.
- [7] Adam S. Lubell, Helut G. I. Prion, Carlos E. Ventura, Mahmoud Rezai, "Peformance of Unstiffened Steel Plate Shear Walls Under Cyclic Loading", Journal of structural Eng. ,vol. 126, No. 4.
- [8] Elgaaly, V. Caccese, C. Du "Postbuckling Beahavior of Platr Shear Walls Under Cyclic Loads", Journal of structural Eng.,Vol. 119, No. 2.
- [9] Mahamed Elgaaly, Yinbo Liu, "Analyse of Thin-Steel-Shear Walls", Journal of structural Eng. Vol. 123, No. 11.
- [۱۰] چارلز جی- سالمن، جان ای- سالمن، ترجمه فریدون ایرانی، "طراحی و محاسبه سازه های فولادی" انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۷۵.
- [۱۱] دکتر حمید محرمی، "دیوارهای برشی فولادی" کنفرانس ساختمان‌های بلند، ایران، ۸۰.
- [۱۲] پایاننامه کارشناسی ارشد سازه "بررسی رفتار خرابی سیستم دیوار برشی فولادی" حسین عزیززاده، فروردین ۸۳.