

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده :

مهندسی مکانیک

گروه :

طراحی کاربردی

تحلیل عددی و تجربی ستون های جدار نازک نقطه جوش شده در بارگذاری محوری و مایل

دانشجو :

حمید رضا الله بخش

استاد راهنما :

دکتر محمود شریعتی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

ماه و سال انتشار:

خرداد ۸۹



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مکانیک

گروه طراحی کاربردی

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حمیدرضا ا... بخش

تحت عنوان:

تحلیلی عددی و تجربی ستونهای جدار نازک نقطه جوش شده تحت بارگذاری محوری و مایل در تاریخ ۸۹/۳/۱۱ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : محمود شریعتی
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی : حمیدرضا ایپکچی
	مهدی گردونی		نام و نام خانوادگی : محمد جعفری
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

## تعهد نامه

اینجانب حمیدرضا ا... بخش دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه "تحلیلی عددی و تجربی ستونهای جدار نازک نقطه جوش شده در بارگذاری محوری و مایل" تحت راهنمایی دکتر محمود شریعتی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصلیت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه/رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچگونه مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آمدن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه/رساله رعایت می گردد .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه/رساله ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه/رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا از آن استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ: ۱۳۸۹/۳/۱۲

امضاء دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و این مطلب باشد به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر منبع مجاز نمی باشد .

## تقدیر و تشکر

خدای یکتا را سپاسگزارم که در سه سال اخیر، فرصت شاگردی در کلاس علم و ادب استادان فرهیخته ای را داشته ام. به ویژه از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر شریعتی تشکر می کنم که در جوار ایشان نه تنها علم بلکه اخلاق نیز آموختم. بی شک بدون وجود کمک و راهنمایی استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر شریعتی، که در تمامی مراحل پایان نامه حامی و راهنمای صبور من بودند، اتمام پروژه از محالات بود. همچنین در این قسمت لازم می دانم از همکاری دوست عزیزم مهندس جعفر صائمی قدردانی نمایم. در طول انجام پروژه مشکلاتی بوجود می آید که توسط مجموعه ای از انسانها برطرف می شود، لذا از خداوند متعال برای کلیه کسانی که مرا در انجام این پروژه یاری نمودند، موفقیت و سربلندی همراه با آرامش در تمام مراحل زندگی خواستارم.

حمید رضا الله بخش

allahbakhshy@gmail.com

خرداد ماه ۱۳۸۹

قطره ایی بیش نیست

تقدیم به پدر و مادرم

پاسداشت یک عمر فداکاری

## چکیده

امروزه در صنایع خودرو سازی قابلیت جذب انرژی سازه های جدار نازک بسیار مورد مطالعه و تحقیق قرار می گیرد و هدف محققین ساخت جاذب هایی با قابلیت جذب انرژی بالا و نیروی ماکزیمم کمانش پایین می باشد. در این تحقیق قابلیت جذب انرژی یک ستون فولادی ساخته شده توسط نقطه جوش با سطح مقطع کلاه شکل (hat section)، در حالت بارگذاری محوری و مایل بررسی می شوند. تحلیل عددی به کمک نرم المان محدود Abaqus انجام گرفته و چندین تست تجربی به کمک دستگاه سروهیدرولیک INSTRON8802 دقت تحلیل های عددی را نشان می دهد.

در این پایان نامه تاثیر پارامترهای هندسی سازه مورد نظر از جمله ضخامت، ارتفاع ستون، اندازه سطح مقطع و طول قسمت فلنجی بر روی نیروی ماکزیمم کمانش و انرژی جذب شده بر واحد جرم مورد مطالعه قرار می گیرد. انرژی جذب شده به ازای تغییر شکل به ازای ۱۰۰ میلیمتر و با فرض عدم گسیختگی نقطه جوش مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین اثر تعداد نقطه جوش، بر بار میانگین کمانش و انرژی جذب شده بررسی می شوند. نتایج نشان می دهد که با افزایش طول و عرض سطح مقطع، ارتفاع ستون، عرض قسمت فلنجی انرژی جذب شده بر واحد جرم کم می شود و با افزایش ضخامت، انرژی جذب شده بر واحد جرم اضافه می شود. همچنین نتایج نشان می دهد که با افزایش طول و عرض سطح مقطع، ضخامت، عرض قسمت فلنجی نیروی ماکزیمم کمانش افزایش می یابد و با افزایش ارتفاع ستون نیروی ماکزیمم کمانش کم می شود. در نهایت یک ستون پر شده توسط فوم توسط روش RSM بهینه می شود. برای بهبود این جاذب انرژی انتهای این سازه، سوراخهائی (trigger) به عنوان کنترل کننده برای کم کردن نیروی ماکزیمم کمانش ایجاد می شود و تاثیر پارامترهای هندسی این سوراخها بر نیروی ماکزیمم کمانش و انرژی جذب شده بررسی می شوند. این کنترل کننده، بدون کاهش انرژی جذب شده بر واحد جرم نیروی ماکزیمم کمانش را کاهش می دهد.

کلمات کلیدی: جاذب انرژی، نقطه جوش، سازه های جدار نازک، تجربی، عددی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

مقالات ژورنالی (ISI):

- 1- M. Shariati, **H.R. Allahbakhsh**, Jafar Saemi, "An experimental and numerical crashworthiness investigation of crash columns assembled by spot-weld", *Mechanika*, 2010, No.2 (82), pp. 21-25.
- 2- M. Shariati, **H.R. Allahbakhsh**, J. Saemi. "Optimization of foam filled spot-welded column for the crashworthiness design " *Mechanika*, 2010, No.3 (83), pp. 10-16.
- 3- **H.R. Allahbakhsh**, M. Shariati, Jafar Saemi, "Optimization of foam-filled spot-welded column using response surface methodology (RSM)" **Strength of material**, accepted
- 4- **H.R. Allahbakhsh**, M. Shariati, Jafar Saemi, "Crashworthiness optimization of foam-filled and empty spot-welded columns" **Australian journal of basic and applied scienc**, accepted

مقالات کنفرانسی:

- ۱- محمود شریعتی، حمیدرضا الله بخش، جعفر صائمی "بررسی عددی و تجربی جذب انرژی ستونهای جدار نازک نقطه جوش شده در بار محوری." نهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۱۳۸۸، صفحه ۲۵۳-۲۵۴
- ۲- محمود شریعتی، حمیدرضا الله بخش، جعفر صائمی. "بهینه سازی قابلیت جذب انرژی ستون جدار نازک نقطه جوش شده توسط روش RSM" نهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۱۳۸۸، صفحه ۲۵۹-۲۶۰



## فهرست

۱- مقدمه و مروری بر انواع جاذب های انرژی.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- تحقیقات انجام شده بر روی جاذبه های انرژی.....	۴
۱-۲-۱- مخروط دوار ناقص ( فروستا ).....	۴
۱-۲-۲- پوسته های نیمه کروی.....	۸
۱-۲-۳- ستونهای چند گوش.....	۹
۱-۲-۴- جاذب های لانه زنبوری.....	۱۲
۱-۲-۵- جاذب های S شکل دو بعدی.....	۱۲
۱-۲-۶- جاذب های S شکل سه بعدی.....	۱۳
۱-۲-۷- جاذب های انرژی صفحه ای.....	۱۵
۱-۲-۸- تغییر شکل لوله ها.....	۱۶
۱-۲-۸-۱- وارونگی لوله.....	۱۶
۱-۲-۸-۲- لهیدگی لوله ها همراه با شکافته شدن دیواره آنها.....	۱۷
۱-۲-۸-۳- لهیدگی شعاعی لوله های فلزی تحت بار خارجی.....	۱۹
۱-۲-۸-۴- تیرهای لوله ای تحت بار عرضی.....	۲۲
۱-۲-۸-۵- لهیدگی محوری لوله ها تحت بار محوری ( کمانش پیشرونده ).....	۲۳
۱-۲-۸-۶- کمانش لوله ها در بارگذاری مایل.....	۲۷
۲- مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی مقاطع نقطه جوش شده.....	۲۹
۱-۲- مقدمه.....	۳۰
۱-۲- تحقیقات انجام شده بر روی مقاطع نقطه جوش شده.....	۳۰
۳- تحلیل های عددی.....	۳۶

۳۷	۱-۳-مقدمه.....
۳۸	۲-۳- معرفی روش عددی اجزای محدود.....
۴۲	۱-۲-۳- روش گالرکین.....
۴۴	۳-۳- معرفی نرم افزار ABAQUS/CAE.....
۴۵	۴-۳- مدل سازی و ابعاد نمونه ها.....
۴۶	۵-۳- نامگذاری نمونه ها.....
۴۶	۶-۳- خواص مکانیکی ماده.....
۴۷	۷-۳- شرایط مرزی نمونه.....
۴۷	۸-۳- المان بندی نمونه ها.....
۴۸	۹-۳- تعیین نوع تحلیل.....
۴۹	۱-۹-۳- تحلیل فرکانسی.....
۴۹	۲-۹-۳- تحلیل صریح دینامیکی.....
۵۰	۱۰-۳- نتایج تحلیل عددی ستونهای نقطه جوش شده تحت بار فشاری محوری.....
۵۰	۱-۱۰-۳- بررسی تأثیر اندازه سطح مقطع بر مقدار انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش.....
۵۳	۲-۱۰-۳- بررسی تأثیر ضخامت بر مقدار انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش.....
۵۷	۳-۱۰-۳- بررسی تأثیر طول فلنج بر مقدار انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش.....
۵۷	۴-۱۰-۳- بررسی تأثیر ارتفاع ستون بر مقدار انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش.....
۶۱	۵-۱۰-۳- بررسی تأثیر تعداد نقطه جوش بر مقدار انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش.....
۶۳	۱۱-۳- تاثیر پرکردن ستونها با فوم بر قابلیت جذب انرژی.....
۶۳	۱-۱۱-۳- بهینه سازی.....
۶۴	۲-۱۱-۳- روش RSM.....
۶۷	۱۲-۳- کنترل کننده برای کاهش نیروی ماکزیمم کمانش.....
۷۰	۱۳-۳- نتایج تحلیل عددی ستون های نقطه جوش شده تحت بار گذاری مایل.....
۷۴	۴- بررسی تجربی.....

۷۵	۱-۴- مقدمه.....
۷۵	۲-۴- فرایند جوشکاری مقاومتی.....
۷۵	۱-۲-۴- جوشکاری نقطه ای.....
۷۷	۳-۴- نتایج تست کشش.....
۷۸	۴-۴- نتایج تجربی فشردگی ستونهای ساخته شده توسط نقطه جوش.....
۷۸	۱-۴-۴- بررسی تاثیر پارامترهای هندسی ستون بر قابلیت جذب انرژی.....
۸۰	۲-۴-۴- بررسی ایجاد سوراخ به منظور پایین آوردن نیروی ماکزیمم کمانش.....
۸۱	<b>۵- مقایسه نتایج عددی و تجربی.....</b>
۸۲	۱-۵- مقدمه.....
۸۲	۲-۵- مقایسه نتایج عددی و تجربی ستونهای جدار نازک نقطه جوش شده.....
۸۳	۳-۵- مقایسه منحنی های بار- جابجایی انتهایی، حاصل از تحلیلهای عددی و تجربی.....
۸۷	<b>۶- نتایج و پیشنهادها.....</b>
۸۸	۱-۶- مقدمه.....
۸۸	۲-۶- نتایج بدست آمده.....
۸۹	۳-۶- پیشنهادها.....
۹۲	منابع.....

## فهرست نمودار ها و شکل ها

- شکل ۱-۱-۱ (a) برج سقوط آزاد و (b) دستگاه سرو هیدرولیک ..... ۳
- شکل ۱-۲-۱ پارامترهای بررسی شده در تحلیل ریاضی ..... ۵
- شکل ۱-۳-۱ نمودار انرژی جذب شده بر حسب ضخامت برای مخروط فومدار با زوایا و چگالی مختلف ..... ۷
- شکل ۱-۴-۱ نمودار نیروی ماکزیمم کمانش برای مخروطهای مختلف ..... ۷
- شکل ۱-۵-۱ نمودار نیرو جابجایی برای (a) بدون فوم ، (b) فومدار در حالت سقوط وزنه ..... ۸
- شکل ۱-۶-۱ نمودار نیرو جابجایی برای (a) بدون فوم، (b) فومدار در حالت سقوط وزنه از ارتفاع متفاوت ..... ۸
- شکل ۱-۷-۱ مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی مختلف ..... ۹
- شکل ۱-۸-۱ مقاطع چند ضلعی و همچنین پر شده از فوم با وزن یکسان ..... ۱۰
- شکل ۱-۹-۱ یک ستون دارای trigger و نمودار نیرو جابجایی آن برای دو حالت با trigger و بدون trigger ..... ۱۰
- شکل ۱-۱۰-۱ نمودارهای سه بعدی انرژی و نیروی ماکزیمم کمانش بر حسب پارامترهای هندسی ..... ۱۰
- شکل ۱-۱۱-۱ نمودار نیرو- جابجایی برای مقاطع شش ضلعی ..... ۱۱
- شکل ۱-۱۲-۱ جاذب کندو عسلی. (a) مثلثی منظم، (b) مثلثی شطرنجی، (c) مربعی منظم، (d) مربعی شطرنجی. .... ۱۲
- شکل ۱-۱۳-۱ پارامترهای بررسی شده و بهینه شده توسط Liu ..... ۱۲
- شکل ۱-۱۴-۱ هندسه یک جاذب انرژی S شکل سه بعدی ..... ۱۳
- شکل ۱-۱۵-۱ نمودار انرژی جابجایی برای سه سطح مقطع متفاوت ..... ۱۴
- شکل ۱-۱۶-۱ نمودار نیرو- جابجایی برای دو اتصال مختلف ..... ۱۴
- شکل ۱-۱۷-۱ شکل یک جاذب انرژی صفحه ایی و نمودارهای مربوط به آن ..... ۱۵
- شکل ۱-۱۸-۱ نمودار نیرو - جابجایی و حالت تغییر شکل یافته برای لوله دایروی از جنس آلایژ آلومینیوم ..... ۱۷
- شکل ۱-۱۹-۱ نمودار نیرو- جابجایی برای لوله های فولادی در حین شکافته شدن ..... ۱۸
- شکل ۱-۲۰-۱ نحوه بارگذاری لوله دایروی برای شکافته شدن توسط ماتریس مخروطی ..... ۱۹
- شکل ۱-۲۱-۱ نحوه بارگذاری و نمودار نیرو - جابجایی برای بارگذاری شعاعی لوله دایروی ..... ۲۰
- شکل ۱-۲۲-۱ انواع نمونه های آزمایش شده: (a) CCT , (b) RCCT , (c) RCSCCT ..... ۲۱

- شکل ۱-۲۳- نمودار نیرو- جابجایی در حالت بارگذاری (a) محوری و (b) شعاعی ..... ۲۱
- شکل ۱-۲۴- نمودار میله ایی انرژی جذب شده برای حالت بارگذاری (a) محوری و (b) شعاعی. .... ۲۱
- شکل ۱-۲۵- تغییر شکل‌های حاصل از دو تغییر شکل محوری و شعاعی. .... ۲۲
- شکل ۱-۲۶- بارگذاری عرضی لوله های جاذب انرژی. .... ۲۲
- شکل ۱-۲۷- یک نمونه نمودار نیرو جابجایی برای لوله مربعی. .... ۲۴
- شکل ۱-۲۸- لوله استوانه ای جدار نازک شیار دار برای کنترل کمانش ..... ۲۷
- شکل ۱-۲۹- نحوه اعمال بارگذاری مایل به یک لوله ..... ۲۸
- شکل ۲-۱- تغییر چگالی فوم در داخل یک ستون نقطه جوش شده بعد از چین خوردگی ..... ۳۱
- شکل ۲-۲- هندسه یک جاذب انرژی نقطه جوش شده ..... ۳۱
- شکل ۲-۳- یک جاذب انرژی نقطه جوش شده کلاه شکل همراه با کنترل کننده ..... ۳۳
- شکل ۲-۴- هندسه های مورد مطالعه شده توسط پرونی ..... ۳۴
- شکل ۲-۵- شکل یک فیکسچر برای اعمال خمش خالص به یک ستون جدار نازک ..... ۳۵
- شکل ۳-۱- هندسه ستون جدار نازک ساخته شده توسط نقطه جوش ..... ۴۶
- شکل ۳-۲- نمودار تنش- کرنش ورق مورد بررسی ..... ۴۷
- شکل ۳-۳- نحوه مش بندی نمونه ها ..... ۴۸
- شکل ۳-۴- سه شکل مد برای نمونه (a: h50-w50-t1-f15-h200) مد اول (b) مد دوم و (c) مد سوم ..... ۴۹
- شکل ۳-۵- نمودار نیرو جابجایی و کانتور تنش فون میسز برای دو نمونه (a) H200-h40-w60-t1-f15, H200-h50-w50-t2-f15- ..... 60-w40-t1-f15-  
H200 (b) ..... ۵۱
- شکل ۳-۶- نمودار انرژی جذب شده بر حسب طول و عرض سطح مقطع برای ستونی با ضخامت ۱ میلیمتر ..... ۵۲
- شکل ۳-۷- نمودار نیروی ماکزیمم کمانش بر حسب طول و عرض مقطع برای ستونی با ضخامت ۱ میلیمتر ..... ۵۲
- شکل ۳-۷- نمودار نیرو جابجایی و کانتور تنش فون میسز برای دو نمونه: (a) H200-h50-w50-t1-f15, H200-h50-w50-t2-f15- ..... 50-w50-t2-f15-  
H200 (b) ..... ۵۵
- شکل ۳-۸- نمودار نیروی ماکزیمم کمانش بر حسب ضخامت برای ستون های f15-H200 ..... ۵۶
- شکل ۳-۹- نمودار انرژی جذب شده برواحد جرم بر حسب ضخامت برای ستون های f15-H200 ..... ۵۶

- شکل ۳-۱۰- نمودار نیرو- جابجایی و کانتور تنش فون میسر برای نمونه (a) h50-w50-t1-f15-h200 و h50-w50-t1-f20
- شکل ۳-۱۱- نمودار نیروی ماکزیمم کمانش بر حسب طول فلنج برای ستون های t1-H200 ..... ۵۸
- شکل ۳-۱۲- نمودار نیروی ماکزیمم کمانش بر حسب طول فلنج برای ستون های t1-H200 ..... ۵۹
- شکل ۳-۱۳- نمودار نیرو- جابجایی و برای ستون های h50-w50-t1-f15 ..... ۶۰
- شکل ۳-۱۴- تغییر شکل ستونهای نقطه جوش شده با تعدادنقطه جوش متفاوت..... ۶۱
- شکل ۳-۱۵- نیروی ماکزیمم کمانش بر حسب تعداد نقطه جوش برای ستون h50-w50-t1-f15-H200 ..... ۶۲
- شکل ۳-۱۶- نمودار انرژی جذب شده بر حسب تعداد نقطه جوش برای ستون h50-w50-t1-f15-H200 ..... ۶۲
- شکل ۳-۱۷- نمودار نیرو- جابجایی و تغییر شکل ستونهای فوم دار و بدون فوم..... ۶۳
- شکل ۳-۱۸- نمودار انرژی ویژه جذب شده بر حسب چگالی و ضخامت..... ۶۴
- شکل ۳-۱۹- نمودار نیروی ماکزیمم کمانش بر حسب چگالی و ضخامت ..... ۶۷
- شکل ۳-۲۰- هندسه و نحوه مش زدن برای ستون دارای کنترل کننده h40-w40-t1-f15-H200 ..... ۶۸
- شکل ۳-۲۱- تغییر شکل برای نمونه h40-w40-t1-f15-H200 و کنترل کننده با مشخصات a10-b20 ..... ۶۸
- شکل ۳-۲۲- نمودار انرژی جذب شده بر حسب مکان کنترل کننده برای نمونه h40-w40-t1-f15-H200 ..... ۶۹
- شکل ۳-۲۳- نمودار نیروی ماکزیمم بر حسب مکان کنترل کننده برای h40-w40-t1-f15-H200 ..... ۶۹
- شکل ۳-۲۴- نحوه اعمال بارگذاری به صورت مایل ..... ۷۱
- شکل ۳-۲۵- نحوه بارگذاری مایل ستون نقطه جوش شده M3(c, M2(b, M1(a) ..... ۷۱
- شکل ۳-۲۶- نمودار نیرو- جابجایی و تغییر شکل ستون h50-w50-t1-f15-h200 در حالت بارگذاری مایل و محوری (a) ,  
Axial (d) و M3 (c , M2 (b M1 ..... ۷۲
- شکل ۳-۲۷- نمودار نیرو- جابجایی ستون h50-w50-t1-f15-H200 در بارگذاری مایل با زوایای مختلف ..... ۷۳
- جدول ۳-۶- میزان انرژی جذب شده بر واحد جرم و نیروی ماکزیمم کمانش برای ستون های h50-w50-t1-f15-H200 در حالت بارگذاری مایل ..... ۷۳
- شکل ۴-۱- نمودار تنش- کرنش ..... ۷۷
- شکل ۴-۲- تعدادی از نمونه های آزمایش با دستگاه INSTRON ..... ۷۸

- شکل ۳-۴- منحنی های بار- جابجایی برای ستونهای h55-w55-f15-H200 در ضخامت های مختلف ..... ۷۹
- شکل ۴-۴- منحنی بار- جابجایی برای دو ستون h60-w40-t1-f15-H200 و h40-w60-t1-f15-H200 ..... ۷۹
- شکل ۵-۴- منحنی های بار- جابجایی در حالت با کنترل کننده و بدون کنترل کننده ..... ۸۰
- شکل ۱-۵- مقایسه نتایج تجربی و عددی برای نمونه h55-w55-t1.5-f15-H200 ..... ۸۳
- شکل ۲-۵- مقایسه نتایج تجربی و عددی برای نمونه h55-w55-t2-f15-H200 ..... ۸۴
- شکل ۳-۵- مقایسه نتایج تجربی و عددی برای نمونه h40-w60-t1-f15-H200 ..... ۸۴
- شکل ۴-۵- مقایسه نتایج تجربی و عددی برای نمونه h60-w40-t1-f15-H200 ..... ۸۵
- شکل ۵-۵- مقایسه نتایج تجربی و عددی برای نمونه h40-w40-t1-f15-H200 ..... ۸۵
- شکل ۶-۵- مقایسه نتایج تجربی و عددی برای نمونه h40-w40-t1-f15-H200 در حالت دارای کنترل کننده ..... ۸۶
- شکل ۷-۵- مقایسه نتایج تجربی [۳۲] و عددی برای نمونه h50-w50-t1-f15-H200 در حالت فوم دار ..... ۸۶

## فهرست جداول

- جدول ۱-۳- نیروی ماکزیمم کمانش و انرژی ویژه جذب شده..... ۵۳
- جدول ۲-۳- میزان انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش برای نمونه h50-w50-f15-H200..... ۵۴
- جدول ۲-۳- میزان انرژی جذب شده بر واحد جرم و نیروی ماکزیمم کمانش برای ستون های t1-f15-h200..... ۶۰
- جدول ۵-۳- مقادیر بهینه به دست آمده توسط روش RSM..... ۶۷
- جدول ۱-۵- مقایسه نتایج عددی و تجربی برای ستونهای نقطه جوش شده..... ۸۲
- جدول ۲-۵- خطای بین نتایج عددی و تجربی..... ۸۲



## فصل اول

مقدمه و مروری بر انواع جاذب های انرژی

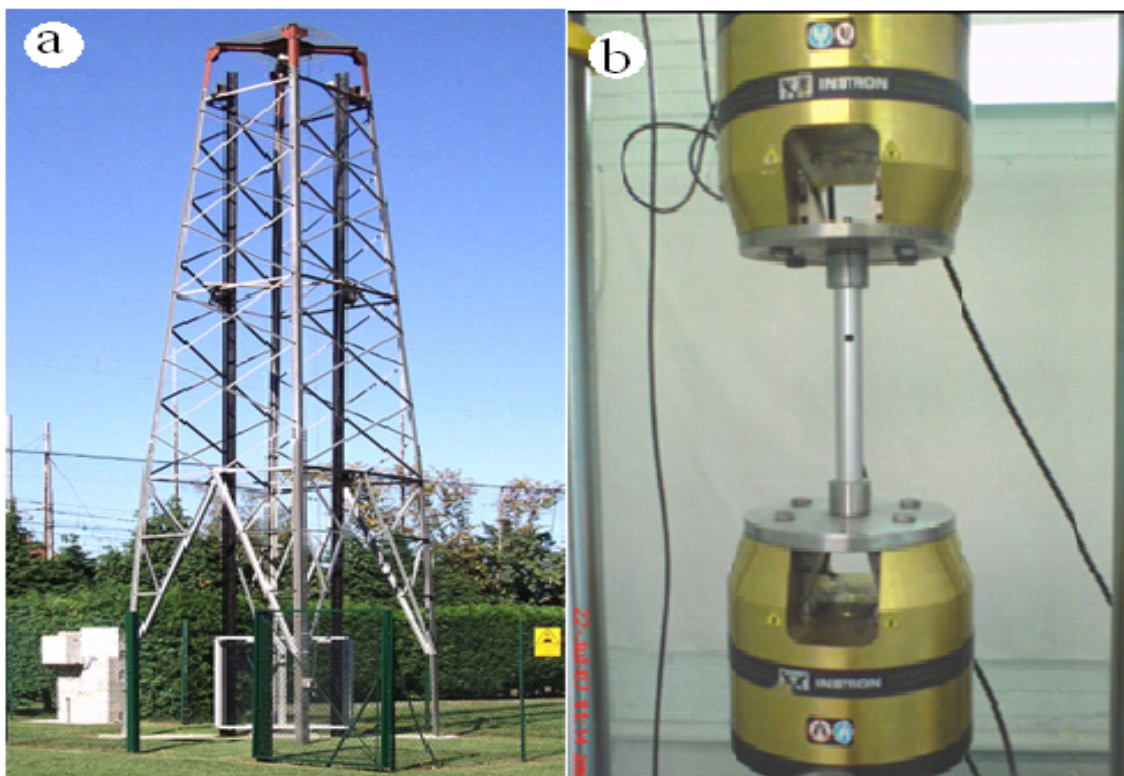
## ۱-۱ مقدمه

در نیمه دوم قرن گذشته مسائل زیادی مربوط به جذب انرژی مطرح شده اند؛ که این مسائل نسبت به درک بهتر حالت گسیختگی و مسائل پخش انرژی در چنین سازه هایی در حین برخورد کمک می کند. این اطلاعات برای طراحی سازه های مطمئن و همچنین برای ارزیابی سازه های موجود در کاربردهای ویژه بسیار مهم است، چرا که در نهایت خسارتهای انسانی و منابع مادی به شدت کاهش می یابد. کاربردهای این شاخه از علم مهندسی برای استفاده در محدوده وسیعی از موقعیتهای مهمیست که شامل جنبه هایی از تصادف وسایل نقلیه ( اتومبیل ، هواپیما ، کشتی و...) و سازه های ساحلی و تانکرهای نفتی می شود. یک جاذب انرژی سیستمی است که بتواند تمام یا قسمتی از انرژی جنبشی را به شکل دیگری از انرژی تبدیل کند.

برای نشان دادن قابلیت جذب انرژی سازه های جدار نازک از پارامترهای نیروی ماکزیمم کمانش و انرژی جذب شده بر واحد جرم (Specific Energy Absorption, SEA) استفاده می شود. نیروی ماکزیمم کمانش، مقدار حداکثر نیرو در نمودار نیرو - جابجایی می باشد که باعث کمانش سازه می شود و مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم نیز برابر با نسبت سطح زیر نمودار نیرو - جابجایی بر جرم سازه می باشد. یک جاذب انرژی ایده ال خطی موازی با محور افقی در نمودار نیرو-جابجایی می باشد که حداقل نیروی ماکزیمم کمانش و بیشترین مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم را دارد. همچنین برای نشان دادن قابلیت جذب انرژی از پارامتر دیگری به نام نیروی میانگین کمانش استفاده می شود که برابر با نسبت سطح زیر نمودار نیرو-جابجایی به ارتفاع فشردگی می باشد.

رفتار سازه های فلزی جدار نازک به عنوان جاذب انرژی سالهای متمادی مورد بررسی قرار گرفته است. وزن و حجم کم، در دسترس بودن و صرفه اقتصادی مزیت هایی است که سبب گشته تحقیقات برای استفاده از این سازه ها در جهت بهینه کردن ویژگی های جذب انرژی همچنان مستمر باشد. تحلیل

جاذبه های انرژی به روش های عددی (با استفاده از نرم افزارهای FEA)، تحلیلی و آزمایشگاهی انجام می شود. در روش آزمایشگاهی از دستگاه های مکانیکی و یا برج سقوط آزاد وزنه استفاده می شود که در شکل (۱-۱) یک برج سقوط آزاد وزنه و یک دستگاه هیدرولیکی نشان داده شده است.



شکل ۱-۱. (a) برج سقوط آزاد و (b) دستگاه سرو هیدرولیک [2,3]

تعداد جاذبه های انرژی شناخته شده زیاد است، ولی در این بخش متداولترین آنها معرفی شده اند .

۱- سازه های جدار نازک استوانه ای

۲- مخروط دوار

۳- پوسته های نیمه کره ای

۴- ستونهای چند گوش

۵- سلولهای لانه زنبوری

۶- جاذبهای S شکل دو بعدی

۷- جاذبهای S شکل سه بعدی

۸- جاذبهای صفحه ای

در بخشهای بعدی، در مورد هر کدام از این نوع جاذبها، توضیحات بیشتری ارائه خواهد شد.

## ۱-۲- تحقیقات انجام شده بر روی جاذبهای انرژی

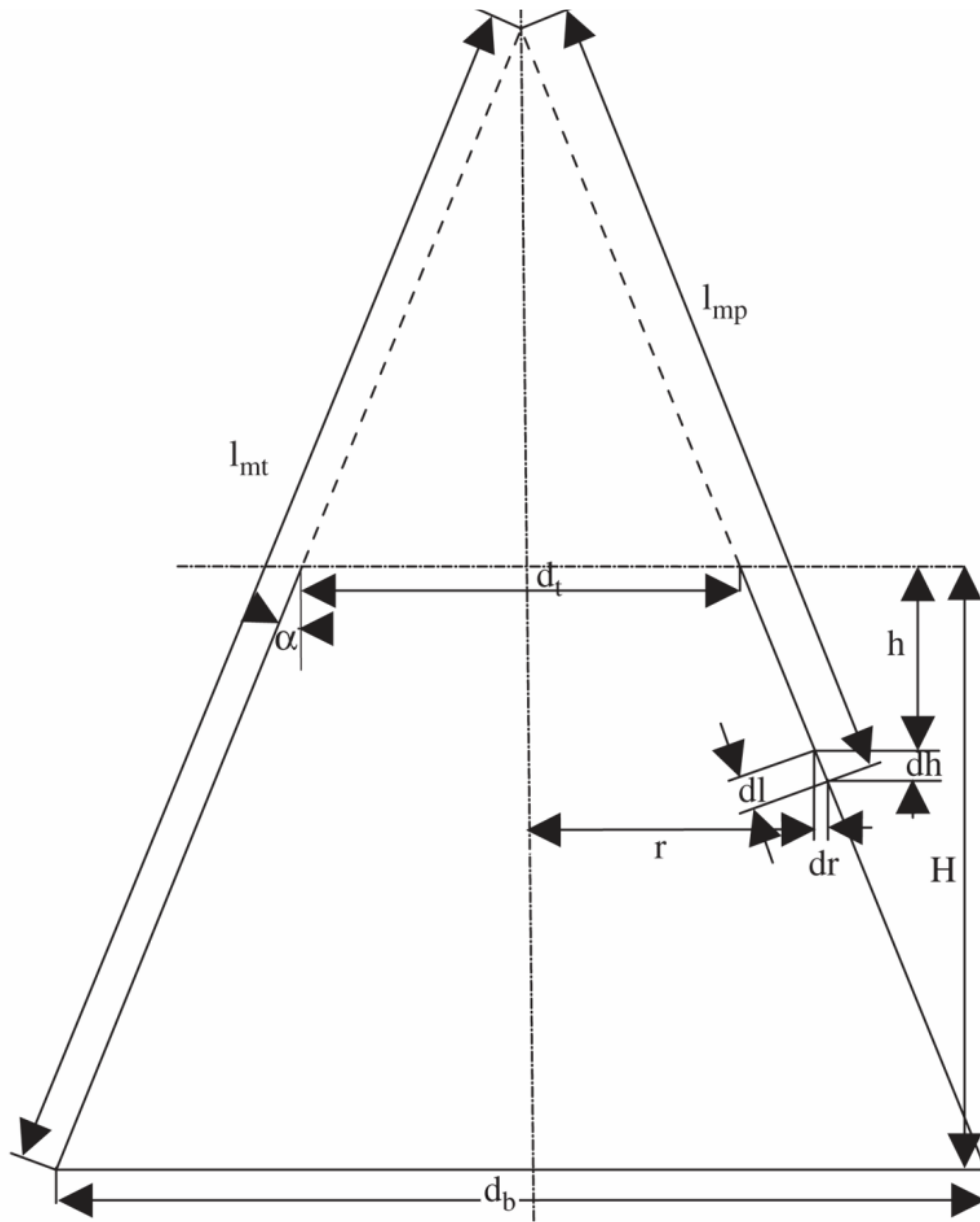
### ۱-۲-۱- مخروط دوار

Gupta [1] بر روی مخروطها آزمایشاتی انجام داد و رفتار لولاهای ثابت و پلاستیک را بررسی کرد. سپس نتایج خود را با نتایج به دست آمده از نرم افزار Ansys مقایسه کرد و در نهایت یک مدل تئوری بر اساس روش انرژی برای رفتار کمانش مخروطها به صورت زیر ارائه داد که در این مدل شعاع لولای پلاستیک به دست آمده از روش آزمایشگاهی، در راه حل تحلیلی استفاده شد. بر اساس روش انرژی نیروی لازم برای تغییر شکل پلاستیک به صورت زیر می باشد. پارامترهای بررسی شده در تحلیل ریاضی در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.

$$P = \frac{(dW_r + dW_s + dW_m)}{dh} \quad (2-1)$$

در این رابطه  $dW_r$  کارناشی از تشکیل لولاهای پلاستیک،  $dW_s$  کارناشی از تشکیل لولاهای ثابت و  $dW_m$  کار انجام شده در جهت نصف النهاری می باشد.

کار پلاستیک  $dW_r$  در جز  $dA$  در هنگام فشرده شدن به اندازه  $dh$  از این رابطه به دست می آید.



شکل ۱-۲- پارامترهای بررسی شده در تحلیل ریاضی [1]

$$dW_r = \frac{2 \times [dA] \times M_p}{r_p} \quad (3-1)$$

$$M_p = \frac{\sigma_0 \times t^2}{4} \quad (4-1)$$

$$dA = 2 \times \pi \times r \times dl \quad (5-1)$$

که  $\sigma_0$  تنش تسلیم  $t$  ضخامت مخروط،  $M_p$  گشتاور پلاستیک بر واحد طول و  $r$  شعاع دایره موازی در هر مقطع می باشد. شعاع لولای  $r_p$  را نیز می توان از رابطه  $r_p = Ae^{Bh} \pm C$  بدست آورد که ضرایب  $A$ ،  $B$  و  $C$  از نتایج تجربی بدست می آید.  $dW_s$  از رابطه زیر به دست می آید:

$$dW_s = N \times M_p \times (2 \times \pi / N) l \quad (6-1)$$

که  $N$  تعداد لولاهای ثابت می باشد.  $dW_m$  نیز از رابطه زیر به دست می آید.

$$dW_m = \sigma_0 \times e \times [dV] \quad (7-1)$$

$$e_1 = \frac{(dl - dr)}{dl} \quad (8-1)$$

$$e = 0.5 \times \left[ 1 - \frac{l_{mp}}{l_m} \right] \quad (9-1)$$

$$dr = dh \times \tan \alpha \quad (10-1)$$

که  $e$  کرنش در جهت نصف النهاری و  $e_1$  کرنش به سبب تغییر شکل به ازای  $dl$  می باشد. فرمول به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی و عددی مطابقت خوبی داشت.

Ahmad [2] تاثیر ضخامت، زاویه مخروط، سرعت برخورد، جرم وزنه، و تاثیر پر کردن مخروطها را

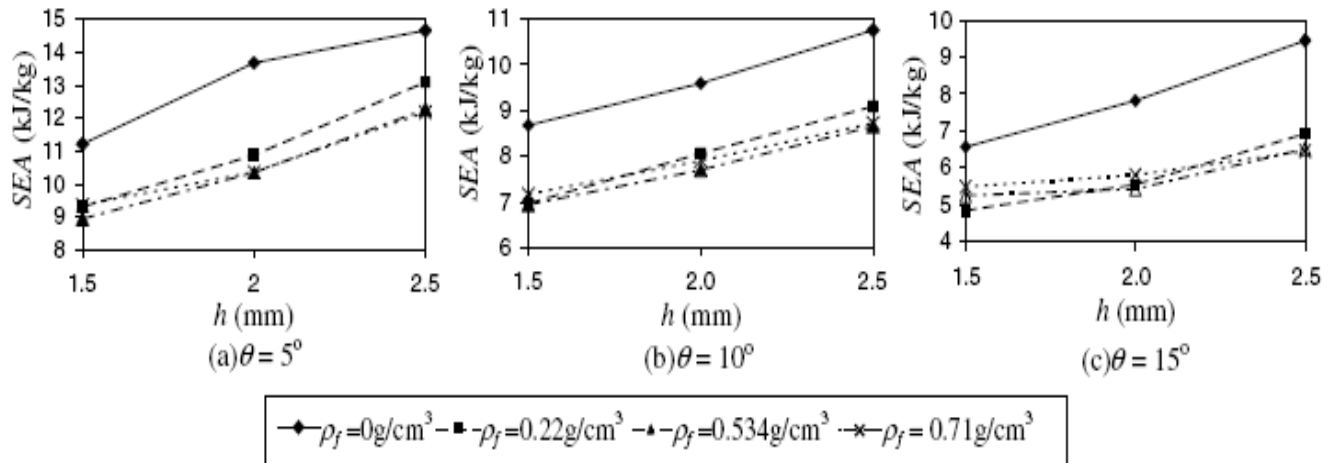
با فوم بررسی کرد و از شکلهای (۱-۳) تا (۱-۶) او این نتایج را گرفت:

۱- در ارتفاع فشردگی یکسان میزان انرژی جذب شده در مخروطهای فوم دار بیشتر است.

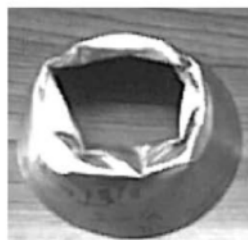
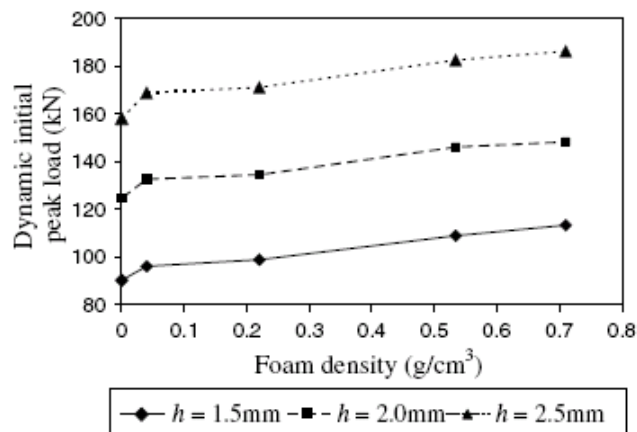
۲- استفاده از فوم، SEA را نسبت به  $P_m$  بیشتر افزایش می دهد یعنی می توان از فوم چگالتر استفاده کرد و SEA را افزایش داد در حالیکه  $P_m$  افزایش زیادی نداشته باشد.

۳- با افزایش ضخامت و زاویه مخروط می توان انرژی جذب شده را افزایش داد. (اگر زاویه مخروط برابر ۹۰ باشد مخروط شبیه لوله می شود).

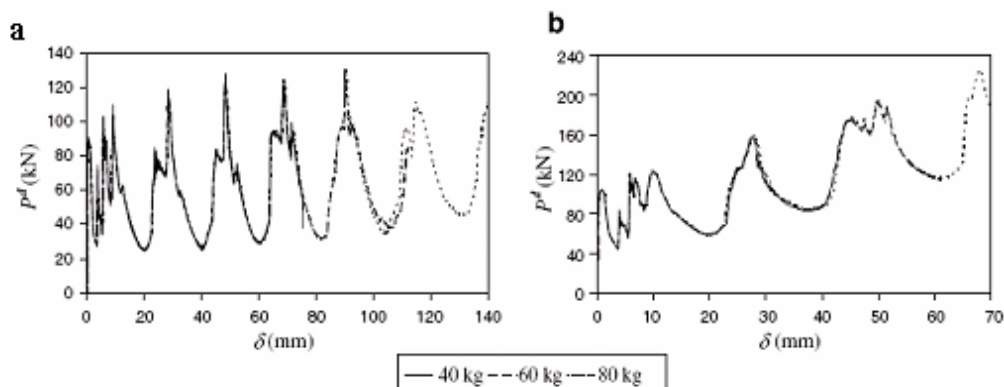
۴- افزایش جرم وزنه و یا سرعت برخورد ارتفاع فشردگی را تغییر می دهد و تاثیر ناچیزی در افزایش انرژی جذب شده دارد.



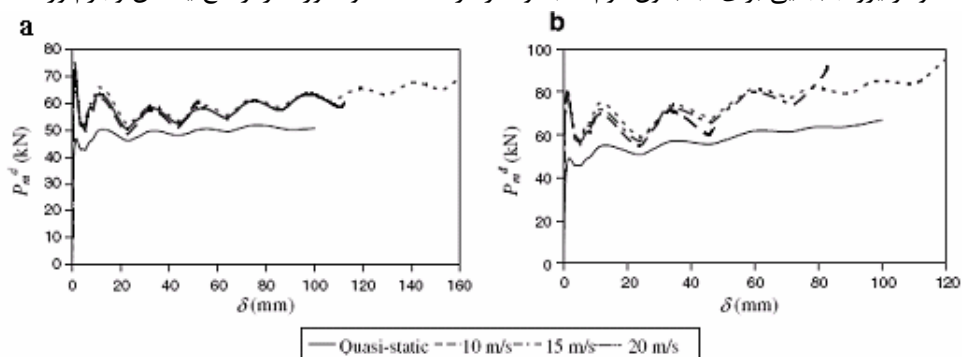
شکل ۳-۱. نمودار انرژی جذب شده بر حسب ضخامت برای مخروطها پر شده با فوم با زوایا و چگالی فوم مختلف [2]



شکل ۴-۱. نمودار نیروی ماکزیمم کمانش برای مخروطهای مختلف [2]



شکل ۵-۱. نمودار نیرو جابجایی برای (a) بدون فوم، (b) فومدار در حالت سقوط وزنه از ارتفاع یکسان و جرم وزنه متفاوت [2]



شکل ۶-۱. نمودار نیرو جابجایی برای (a) بدون فوم، (b) فومدار در حالت سقوط وزنه از ارتفاع متفاوت و جرم وزنه یکسان [2]

## ۱-۲-۲- پوسته های نیمه کروی

نیمکره های جدار نازک به دلیل قابلیت جذب انرژی بالایی که در تغییر شکل پلاستیک دارند؛ بسیار مورد استفاده قرار می گیرند. مطالعه بر روی رفتار کمانش آنها برای استفاده در مواردی مانند دماغه هواپیما و یا موشک های بالستیک ضروری می باشد.

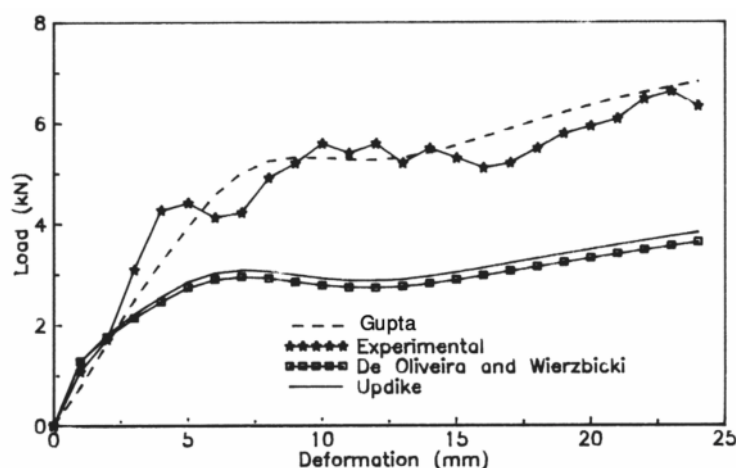
مطالعه تجربی بر روی پوسته های نیمه کروی با نسبت  $15 \leq \frac{R}{t} \leq 24$  توسط Gupta [3] انجام شد که در

آن هر سه مرحله تغییر شکل یعنی تخت شدگی محلی، فرورفتگی و تشکیل لبه های نامتقارن مشاهده شد.

Gupta و Venkatesh [4] یک مدل دو بعدی برای تغییر شکل متقارن پوسته های نیمه کروی تحت اثر بار محوری انجام دادند که مطالعات عددی و تجربی به خوبی با هم مطابقت داشتند. هر چند در این بررسی به دلیل دو بعدی بودن حالت گذار از مد تغییر شکل دوم به سوم ملاحظه نشد؛ اما یک



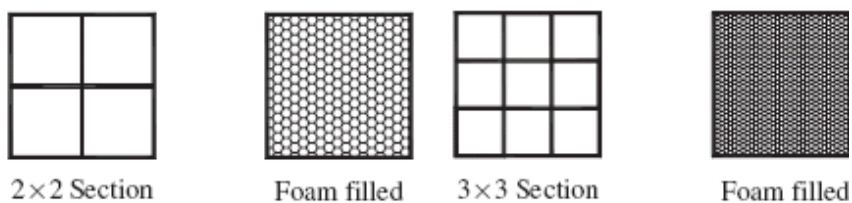
مقایسه خوب بین نتایج عددی و تجربی در حالت گذار از مد تغییر شکل اول به دوم ایجاد شد و به دلیل دو بعدی بودن، تغییر شکل نامتقارن قابل بررسی نبود. بعلاوه Gupta [3] یک مدل سه بعدی برای محاسبه حالت گذار تغییر شکل مدها بکار گرفت. او پوسته های نیمه کروی با نسبت  $219 \leq \frac{R}{t} \leq 28$  را به صورت تجربی و تحلیلی بررسی کرد که نتایج تجربی و تحلیلی به خوبی با هم مطابقت داشتند. روش تحلیلی فوق مانند روش به کار گرفته شده توسط خود وی در مخروطها می باشد. پارامترهای بررسی شده در تحلیل ریاضی در شکل (۲-۱) نشان داده شده است. Gupta [3] راه حل خود را با نتایج Updike و De'oliveira در شکل (۷-۱) مقایسه کرد.



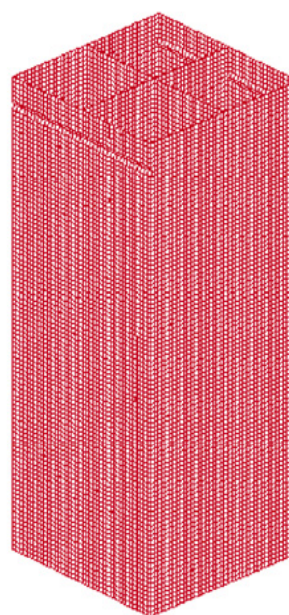
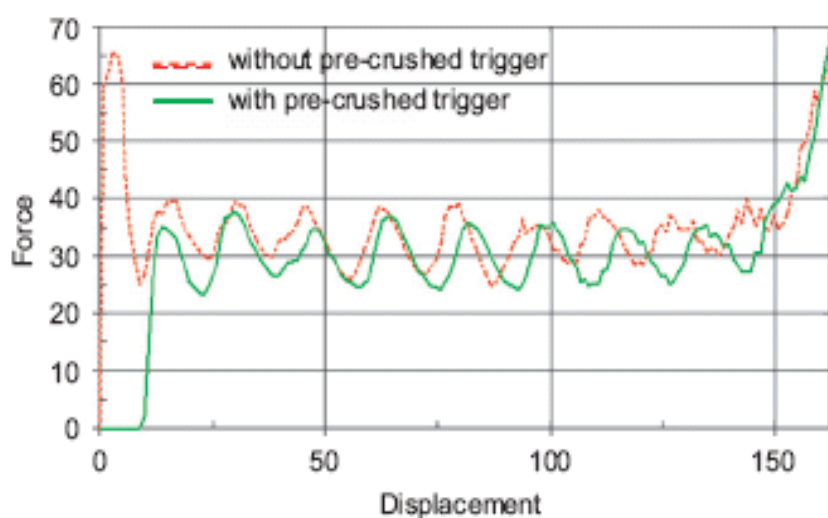
شکل ۷-۱. مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی مختلف [3]

### ۱-۲-۳-ستونهای چند گوش

Xiong [6] مقاطع شکل (۸-۱) را بررسی و مقایسه کرد و نتیجه گرفت ستون  $3 \times 3$  نسبت به ستون  $2 \times 2$  انرژی بیشتری جذب می کند و همچنین هر چه چگالی فوم بیشتر باشد انرژی بیشتری جذب می کند وی همچنین با ایجاد یک trigger (شکل ۹-۱) نیروی ماکزیمم کمانش به صورت قابل توجهی کاهش می یابد. این کاهش نیروی ماکزیمم کمانش یک مزیت برای جاذب انرژی می باشد.



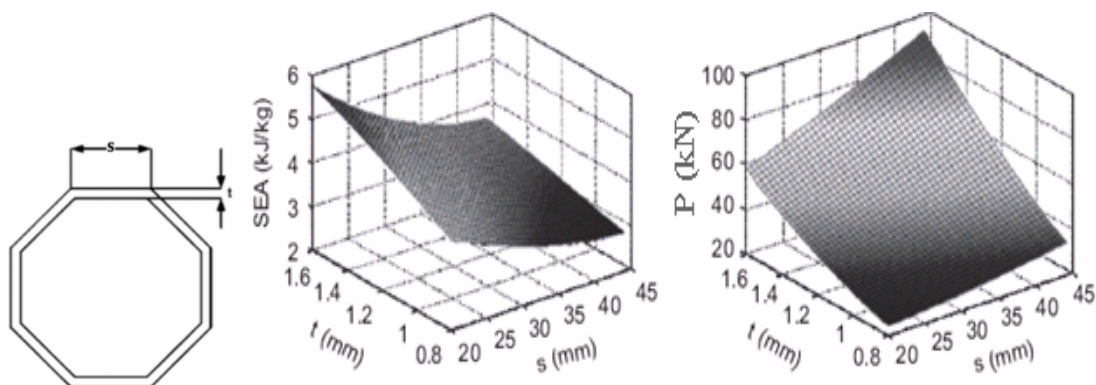
شکل ۸-۱. مقاطع چند ضلعی و همچنین پر شده از فوم با وزن یکسان [6]



شکل ۹-۱. یک ستون دارای trigger و نمودار نیرو جابجایی آن برای دو حالت با trigger و بدون trigger [6]

[7] Liu [7] ستونهای فولادی با سطح مقطع هشت ضلعی، شکل (۱۰-۱) را به صورت عددی بررسی کرد.

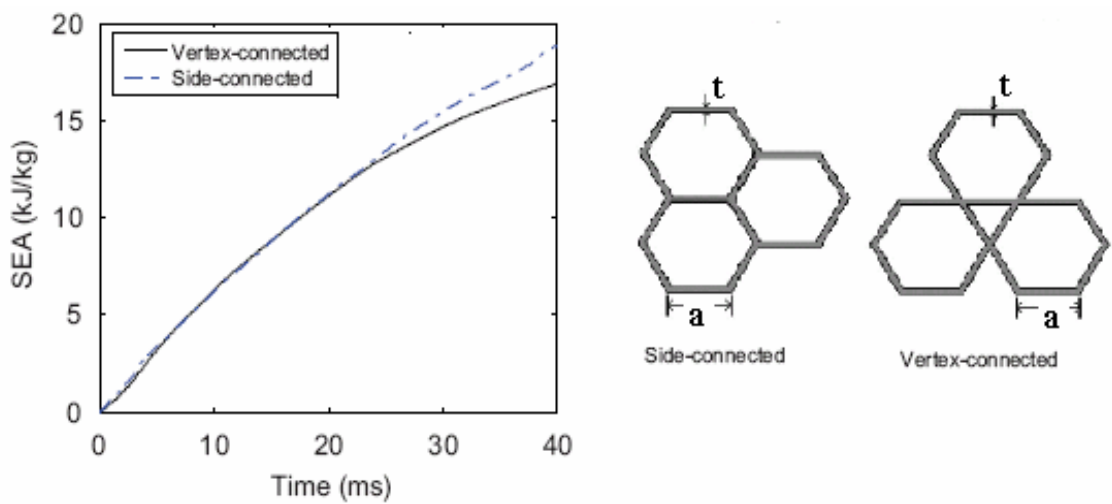
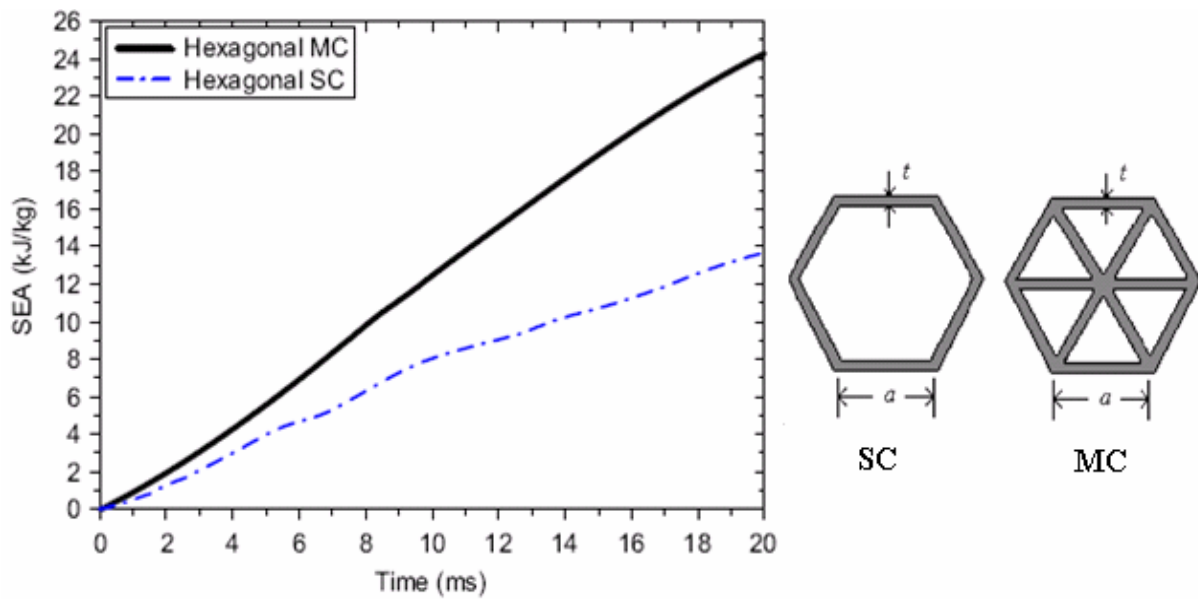
سپس به کمک برنامه RSM پارامترهای هندسی مقطع را بهینه کرد.



شکل ۱۰-۱. نمودارهای سه بعدی انرژی و نیروی ماکزیمم کمناش بر حسب پارامترهای هندسی [7]

Hou [8] نیز مقاطع شکل (۱۱-۱) را به صورت عددی بررسی کرد و به کمک روش RSM

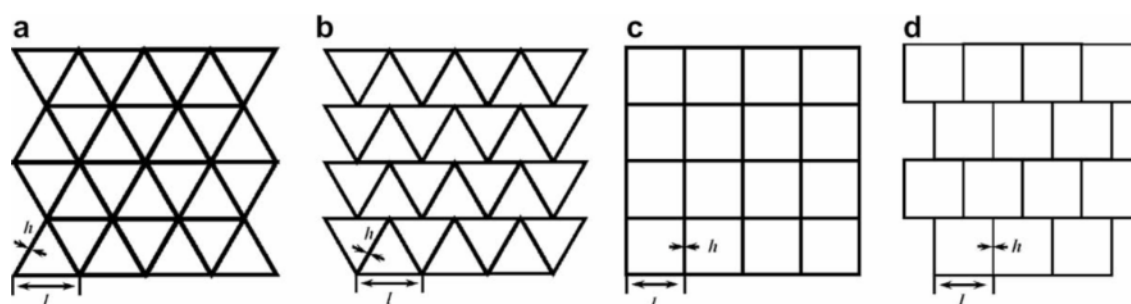
پارامترهای هندسی را بهینه کرد.



شکل ۱۱-۱. نمودار نیرو-جابجایی برای مقاطع شش ضلعی [8]

### ۴-۲-۱- جاذبهای لانه زنبوری

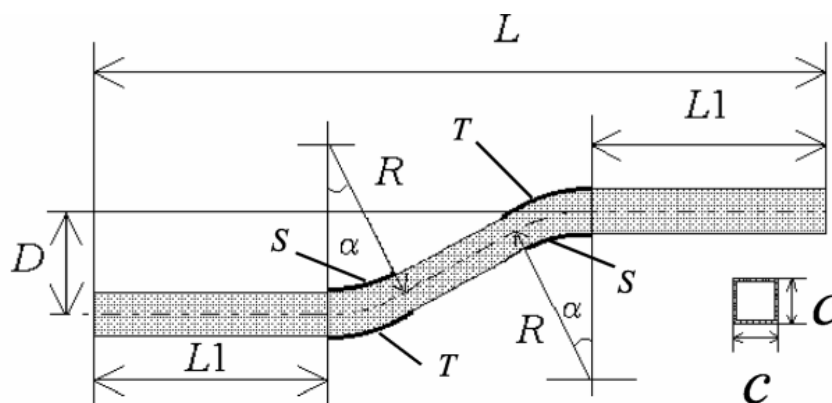
Liu [9] سازه های لانه زنبوری را با شکل های مختلف بررسی کرد شکلهای بررسی شده توسط آنها در شکل (۱۱-۱) آورده شده است. آنها نتیجه گرفتند که در ساختارهای لانه زنبوری مثلثی انرژی بیشتری نسبت به حالت مربعی جذب می شود و همچنین در حالت چیدمان شطرنجی نسبت به چیدمان مربعی منظم انرژی بیشتری جذب شده و جاذب، ارتفاع بیشتری تغییر شکل پیدا می کند.



شکل ۱-۱۲. ساختارهای کندوی عسلی. (a) مثلثی منظم، (b) مثلثی شطرنجی، (c) مربعی منظم، (d) مربعی شطرنجی. [9]

### ۵-۲-۱- جاذبهای S شکل دو بعدی

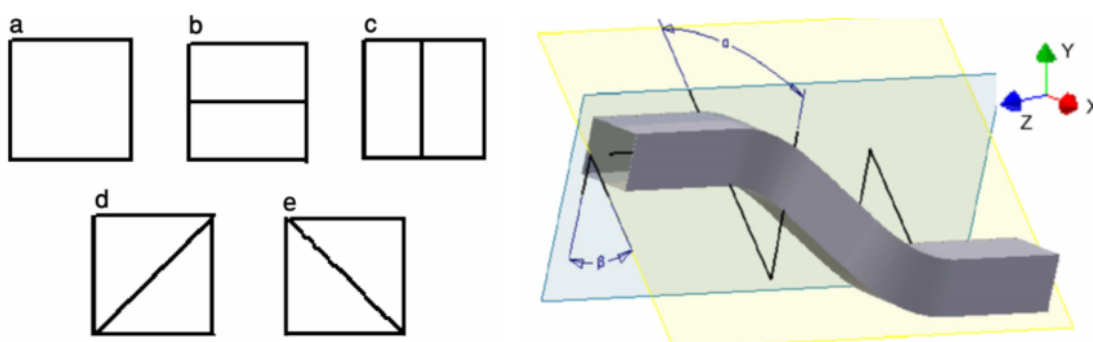
لوله های S شکل در حالت کلی نسبت به لوله های مستقیم انرژی کمتری جذب می کنند. Han [10] پارامترهای مختلف لوله S شکل را مطابق شکل (۱۳-۱) را بررسی کرد. آنها سپس اندازه بهینه هر کدام را بدست آوردند. Liu [7] نیز لوله های S شکل با مقطع هشت ضلعی را بررسی و بهینه کرد.



شکل ۱-۱۳. پارامترهای بررسی شده و بهینه شده توسط Liu [10]

### ۱-۲-۶- جاذبهای S شکل سه بعدی

این سازه ها جهت تامین فضای کافی در خودرو و کاهش ضربات وارده به سرنشینان در یک تصادف مورد استفاده قرار می گیرد. Zhang و همکارانش [11] مطابق با شکل (۱-۱۴) جاذبهای S شکل سه بعدی با مقاطع مختلف را بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که مقطع e به علت تحمل بیشتر در مقابل گشتاور خمشی انرژی بیشتری جذب می کند.

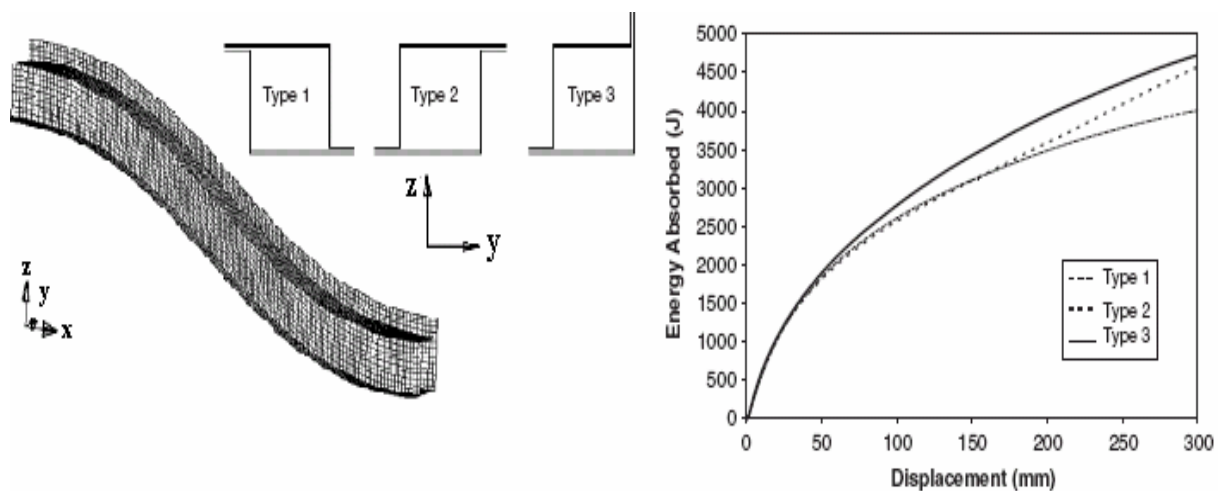


شکل ۱-۱۴. هندسه یک جاذب انرژی S شکل سه بعدی [11]

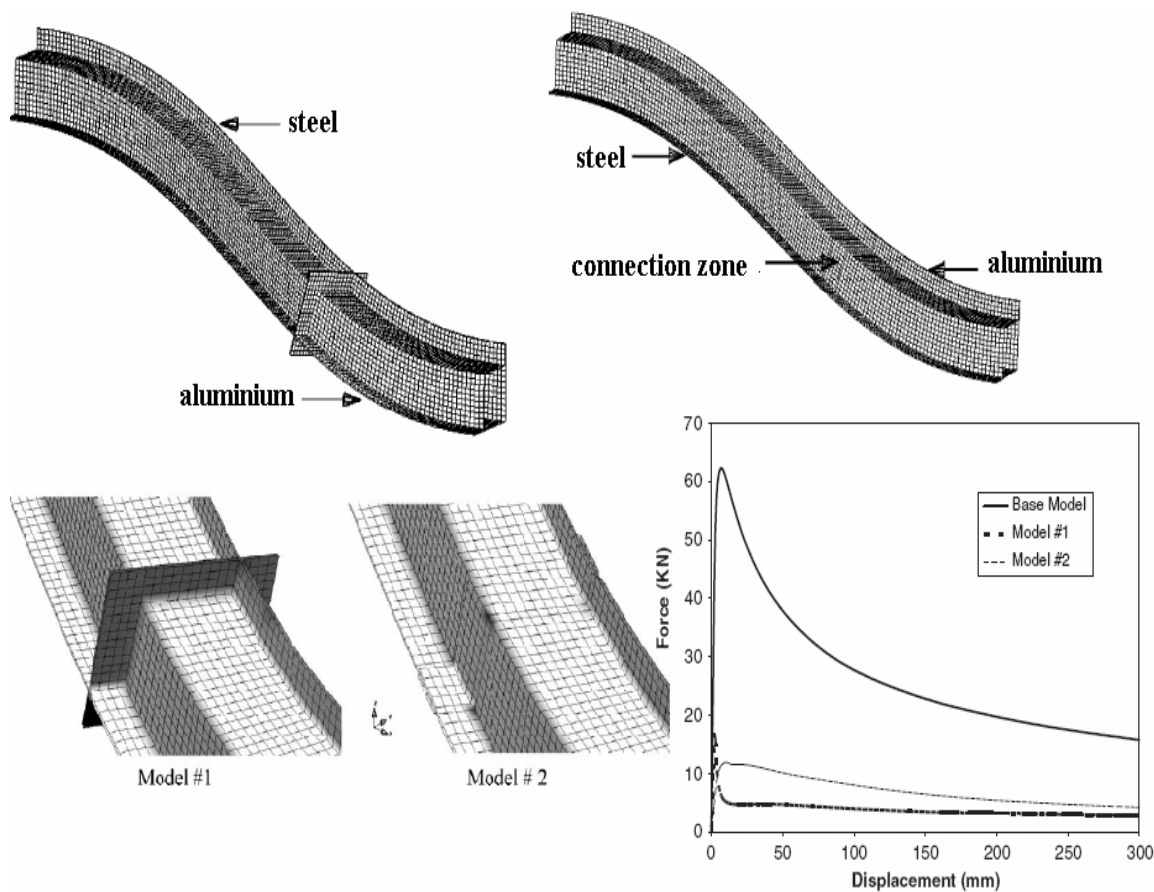
اسدی [12] تاثیر زاویه انحنا و دوران سازه های S شکل ساخته شده از آلومینیوم را به کمک نرم افزار Abaqus بررسی کرد.

Hosseini-tehrani et al. [13] مطابق شکل (۱-۱۵) مقاطع مختلف را برای جاذبهای S شکل سه بعدی بررسی کرد و نتیجه گرفتند که مقطع نوع ۳ بیشترین جذب انرژی را دارد.

آنها همچنین برای کاهش نیروی ماکزیمم کمانش، جاذب انرژی را مطابق با شکل (۱-۱۶) دو جنس آهن و آلومینیوم ساختند و نمودار نیرو جابجایی آن را با حالتی که تماماً از فولاد ساخته شده باشد مقایسه کردند و مشاهده کردند که نیروی ماکزیمم نمودار نیرو-جابجایی به میزان قابل توجهی کاهش می یابد.



شکل ۱-۱۵. نمودار انرژی جابجایی برای سه سطح مقطع متفاوت [13]



شکل ۱-۱۶. نمودار نیرو-جابجایی برای دو اتصال مختلف [13]

### ۷-۲-۱- جاذب های انرژی صفحه ای

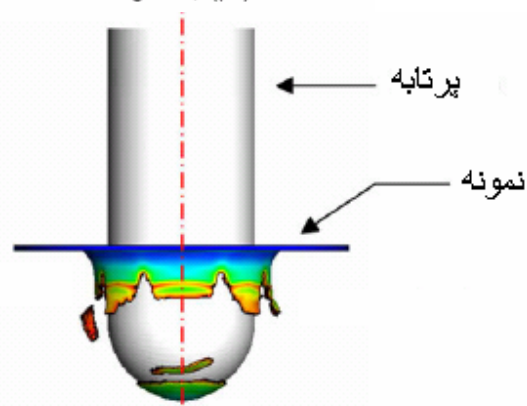
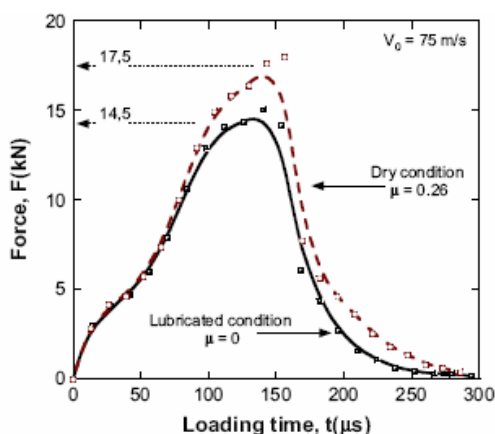
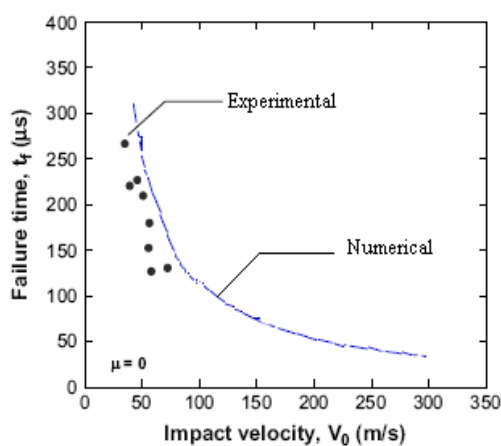
Rusinek [14] جاذبهای انرژی صفحه ای را بررسی کرد. وی مطابق شکل (۱-۱۷) با یک پرتابه نوک کروی با سرعت حداکثر ۱۰۰ متر بر ثانیه به یک صفحه فولادی به ضخامت ۰/۸ میلیمتر نیرو وارد کرد و نمودارهای آن را بررسی نمود و نتایج زیر را گرفت:

۱- اگر صفحه روغن کاری شود انرژی کمتری را نسبت به حالت خشک جذب می کند.

۲- با افزایش سرعت پرتابه گسیختگی در زمان کمتری اتفاق می افتد.

۳- با افزایش سرعت انرژی بیشتری جذب می شود

۴- با افزایش سرعت، شعاع گسیختگی بیشتر می شود.



شکل ۱-۱۷. شکل یک جاذب انرژی صفحه ایی و نمودارهای مربوط به آن [14]



### ۱-۲-۸- تغییر شکل لوله ها

به علت استفاده زیاد از لوله ها در اجزای سازه ها به نظر می رسد لوله ها متداولترین شکل و شاید قدیمی ترین نوع جاذبهای انرژی باشند. انرژی پلاستیک در لوله های فلزی جدار نازک در چندین حالت تغییر شکل، مستهلک می گردد که شامل موارد زیر است:

۱- وارونگی خارجی لوله های استوانه ای

۲- لهیدگی جانبی لوله های استوانه ایی

۳- لهیدگی محوری لوله ها همراه باشکافته شدن دیواره آنها

۴- تیرهای لوله ای تحت بار عرضی

۵- لهیدگی محوری لوله ها ( کمانش پیش رونده ) و لوله های اصلاح شده ( لوله ها جدار نازک شیاردار).

### ۱-۲-۸-۱- وارونگی لوله

یکی از حالت های جالب جذب انرژی، وارونگی است که وارونگی داخل به خارج یک لوله نازک با مواد نرم می باشد.

وارونگی لوله را بوسیله شعاع قالب می توان محدود کرد. اگر شعاع قالب کوچک باشد ، وارونگی لوله نتیجه خواهد داد و اگر شعاع لوله بزرگتر از اندازه مشخص باشد، شکافته شدن نتیجه خواهد داد.

Pedro [15] لوله های آلومینیومی را تحت بارگذاری شبه استاتیکی ( $1.17 \text{ mm/s}$ ) بررسی کرد. نمونه ای از نمودار نیرو - تغییر طول برای لوله آلومینیومی تحت بار شبه استاتیکی در شکل (۱-۱۸) آورده شده است. به طوری که از شکل پیداست؛ روند کلی تغییرات برای وارونگی از قسمتهای مشخص زیر تشکیل شده است.

OA: در ابتدا بار با نرخ نسبتا زیاد افزایش می یابد و به نقطه اوج A می رسد. در این مرحله انتهای لوله شروع به تغییر شکل می نماید.



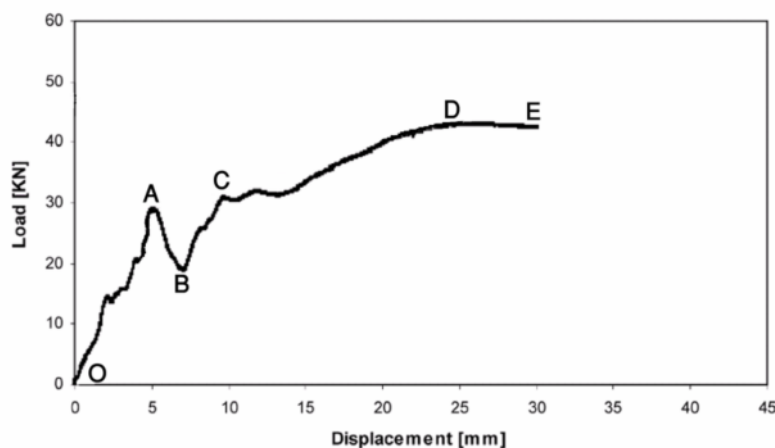
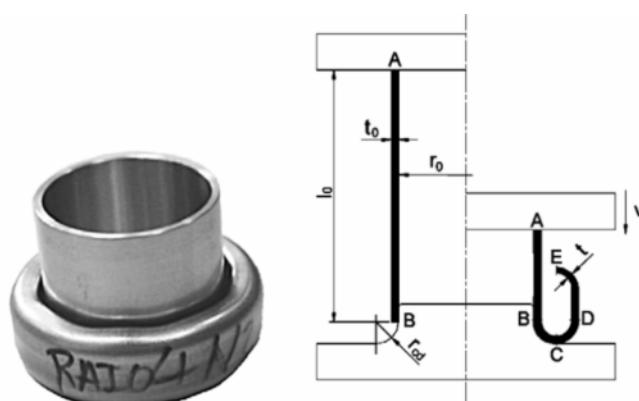
AB: پس از انطباق لوله با قالب، بار افت پیدا می کند.

BC: مجدداً بار ازدیاد می یابد و انتهای لوله شروع به حرکت به سمت بالا می نماید.

CDE: از نقطه C نیز نیرو شروع به افزایش می کند. در عمل انتهای لوله پیچیده شده، به گونه ای که با

سطح داخلی یا خارجی لوله تماس پیدا می کند و پس از آن موازی با دیواره لوله شروع به وارونگی (بالا

رفتن) می نماید.



شکل ۱-۱۸. نمودار نیرو - جابجایی و حالت تغییر شکل یافته برای لوله دایروی ( $\frac{t_0}{r_0} = 0.11$  ,  $\frac{r_{cd}}{r_0} = 0.278$ ) از جنس

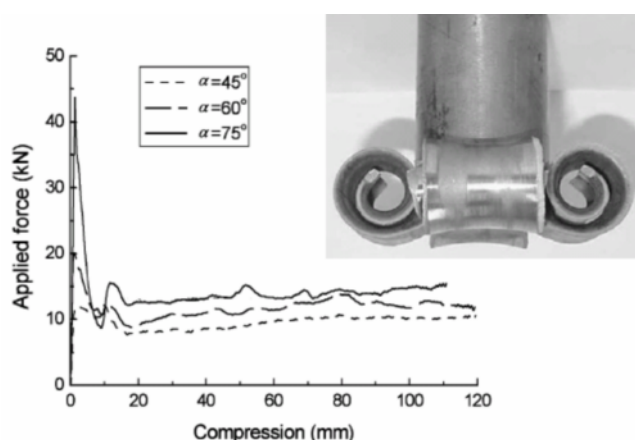
آلیاژ آلومینیوم (AL6060) برای حالت وارونگی به طرف خارج [15]

### ۱-۲-۸-۲-۱- لهدگی لوله ها همراه با شکافته شدن دیواره آنها

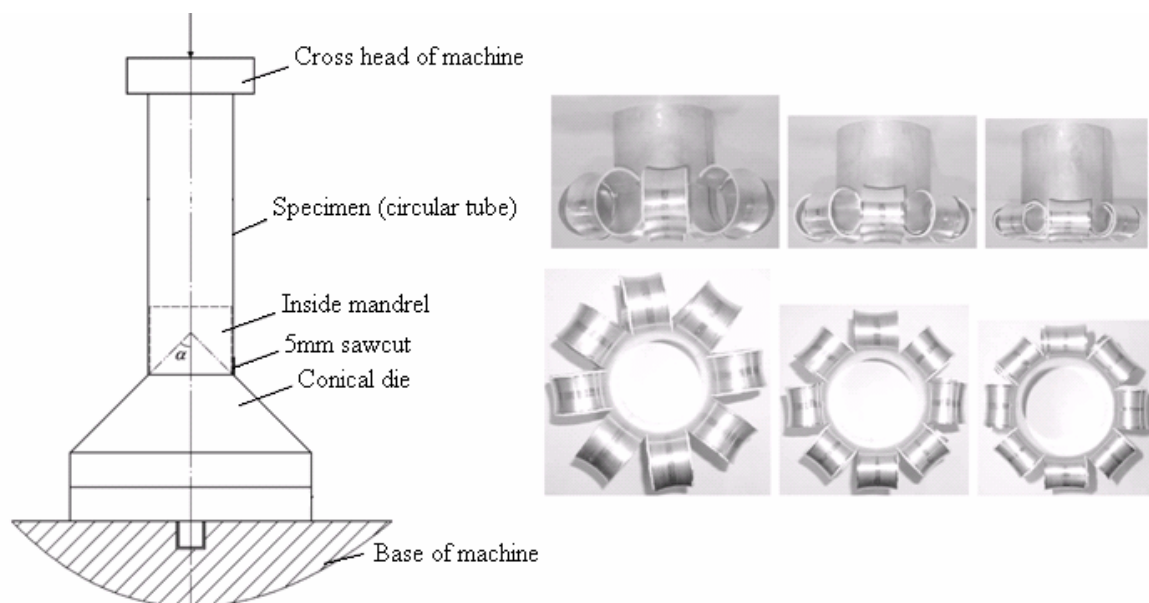
حالت شکافته شدن یک حالت خاص از وارونگی لوله است که در آن شعاع قالب به حد کافی بزرگ است

که به جای وارونگی، لوله دچار شکافته شدن می شود. یکی از پارامترهای طراحی ضربه گیرها، طول

لهیدگی می باشد. برای این منظور ضربه گیرهایی طراحی و محاسبه گردیده است که ضمن لهیدگی دیواره لوله در جهت طولی نیز شکافته شده و در مدت برخورد به دور خود می پیچد. از جمله خواص ویژه این روش، طول لهیدگی زیاد است که تا حدود ۱۰۰٪ طول اولیه می باشد. در مقایسه با لهیدگی محوری لوله ها، پدیده شکافته شدن و پیچیده شدن، همراه با نیروی نسبتاً زیاد اولیه برای شروع کمانش نخواهد بود. Huang [16] شکافته شدن لوله های دایروی آلومینیومی با قطر ۴۹/۶ و ضخامت ۱/۶ میلیمتر را به صورت تجربی و تئوری بررسی کرد. این لوله ها به صورت شبه استاتیکی (0.0333 mm/s) توسط یک صفحه صلب و چند مخروط به عنوان ماتریس فشرده می شوند که روی هر لوله در ابتدا برش هایی به طول ۵ میلیمتر زده می شود و یک راهنمای استوانه ای برای جلوگیری از واژگون شدن لوله در راس مخروط گذاشته می شود. در شروع فشردگی ترکها رشد کرده و به صورت حلقه در می آیند، شکلهای (۱۹-۱) و (۲۰-۱).



شکل ۱۹-۱. نمودار نیرو-جابجایی برای لوله های فولادی در حین شکافته شدن [16]



شکل ۱-۲۰. نحوه بارگذاری لوله دایروی برای شکافته شدن توسط ماتریس مخروطی [16]

در این سیستم استهلاک انرژی به صورتهای زیر انجام می شود :

- انرژی شکست برای شکافته شدن دیواره لوله

- انرژی تغییر شکل پلاستیک برای حلقه ها

- انرژی سایشی بین حلقه های تشکیل شده و سطح خارجی لوله

از مزایای کاربرد قالب در کارهای عملی می توان موارد زیر را نام برد :

- با انتخاب شعاع حلقه شدن، نیروی محوری  $P$  را می توان کنترل نمود .

- با انتخاب قالب مناسب می توان نیروی  $P$  را پایدارتر نمود.

### ۱-۲-۸-۳- لهیدگی شعاعی لوله های فلزی تحت بار خارجی

Olabi [17] لوله های فولادی را مطابق شکل (۱-۲۱) به صورت تجربی و عددی بررسی کرد به طوری که

از شکل نیز پیداست در حالیکه لوله تحت فشار خارجی در امتداد قطر توسط دو سطح صاف قرار می

گیرد؛ پس از کمانش خط تماس صفحه و لوله جدا شده و با افزایش تغییر شکل از هم دور می شوند در

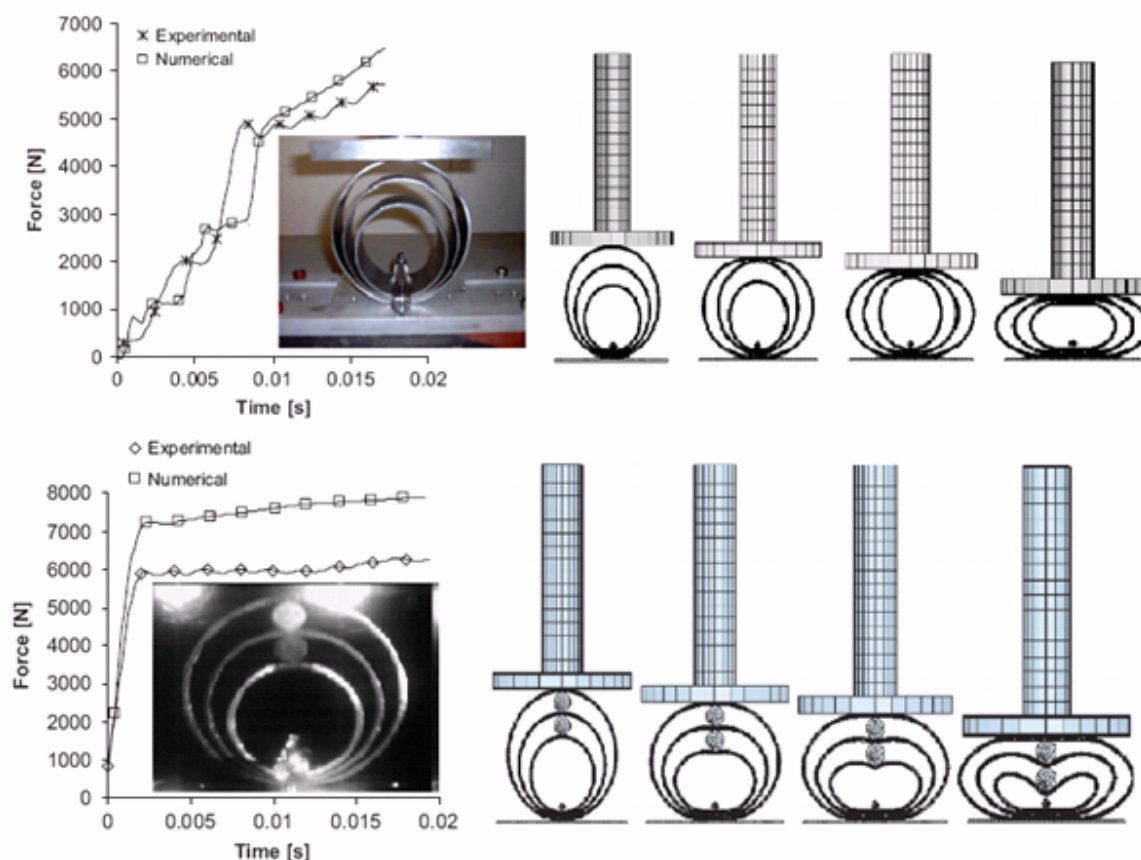
نتیجه بازوی ممان نسبت به لولا های پلاستیک کم می شود. بدین ترتیب در این نوع تغییر شکل، برای ادامه تغییر شکل بار بیشتری مورد نیاز است.

در حالتی که اگر پوسته استوانه ای، یا حلقه ای معادل آن دو نیروی خطی در امتداد قطر فشرده شود؛ بازوی ممان پس از فروریزش، زیاد می شود و در نتیجه نیرو در ادامه تغییر شکل کم می شود.

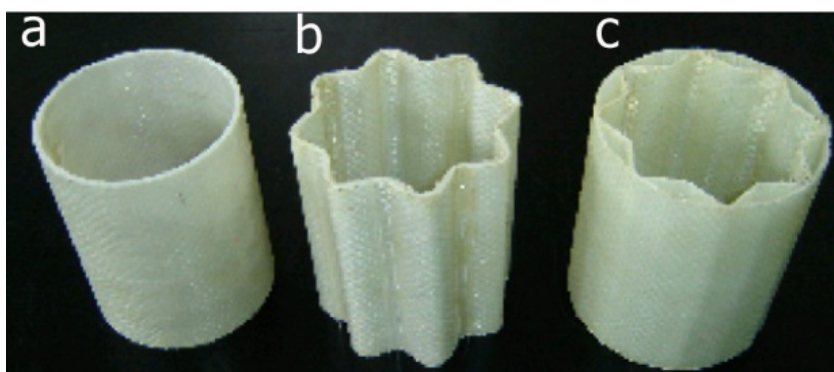
Olabi [17] برای اینکه نمودار نیرو - جابجایی یکنواخت تری بدست آورد از میله های فولادی تو پر مطابق شکل (۱-۲۱) استفاده کرد و همانگونه که مشاهده می شود، نمودار نیرو جابجایی رفتار کاملاً یکنواختی دارد.

Abdewi [18] در یک کار تجربی انرژی جذب شده توسط لوله های کامپوزیتی موجدار (شکل ۱-

۲۲) را در دو حالت بارگذاری محوری و شعاعی را بررسی و مقایسه کرد.

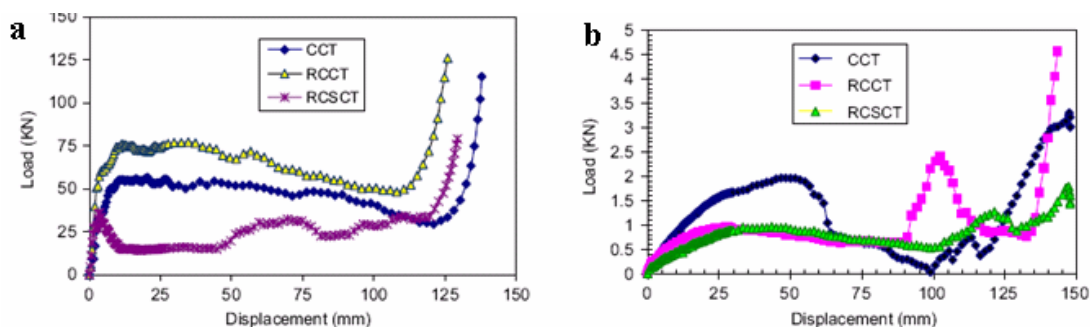


شکل ۱-۲۱. نحوه بارگذاری و نمودار نیرو - جابجایی برای بارگذاری شعاعی لوله های دایروی [17]

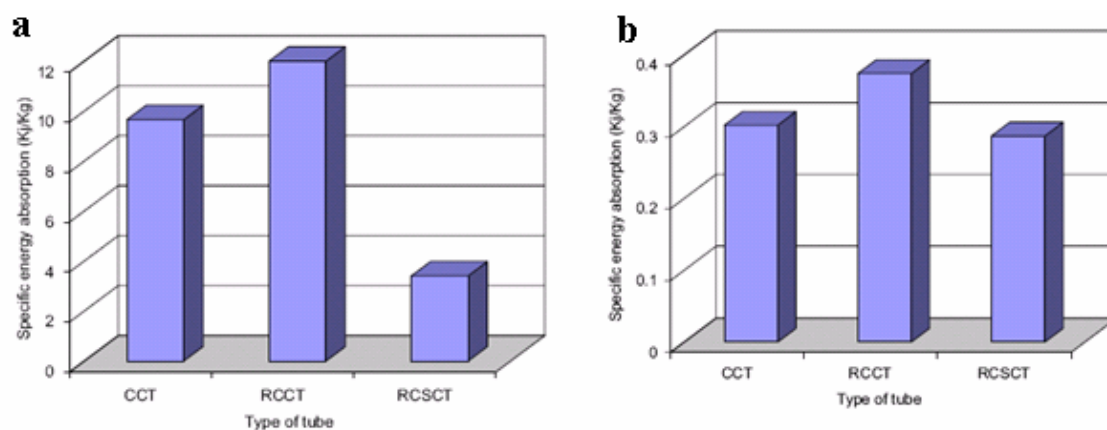


شکل ۱-۲۲. انواع نمونه های آزمایش شده: (a) CCT, (b) RCCT, (c) RCSCT [18]

از شکلهای (۱-۲۳) و (۱-۲۴) نتیجه گرفته شد که میزان انرژی جذب شده کامپوزیت بررسی شده در حالت بارگذاری محوری حدود ۳۰ برابر انرژی جذب شده در حالت بارگذاری عرضی می باشد. شکل (۱-۲۵) تغییر شکلهای حاصل از دو بارگذاری را نشان می دهد.



شکل ۱-۲۳. نمودار نیرو-جابجایی در حالت بارگذاری (a) محوری و (b) شعاعی [18]



شکل ۱-۲۴. نمودار میله ایی انرژی جذب شده برای حالت بارگذاری (a) محوری و (b) شعاعی. [18]

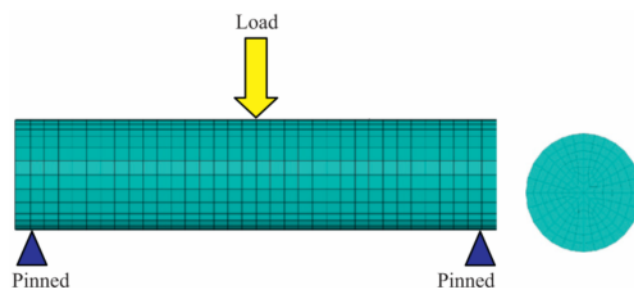


شکل ۱-۲۵. تغییر شکلهای حاصل از دو تغییر شکل محوری و شعاعی. [18]

### ۱-۲-۸-۴- لوله ها تحت بار عرضی

توسط Lu [19] لوله تنها با تکیه گاه ساده، گیردار و حتی در حالت دو انتها آزاد، تحت بار عرضی

مطابق شکل (۱-۲۶) به عنوان ضربه گیر مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱-۲۶. بارگذاری عرضی لوله های جاذب انرژی. [19]

در ابتدا این بررسی و تحلیل برای استفاده از لوله در سپر خودرو انجام گرفت و آزمایشهای انجام

گرفته در این ارتباط نشان داد که این ضربه گیرها برای سپر خودرو مناسب نیست. در بررسیهای بعدی

نشان داده شد که این لوله ها، ضربه گیرهای مناسبی برای سازه های دریایی می باشند. در حالتیکه لوله در جهت محوری آزاد است، بار فروریزش همواره کمتر از حالت دو سرگیردار است .

#### ۱-۲-۸-۵- لهیدگی محوری لوله ها تحت بار محوری ( کمانش پیشرونده )

از ویژگیهای این نوع ضربه گیرها می توان ارزان بودن، در دسترس قرار داشتن و سهولت نصب آن را نام برد. از طرف دیگر یکی از مسائل ناخواسته ای که در ارتباط با این نوع ضربه گیرها پیش می آید، دشواری پیش بینی شیوه فروریزش آنها می باشد و با توجه به اینکه میزان جذب انرژی لوله ها، به مقدار زیادی بستگی به شیوه فروریزش (کمانش) آنها دارد و در نتیجه اگر شیوه فروریزش را نتوان به طور دقیق پیش بینی کرد، تعیین میزان جذب دقیق انرژی غیر ممکن خواهد بود . در ضمن طول لهیدگی این لوله ها نیز همواره درصدی از طول اولیه آنها بوده و امکان دستیابی به طول لهیدگی برابر با طول مسیر نخواهد بود . یک مرور تحقیقات صورت گرفته در این مورد به صورت خلاصه ارائه می گردد .

مطالعات تئوری معمولاً از اثرات دینامیکی ( لختی ) صرف نظر کرده ، با مساله به مانند یک مورد شبه استاتیکی که برای سرعتهای برخورد کم قابل قبول است ، رفتار می کنند .

Guillow [20] ، حالات تغییر شکل را به صورت زیر دسته بندی کرد :

- نامتقارن ( الماسی ) با تعداد متغیری لبه یا گوشه دایروی

- متقارن محوری

- حالت مرکب ( ترکیب دو حالت قبل )

- کمانش کلی یا اولر

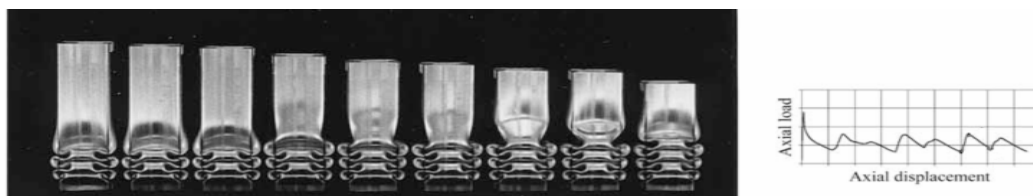
مشاهدات تجربی نویسندگان نشان می دهد که لوله های ضخیم ( با نسبت  $D/t < 80-90$  ) در حالت

متقارن محوری دچار کمانش می شوند، در حالیکه لوله های نازک ( با نسبت  $D/t$  بالا) در حالت الماسی (

غیر محوری نا متقارن ) گسیخته می شوند. برای مقادیر بالاتر  $D/t$  که حالت تغییر شکل الماسی تمایل به

وقوع دارد ، تعداد چینها با افزایش نسبت  $D/t$  افزایش می یابد. حالت تغییر شکل الماسی، انرژی کمتری را در مقایسه با حالت تغییر شکل متقارن جذب می کند .

DiPaolo [21] بر روی لوله های فولادی با سطح مقطع مربعی آزمایشهایی انجام داد. شکل (۱-۲۷) یک نمونه نمودار نیرو جابجایی را برای حالت شبه استاتیکی نشان می دهد. بطور کلی می توان گفت، نیروی محوری تا جاییکه اولین کمانش در یک مقدار نیروی بیشینه مشخص تشکیل شود، افزایش می یابد و نوسانهای بار - تغییر مکان بعدی مربوط به چینهای پیش رونده می باشد.



شکل ۱-۲۷. یک نمونه نمودار نیرو جابجایی برای لوله مربعی. [21]

پس از آن بسته به پارامترهای هندسی مانند نسبتهای  $L/D$ ،  $D/t$  و همچنین خواص مواد انواعی از حالت های فروریزش امکان پذیر است. نتایج تجربی نشان داده است که ارتفاع اولین پیک که بر اولین لولای پلاستیک منطبق است ، بسیار بیشتر از سایر پیکهای نیرو است . مطالعات انجام شده روی هر وسیله جذب انرژی نشان داده است که یکنواختی نیروی گسیختگی و افزایش پالس کاهنده از خواص مطلوب می باشد .

دستیابی به خواص فوق می تواند با هدایت ممان پلاستیک بیشینه که عامل گسیخت سازه می باشد، برای رخ دادن در موقعیتهای مشخص در طول لوله، حاصل گردد. تحقیقات انجام شده برای مطالعه روشهای کنترل مکانیزم تغییر شکل اندک بوده و در این زمینه نیاز به انجام تحقیقات جدید، جدی و ضروری به نظر می رسد در ادامه لوله استوانه ای جدار نازک شیار دار برای حصول نتیجه فوق معرفی می گردد .



صادقی و همکاران [۲۲] تأثیر پارامترهای هندسی در جذب انرژی لوله های شیاردار را، به صورت عددی به کمک نرم افزار Abaqus بررسی کردند. نمونه های شبیه سازی شده با طول و فواصل شیار گوناگون مدلسازی و آنالیز شده و از نظر میزان جذب انرژی، نیروی ماکزیمم کمانش، چگونگی تغییر شکل پلاستیک، چگونگی قرار گرفتن چین خوردگی ها بر روی هم و نمودارهای نیرو-جابجه جایی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از شبیه سازی با نتایج تجربی مورد مقایسه قرار گرفته و تطابق نسبتاً خوبی میان آنها بدست آمد. نتایج نشان دادند که منحنی نیرو-جابجایی، نیروی آغاز لهیدگی، نوع تغییر شکل پلاستیک و انرژی جذب شده توسط لهیدگی محوری لوله ها می تواند به وسیله معرفی شیارها با فاصله متغیر کنترل شود.

Daneshi [23] با ابتکاری جالب توانستند حالت تغییر شکل متقارن را از لوله های شیاردار گزارش دهند. آنها از شیارهای متناوب داخل و خارج برای دستیابی به یک روش در کنترل حالت کمانش و مشخصات جذب انرژی و همچنین یکنواختی نیرو در منحنی نیرو - جابجایی استفاده کردند. آنها بر روی لوله های استوانه ای جدار نازک از جنس فولاد ساختمانی تجاری شیارهای متناوب داخل و خارج مطابق شکل (۱-۲۸) ایجاد کردند. شیارها به عرض ۳ میلی متر و عمق ۱ میلی متر می باشد. آنها برای حصول اطمینان از تغییر شکل متقارن، تعداد شیارها را فرد و اولین شیار را در جدار داخلی لوله در نظر گرفتند. طول نمونه ها  $L$ ، نسبتی از فاصله بین شیارها  $l$  می باشد نمونه ها را در شرایط محیطی معمولی و یکسان بین دو صفحه تخت فولادی دستگاه تست، بدون هیچ قید اضافی تحت بار شبه ایستا قرار دادند و انرژی جذب شده و بارهای لهیدگی متوسط را با محاسبه سطح زیر منحنی نیرو - جابجایی بدست آوردند.

آنها همچنین بر اساس مشاهدات تجربی خود نتیجه گرفتند که :

- رفتار لهیدگی با بکار گیری شیارها که سبب تشکیل لوله های پلاستیک در موقعیتهای مشخص می گردد قابل کنترل است.

- شیارها در فواصل کوتاه سبب تغییر شکل در حالت متقارن می گردد اما این شیارها در فواصل بزرگتر هیچ نقشی در کنترل و ایجاد تغییر شکل متقارن ندارد و همین مساله از محدودیتهای روش فوق است.

- لوله های شیاردار خواص مطلوب نیرو را در نقش جاذب انرژی از خود نشان می دهد حسینی پور و دانشی همچنین با استفاده از روشهای تحلیل، انرژی جذب شده و نیروی لهیدگی متوسط را برای لوله های شیاردار تحت بار محوری بدست آوردند.

$$E_t = \frac{\left[ \sqrt{3} \pi^2 \delta_0 D t'^2 + 6 \pi \delta_0 \lambda (\lambda t - wd) \right] l}{6 \lambda} \quad (14-1)$$

از برابری انرژی جذب شده با حاصلضرب نیروی متوسط در طول لهیدگی  $\Delta$ ، نیروی متوسط لهیدگی را بدست آوردند.

$$E_t = P_m \cdot \Delta \quad (15-1)$$

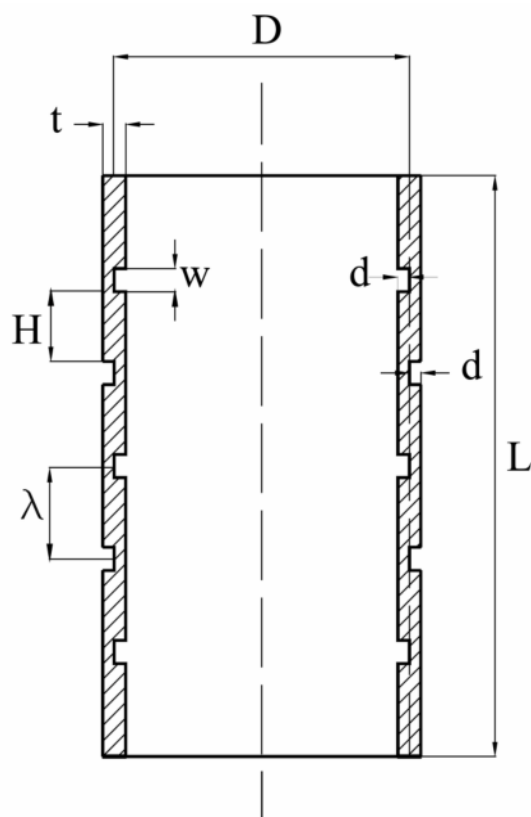
$$\Delta = L \left( 1 - \frac{t}{\lambda} \right) \quad (16-1)$$

$$P_m = \frac{\sqrt{3} \pi^2 \delta_0 \cdot D t'^2 + 6 \pi \delta_0 \cdot \lambda (\lambda t - wd)}{6 (\lambda - t)} \quad (17-1)$$

که در آن  $D$  قطر متوسط لوله،  $d$  عمق شیار،  $E_t$  کل انرژی جذب شده بوسیله لوله  $L$ : طول لوله،  $P_m$  نیروی لهیدگی متوسط،  $t$ : ضخامت جدار نازک،  $t'=t-d$ : ضخامت جدار در شیار،  $\Delta$ : طول لهیدگی کلی،  $H+W = \lambda$ : فواصل شیارها،  $\delta_0$ : تنش جریان و  $\sigma_Y$  تنش تسلیم.

آنها در تحلیل خود و با مقایسه آن با نتایج تجربی به این نتیجه رسیدند که اگر در معادلات خود از

تنش تسلیم استفاده کنند نتایج تجربی با معادلات تحلیلی تطابق بهتری خواهد داشت.

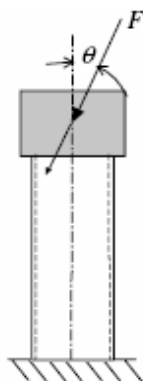


شکل ۱-۲۸. لوله استوانه ای جدار نازک شیار دار برای کنترل کمانش. [21]

### ۱-۲-۸-۶- کمانش لوله ها در بارگذاری مایل

سازه های جدار نازک به طور گسترده ای برای جذب انرژی های ضربه ای مورد استفاده قرار می گیرند. مقالات منتشر شده در این زمینه بیشتر مربوط به بارگذاری محوری می باشند. اما در عمل سازه های بسیار کمی تحت بارگذاری محوری قرار می گیرند؛ به خصوص سازه های جاذب انرژی در خودروها که تحت بارگذاری فشاری غیر محوری و برخورد مایل می باشند. بنابراین بحث و بررسی چگونگی پاسخ جاذب انرژی تحت بارگذاری مایل بسیار مهم و ضروری است. محمدی پور [۲۴] مطابق شکل (۱-۲۹) به بررسی چگونگی جذب انرژی تحت بارگذاری محوری و خمشی پرداخت و پس از بررسی این دو نوع برخورد به کمک شبیه سازی کامپیوتری توسط نرم افزار Abaqus به بررسی و تحلیل جذب انرژی سازه های جدار نازک تحت بارگذاری مایل پرداخت. نتایج شبیه سازی

کامپیوتری سازه های جدار نازک تحت بارگذاری مایل با نتایج تجربی دیگر مراجع مقایسه شد و دقت خوبی به دست آمد. نتایج شبیه سازی کامپیوتری و تجربی نشان می دهد که میزان جذب انرژی لوله های جدار نازک با زاویه برخورد کاهش می یابد.



شکل ۱-۲۹. نحوه اعمال بارگذاری مایل به یک لوله

Reyes و همکارانش [25] لوله های مربعی فوم دار و بدون فوم را به صورت عددی و تجربی بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که انرژی جذب شده لوله های فوم دار نسبت به لوله های غیر فوم دار بیشتر می باشد ولی انرژی جذب شده بر واحد جرم لوله های فوم دار نسبت به لوله های توخالی کمتر می باشد.

## فصل دوم

مروری بر تحقیقات انجام شده بر روی  
مقاطع نقطه جوش شده

## ۱-۲- مقدمه

در تصادفات قسمت زیادی از انرژی برخورد، توسط تغییر شکل بدنه اتومبیل جذب می شود. با توجه به نوع تصادفات قسمتهای مختلف بدنه اتومبیل، به صورت محوری و یا مایل مورد اعمال نیرو قرار می گیرند. قابلیت جذب انرژی بالا و همچنین انتقال نیروی اولیه کم، همواره از موضوعات مورد بررسی محققین بوده است.

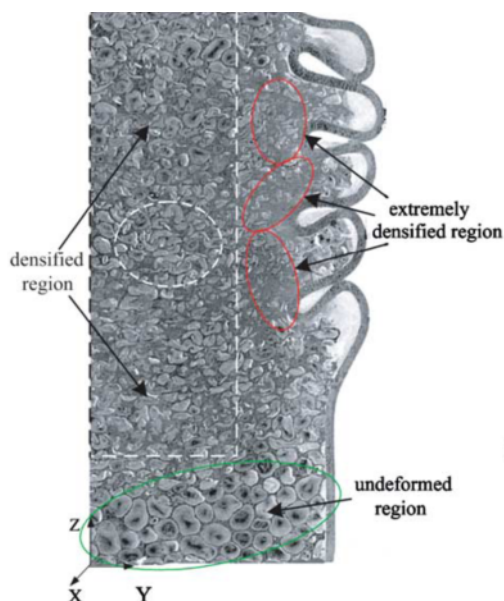
با نگاهی به بدنه خودروها می توان مشاهده کرد که قسمتهای زیادی از بدنه اتومبیل ها توسط نقطه جوش به هم متصل شده است. از مزیت های نقطه جوش می توان به ارزان بودن، سریع بودن، عدم نیاز قطعات به آماده سازی قبل از عملیات جوش کاری، قابل کنترل بودن، قابل انجام بودن توسط دستگاه های خودکار و محکم بودن اتصالات را عنوان کرد.

در ادامه آخرین تحقیقات انجام شده در مورد جاذبه های انرژی ساخته شده توسط نقطه جوش بررسی می شوند.

## ۱-۲- تحقیقات انجام شده بر روی مقاطع نقطه جوش شده

White [26] و همکارانش یک مطالعه تحلیلی بر مقدار بار میانگین کمانش سازه های جدار نازک نقطه جوش شده انجام دادند. آنها از تئوری Superfolding برای پیش بینی بار میانگین کمانش استفاده کردند. نتایج تحلیلی آنها مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی و عددی داشت.

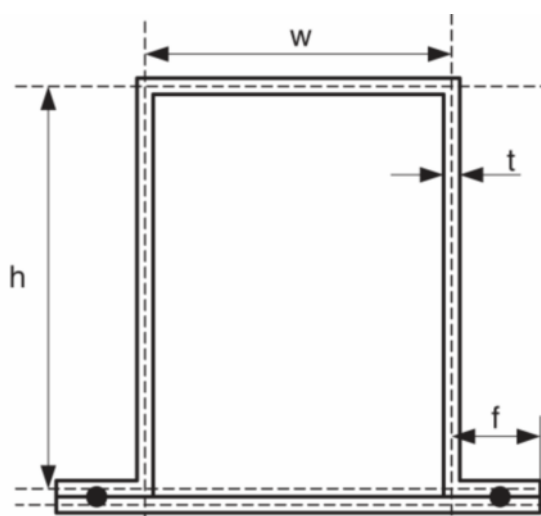
Song و Fan [27] میزان انرژی جذب شده توسط سازه های نقطه جوش شده و پر شده با فوم و بدون فوم را به صورت عددی، تحلیلی و تجربی بررسی کردند. آنها همچنین چگالی فوم داخل این سازه ها را بعد از چین خوردگی بررسی کردند. آنها فوم داخل این ستون ها را به سه ناحیه تغییر شکل نیافته، متراکم شده و بسیار متراکم تقسیم کردند. شکل (۱-۲) این ناحیه ها را نشان می دهد.



شکل ۲-۱. تغییر چگالی فوم در داخل یک ستون نقطه جوش شده بعد از چین خوردگی [27]

Wang و Xiange [28] قابلیت جذب انرژی ستون نقطه جوش شده شکل (۲-۲) را بررسی کردند. و سپس به کمک (RSM) Response Surface Methodology پارامترهای هندسی و تعداد نقطه جوش های مقطع فوق را بهینه کردند.

آنها برای بهینه سازی پارامترهای هندسی و تعداد نقطه جوش دو الگوریتم پیشنهاد دادند. در الگوریتم اول آنها پیشنهاد دادند که ابتدا در حالت جوش کامل، پارامترهای هندسی مورد نظر بهینه شوند.



شکل ۲-۲. هندسه یک جاذب انرژی نقطه جوش شده [28]

سپس سازه حاصل از که با پارامترهای بهینه، را با تعداد نقطه جوش متفاوت بررسی کنند. آنها حداقل تعداد نقطه جوشی که شرایط تابع هدف بهینه سازی، را برآورده کرد را به عنوان تعداد نقطه جوش بهینه انتخاب کردند.

در الگوریتم دوم آنها پیشنهاد دادند که برای تعداد نقطه جوش مختلف، عملیات بهینه سازی را انجام دهند. سپس نتایج را با هم مقایسه کنند و هر کدام که با کمترین تعداد نقطه جوش، شرایط تابع هدف بهینه سازی را برآورده کرد آن تعداد نقطه جوش را به عنوان تعداد نقطه جوش بهینه برگزینند.

آنها با مقایسه نتایج دو الگوریتم فوق به این نتایج رسیدند که جوابهای هر دو با تقریب بسیار خوبی با هم مطابقت دارند. با توجه به اینکه در الگوریتم دوم، تحلیل های عددی بسیار زیادتری نسبت به الگوریتم اول انجام می شود آنها الگوریتم اول را به عنوان الگوریتم مناسب برای بهینه سازی سازه فوق انتخاب کردند. خلخالی [۲۹] نیز به کمک الگوریتم ژنتیک این سازه ها را بهینه کرد و نتیجه به دست آمده مطابقت خوبی با مدل سازی به کمک نرم افزار Abaqus داشت.

Han Lee [30] و همکارانش قابلیت جذب انرژی ستونهای جدار نازک ساخته شده توسط پرچ و چسب و نقطه جوش را به صورت تجربی بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که ستونهای ساخته شده توسط پرچ انرژی بیشتری نسبت به ستونهای ساخته شده توسط چسب جذب می کنند. همچنین ستونهای ساخته شده توسط نقطه جوش نیز انرژی بیشتری نسبت به ستونهای ساخته شده توسط پرچ دارند.

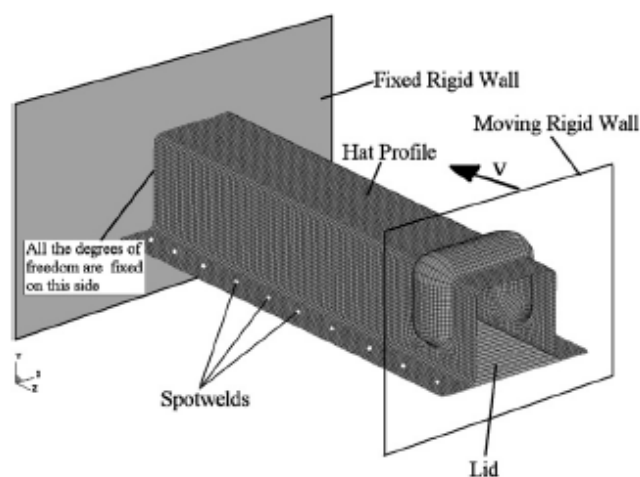
آنها همچنین برای ساختن ستون فوق از دو ورق متفاوت فولادی و آلومینیومی استفاده کردند و مشاهده کردند که انرژی جذب شده توسط این ستون بالاتر از ستونی است که تنها توسط ورق فولادی ساخته شده باشد.

Wang [31-32] و همکارانش یک راه حل تحلیلی برای محاسبه بار میانگین کمانش سازه های نقطه جوش شده و پر شده با فوم انجام دادند. آنها همچنین اثر متقابل بین فوم و پوسته را نیز بررسی کردند.



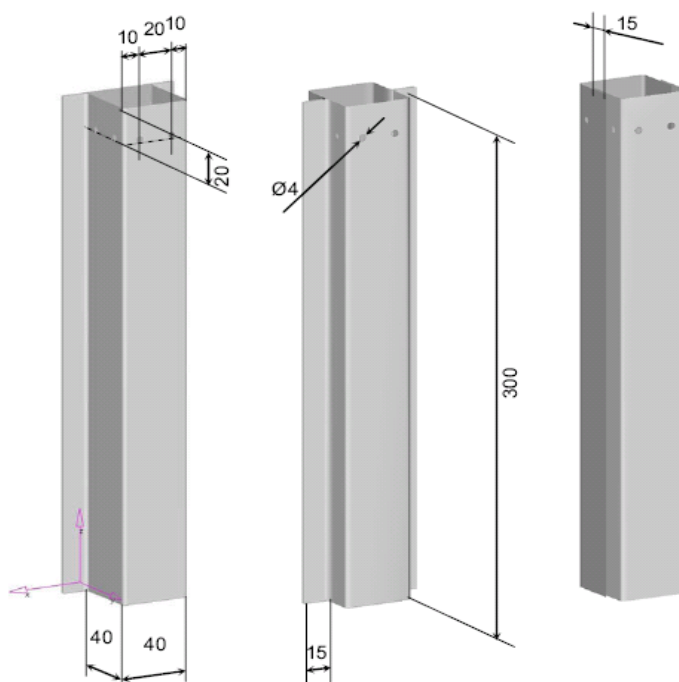
آنها ابتدا توسط نتایج آزمایشگاهی الگویی برای تغییر شکل این سازه ها ارائه کردند. سپس با استفاده از این الگو و روش انرژی و همچنین راه حل ارایه شده توسط white [22] راه حل تحلیلی خود را ارائه دادند. سپس نیروی میانگین کمانش بدست آمده توسط این فرمول را با نتایج آزمایشگاهی مطابقت دادند. Jones و Schneider [33] بر روی نحوه قرار گرفتن چین خوردگی ها بر روی هم تحقیقاتی انجام دادند و نحوه تاثیرچیدمان نقطه جوش ها را بر روی چین خوردگی بررسی کردند.

Karadeniz و Gumruk [34] برای کم کردن نیروی ماکزیمم کمانش از کنترل کننده استفاده کردند. شکل (۳-۲) این کنترل کننده را نشان می دهد. آنها نتیجه گرفتند که با تغییر مکان و اندازه این کنترل کننده می توان نیروی ماکزیمم کمانش و تغییر شکل این سازه را کنترل کرد. آنها همچنین نتیجه گرفتند که افزایش ارتفاع این کنترل کننده نیروی ماکزیمم کمانش را کاهش می دهد. شعاع قوس این کنترل کننده تاثیر قابل توجهی در کاهش نیروی ماکزیمم کمانش دارد.



شکل ۳-۲- یک جاذب انرژی نقطه جوش شده (hat section) همراه با کنترل کننده [34]

Peroni [35] در یک کار تجربی مقاطع مختلف نقطه جوش شده و همچنین جوش شده توسط لیزر را در بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی با هم مقایسه کرد. در شکل (۴-۲) هندسه نمونه های مورد بررسی قرار گرفته توسط وی نشان داده شده است.



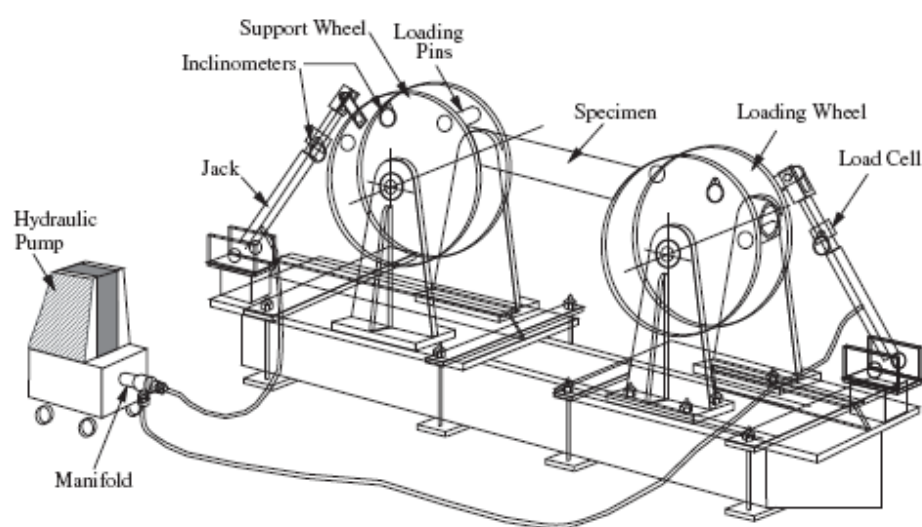
شکل ۲-۴. هندسه های مورد مطالعه شده توسط پرونی [35]

او همچنین مقاطع مختلف را با چسبهای صنعتی با هم متصل کرد و انرژی جذب شده توسط آن را با نقطه جوش و جوش لیزر مقایسه کرد. او نتیجه گرفت که در بارگذاری دینامیکی انرژی جذب شده بیشتر می باشد. وی همچنین نتیجه گرفت جوش لیزر انرژی بیشتری را نسبت به نقطه جوش جذب می کند و همچنین در حالت اتصال با چسب انرژی جذب شده، کمتر از جوشکاری با لیزر و بیشتر از نقطه جوش می باشد علاوه بر این نتیجه گرفت با افزایش مقاومت برشی چسب انرژی بیشتری توسط جاذب، جذب می شود.

Gumruk و Karadeniz [36] بیان کردند که ورقهایی که توسط فرایند کشش عمیق ساخته می شوند دارای تنش های پسماند می باشند. آنها تاثیر این تنش ها را بر قابلیت جذب انرژی ستونهای ساخته شده توسط نقطه جوش بررسی کردند. آنها همچنین کرنش های پلاستیک، تغییر ضخامت، نیروی میانگین کمانش و انرژی جذب شده بر واحد جرم را در ستونهای جدار نازک ساخته شده توسط نقطه جوش

بررسی کردند. آنها نتیجه گرفتند که این تنشهای پسماند تاثیر چندانی بر قابلیت جذب انرژی این سازه ها ندارد.

Grzebie و Bambach [37] ستونهای جدار نازک ساخته شده توسط نقطه جوش دارای گشودگی و بدون گشودگی را تحت خمش خالص به صورت تجربی و تحلیلی بررسی کردند. شکل (۲-۵) فیکسچری که آنها مورد استفاده قرار دادند را نشان می دهد.



شکل ۲-۵. شکل یک فیکسچر برای اعمال خمش خالص به یک ستون جدار نازک [37]

آنها تغییر شکل این سازه ها را به سه مرحله تغییر شکل الاستیک، تغییر شکل پلاستیک جزئی و تغییر شکل پلاستیک تقسیم بندی کردند. که در تغییر شکل پلاستیک چین خوردگی و مچالگی ستون دیده می شود.



فصل سوم

تحلیل‌های عددی



## ۳-۱ مقدمه

افزایش نیازهای بشر و تلاش برای برآورده ساختن آنها، منجر به خلق مسائل تازه و پیچیده‌ای در همه زمینه‌های علمی و فنی شده که حوزه مهندسی مکانیک و سازه نیز از این امر مستثنی نبوده است. در اغلب موارد، نیاز به طراحی و تحلیل قطعات با هندسه و خواص پیچیده تحت بارگذاری‌های نامنظم نیاز است و بکارگیری روشهای کلاسیک موجود (به عنوان مثال تئوری الاستیسیته در مورد توزیع تنش) منجر به یافتن معادلات حاکم بسیار پیچیده، با شرایط مرزی و اولیه متنوع، می‌شود؛ که عملاً حل این معادلات، از روش تحلیلی را غیر ممکن می‌سازد.

معمولاً مهندسان و فیزیکدانها یک پدیده فیزیکی را به وسیله دستگامی از معادلات دیفرانسیل معمولی و یا پاره‌ای<sup>۱</sup> که در محدوده خاصی صادق است و شرایط مرزی و آغازین مناسبی را تامین می‌کند توصیف می‌کنند. در واقع یک معادله دیفرانسیل با شرایط مرزی و اولیه مورد نیاز خود، یک مدل ریاضی کامل از یک پدیده است. برای یافتن توزیع متغیرهای مورد نظر که ارتباط آنها در فرم دیفرانسیلی توسط معادله حاکم بیان می‌گردد، می‌بایست معادله مذکور حل گردد تا بتوان مقادیر عددی هر کمیت مرتبط را در نقاط دلخواه بدست آورد. اما با توجه به اینکه تنها می‌توان اشکال بسیار ساده این معادلات آن هم در ناحیه‌های هندسی بسیار ساده را با روشهای تحلیلی حل نمود، در حل اغلب معادلات حاکم به روش تحلیلی با مشکل بزرگی مواجه هستیم.

برای مقابله با چنین مشکلاتی و نیز جهت استفاده از قدرتمندترین وسیله موجود در قرن حاضر یعنی کامپیوتر، ضروری است که مساله مورد نظر در یک قالب کاملاً جبری ریخته شود تا حل آنها تنها نیازمند عملیات جبری باشد. برای دستیابی به چنین هدفی می‌توان از انواع مختلف روشهای گسسته سازی یک مساله پیوسته تعریف شده به وسیله معادلات دیفرانسیل استفاده نمود. در این روشها تابع و یا

---

<sup>۱</sup> partial

توابع مجهول که می توان آنها را با مجموعه ای نامتناهی از اعداد نشان داد، به وسیله تعداد متناهی از پارامترهای مجهول جایگزین می گردند که طبیعتاً در حالت کلی نوعی تقریب را در بردارد. برای این منظور روشهای عددی متنوعی برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر سیستمها ایجاد و امروزه به طرز وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند. سه روش عمده در حل عددی یک معادله دیفرانسیل به شرح زیرند:

۱- روش تفاضل محدود<sup>۱</sup>

۲- روش تغییرات<sup>۲</sup>

۳- روشهای باقیمانده وزنی<sup>۳</sup>

بسته به نوع روش عددی مورد استفاده و نوع المان بندی، روشهای مختلفی نظیر حجم محدود<sup>۴</sup>، اجزای محدود<sup>۵</sup>، تفاضل محدود و ... حاصل شده است. هر کدام از روشهای فوق الذکر، در قالب نرم افزارهای متنوع به کاربران عرضه شده اند. روشی که در اغلب مسائل مکانیک جامدات مورد استفاده قرار می گیرد روش اجزای محدود است که در قالب نرم افزارهایی چون ANSYS ، ABAQUS ، NASTRAN و ... قابل استفاده است.

### ۳-۲- معرفی روش عددی اجزای محدود

روش قدرتمند اجزای محدود از دهه ۱۹۵۰ آغاز و با گسترش کامپیوترهای عددی رو به توسعه گذاشت. البته در گسترش این روش نمی توان از توانایی های آن در مقایسه با سایر روشها چشم پوشی نمود. روش اجزای محدود را می توان ترکیبی از روش تقریبی ریتز<sup>۶</sup> و اصل تغییرات که در مکانیک محیطهای پیوسته به کار می رود تصور نمود.

<sup>۱</sup> Finite Difference

<sup>۲</sup> Variational Method

<sup>۳</sup> Weighted Residual Methods

<sup>۴</sup> Finite Volume

<sup>۵</sup> Finite Element

<sup>۶</sup> Approximate Ritz method



روش اجزای محدود یک دستورالعمل عددی جهت حل مسایل فیزیکی می باشد که توسط معادلات دیفرانسیل توصیف می شوند. این روش دارای دو ویژگی است که آن را از سایر روشهای عددی متمایز می سازد:

- ۱- در این روش از یک فرمولبندی انتگرالی جهت ایجاد یک دستگاه معادلات جبری استفاده می شود.
- ۲- در این روش از توابع هموار و به طور قطعه ای پیوسته جهت تقریب کمیات مجهول استفاده می شود.

مشخصه دوم، روش اجزای محدود را از سایر روشهای عددی که فرمولبندی انتگرالی دارند، متمایز می کند. روش اجزای محدود را می توان به پنج مرحله اصلی تقسیم کرد:

۱- تقسیم ناحیه مورد بحث به تعداد زیادی زیر ناحیه کوچک موسوم به المان<sup>۱</sup>. نقاط اتصال المانها به یکدیگر، گره<sup>۲</sup> نامیده می شود.

۲- تعیین تقریب اولیه برای حل به صورت یک تابع با ضرایب ثابت مجهول که همواره یا خطی<sup>۳</sup> است و یا مرتبه دوم<sup>۴</sup>. پس از تعیین شدن مرتبه تقریب اولیه، معادله حاکم در هر گره نوشته می شود.

۳- استخراج دستگاه معادلات جبری. در صورت استفاده از روش گالرکین، تابع وزنی برای هر گره مشخص شده و سپس انتگرال باقیمانده وزنی تشکیل می گردد. با انتگرال گیری، برای هر گره یک معادله جبری ایجاد می گردد و پس از استخراج معادلات همه گره ها، دستگاه معادلات بوجود می آید.

۴- حل دستگاه معادلات ایجاد شده.

۵- محاسبه سایر کمیات از روی مقادیر گرهی.

در مرحله اول همانگونه که اشاره گردید، هندسه مساله به نواحی کوچکی موسوم به المان تقسیم

---

<sup>1</sup> Element  
<sup>2</sup> Node  
<sup>3</sup> Linear  
<sup>4</sup> Quadratic

می‌گردد. نقاط اشتراک المانها، گره‌ها می‌باشند. به مجموعه یک المان با گره هایش یک مش<sup>۱</sup> گفته می‌شود. المانها می‌توانند یک، دو و یا سه بعدی باشند. همچنین بسته به بعد المان، اشکال مختلف برای یک المان قابل تصور است. یک المان دو بعدی می‌تواند به شکل مثلث، مربع و یا شکل دلخواه دیگری باشد. از طرفی یک المان سه بعدی نیز می‌تواند اشکالی مانند چهار وجهی، هرم، منشور و یا مکعب داشته باشد. مش بندی هندسه مساله از مراحل مهم مدل سازی می‌باشد که مستلزم دقت و مهارت مناسب می‌باشد. در مرحله دوم، در واقع تقریب اولیه برای جواب مساله به صورت یک تابع با ضرایب ثابت مجهول در نظر گرفته می‌شود. این تقریب در محدوده یک المان زده می‌شود و برای کل شکل مساله انجام نمی‌گیرد. (به عنوان مثال  $u = c_1x + c_2$  یک تقریب خطی برای توزیع جابجایی در یک المان یک بعدی است.) در خصوص مسایلی که توسط نرم افزار حل می‌شوند، چون می‌توان ابعاد المانها را بسیار ریز انتخاب کرد، هیچ گاه تقریبی با درجه بیشتر از دو زده نمی‌شود. به عبارت دیگر تقریب اولیه برای جواب همواره در نرم افزارها یا خطی است و یا سهموی.

در مرحله بعد معادله حاکم برای تک تک گره ها نوشته شده و پس از انتگرال گیری‌های لازم، به فرم یک معادله جبری تبدیل می‌شود. برای روشن تر شدن موضوع به معرفی مفهوم تابع شکل<sup>۲</sup> می‌پردازیم. همانگونه که ذکر شد در یک تحلیل اجزای محدود ابتدا مقادیر گرهی کمیت مد نظر محاسبه می‌گردد و سپس با میان یابی در هر نقطه دلخواه می‌توان مقدار کمیت مجهول را بدست آورد. بنابراین می‌بایست مرتبه میان یابی معلوم باشد. همانگونه که در مرحله قبل اشاره گردید، یا خطی و یا مرتبه دو است.

یک المان خطی یک بعدی را در نظر می‌گیریم. اگر  $\varphi$  کمیت مجهول باشد که معادله حاکم بر حسب آن است، در این المان حل تقریبی و یا همان تابع میان یابی عبارتست از:

$$\varphi = a_1 + a_2x \quad (1-3)$$

<sup>1</sup> Mesh

<sup>2</sup> Shape Function

که در آن  $a_1$  و  $a_2$  مجهول می‌باشند. در صورتی که این المان بین دو گره  $i$  و  $j$  با موقعیت‌های  $X_i$  و  $X_j$  واقع شده باشد و مقادیر گرهی  $\phi$  برابر با  $\phi_i$  و  $\phi_j$  باشد، دو ضریب مجهول  $a_1$  و  $a_2$  قابل محاسبه‌اند.

$$\phi_i = a_1 + a_2 X_i \quad (2-3)$$

$$\phi_j = a_1 + a_2 X_j \quad (3-3)$$

که در نتیجه خواهیم داشت:

$$a_1 = \frac{\phi_i X_j - \phi_j X_i}{X_j - X_i} \quad (4-3)$$

$$a_2 = \frac{\phi_j - \phi_i}{X_j - X_i} \quad (5-3)$$

حال اگر مقادیر  $a_1$  و  $a_2$  را در رابطه اولیه قرار دهیم خواهیم داشت:

$$\phi = \left( \frac{X_j - x}{L} \right) \phi_i + \left( \frac{x - X_i}{L} \right) \phi_j \quad (6-3)$$

که در آن  $L$  طول المان است. رابطه بدست آمده فوق رابطه ای استاندارد برای میان یابی است زیرا ترکیب خطی مقادیر گرهی است که ضرایب آنها نیز تابعی خطی از  $X$  می‌باشند. این توابع خطی را با حرف  $N$  نمایش می‌دهند و آنها را توابع شکل می‌نامند. در واقع هر گره، تابع شکلی مخصوص به خود را دارد که بیانگر سهم مقدار گرهی آن گره در میان یابی می‌باشد. لذا توابع شکل به صورت زیر می‌باشند:

$$N_i = \frac{X_j - x}{L} \quad , \quad N_j = \frac{X_i - x}{L} \quad (7-3)$$

و رابطه میان یابی را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

$$\phi = N_i \phi_i + N_j \phi_j \quad (8-3)$$

چند نکته در خصوص توابع شکل قابل ذکر است. هر تابع شکل در محل گره خود دارای مقدار یک و در محل گره دیگر دارای مقدار صفر است. مجموع توابع شکل در یک نقطه همواره برابر یک است. همواره مرتبه توابع شکل و میان‌یابی یکسان است. به عنوان مثال اگر حل تقریبی یا همان میان‌یابی تابعی خطی

باشد، توابع شکل گره‌ها هم توابعی خطی خواهند بود. از دیگر ویژگی‌های توابع شکل این است که مجموع مشتقات آنها نسبت به یک متغیر (مانند  $X$ ) برابر صفر است.

### ۳-۲-۱- روش گالرکین

برای بیان روش گالرکین ابتدا به طور مختصر روشهای باقیمانده وزنی بیان می‌شود. این روش نیز شامل یک انتگرال می باشد. در این روش ابتدا یک تخمین برای جواب زده می‌شود و در معادله دیفرانسیل مربوطه قرار می‌گیرد. از آنجایی که تقریب اولیه در معادله صدق نمی‌کند، باقیمانده یا خطایی مانند  $R$  حاصل می‌شود. فرض کنید تابع  $y = h(x)$  در ابتدا به عنوان تقریب برای معادله دیفرانسیل زیر بکار رود:

$$D \frac{d^2 y}{dx^2} + Q = 0 \quad (9-3)$$

با قرار دادن تابع در معادله خواهیم داشت:

$$D \frac{d^2 h}{dx^2} + Q = R(x) \neq 0 \quad (10-3)$$

در روشهای باقیمانده وزنی می بایست رابطه زیر برقرار باشد:

$$\int_0^H W_i(x) R(x) dx = 0 \quad (11-3)$$

باقیمانده معادله در یک تابع وزنی ضرب شده است و انتگرال حاصلضرب می‌بایست برابر صفر باشد. تعداد توابع وزنی مورد نیاز برابر است با تعداد ضرایب مجهول در حل تقریبی. توابع وزنی مختلفی را می‌توان برای حل انتخاب نمود که در زیر به چند نوع مشهورتر آنها اشاره می‌شود:

۱- روش ترتیب<sup>۱</sup>: در این روش توابع ضربه انتخاب می‌شوند. این نوع انتخاب بیانگر این است که می‌

بایست در نقاط خاصی مقدار باقیمانده صفر باشد. تعداد این نقاط برابر تعداد ضرایب مجهول در حل تقریبی است.

<sup>۱</sup> Collocation Method

۲- روش تبعی<sup>۱</sup>: هر تابع وزنی برابر واحد  $W_i(x) = 1$ ، در یک ناحیه خاص انتخاب می شود، این نوع انتخاب بیانگر این که می بایست در طول فاصله ای از یک ناحیه، مجموع (انتگرال) باقیمانده ها برابر صفر گردد. تعداد فواصل انتگرال گیری برابر تعداد ضرایب نامعین در حل تقریبی است.

۳- روش گالرکین<sup>۲</sup>: در روش گالرکین همان تابعی که به عنوان حل تقریبی استفاده می شود، به عنوان تابع وزنی نیز استفاده می شود. این رهیافت، مبنای روش اجزاء محدود برای مسایل دارای مشتق مرتبه اول و بسیاری مسایل دیگر است.

۴- روش حداقل مربعات<sup>۳</sup>: در این روش مقدار خطای  $R$  به عنوان تابع وزنی استفاده می شود. بنابراین انتگرال زیر حاصل می شود:

$$Er = \int_0^H [R(x)]^2 dx \quad (۱۲-۳)$$

این میزان خطا نسبت به ضرایب نامعلوم موجود در حل تقریبی، مینیمم می شود. از روش حداقل مربعات نیز جهت فرموله کردن حل اجزای محدود استفاده می شود اما این روش به اندازه روش تغییرات و روش گالرکین مورد استفاده قرار نمی گیرد.

اکنون می توان روش گالرکین را بیشتر مورد بررسی قرار داد. ابتدا یک تخمین (به طور مثال  $u = c_1x + c_2$  در خصوص توزیع تغییر مکان در المان یک بعدی) برای معادله حاکم در نظر گرفته می شود. سپس با انتخاب تابع وزنی مناسب و به تعداد مجهولات موجود در تخمین اولیه، انتگرال حاصلضرب تابع وزنی و باقیمانده محاسبه می گردد که عبارتی بر حسب ضرایب نامعلوم تابع تقریب خواهد بود. در روش گالرکین، توابع وزنی همان توابع شکل می باشند. به طور مثال در یک المان خطی انتگرال حاصلضرب هر یک از توابع شکل در باقیمانده، محاسبه می گردد و در نهایت دو معادله با مجهولات  $\phi_j$  و  $\phi_j$  بدست می آید. (قبلا اشاره گردید که ضرایب  $a_1$  و  $a_2$  بر حسب مقادیر گرهی نوشته می شوند.) به

<sup>2</sup> Subdomain Method

<sup>3</sup> Galerkin's Method

<sup>4</sup> Least Squares Method

عبارت دیگر به ازای هر گره یک معادله بدست می آید. به دلیل اینکه هر معادله شامل بیش از یک مجهول است، به تنهایی قابل حل نخواهد بود و می بایست ابتدا به تعداد گره ها معادله استخراج شود تا آنگاه تمامی معادلات به صورت یکجا حل گردند. پس از استخراج معادلات نوبت به حل آنها می رسد که روشهای متنوعی برای حل موجود است. سپس در مرحله بعد و پس از مشخص شدن مقادیر گرهی، با توجه به ابعاد اولیه و خواص هندسی ماده تعریف شده، سایر کمیات نظیر کرنش، تنش، نیرو و گشتاور محاسبه می شوند [۳۸].

### ۳-۳- معرفی نرم افزار ABAQUS/CAE

ABAQUS یک مجموعه از برنامه های مدل سازی بسیار توانمند می باشد که مبتنی بر روش اجزای محدود، قابلیت حل مسایل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده ترین مدل سازی غیر خطی را دارا می باشد. این نرم افزار دارای مجموعه المانهای بسیار گسترده ای می باشد که هر نوع هندسه ای را می توان به صورت مجازی توسط این المانها مدل کرد. همچنین دارای مدل های مواد مهندسی بسیار زیادی است که در مدل سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیکها، پلیمرها، کامپوزیتها، بتن تقویت شده، فومهای فتری و نیز شکننده و همچنین مواد موجود در زمین نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می سازد. نظر به اینکه ABAQUS یک ابزار مدل سازی عمومی و گسترده می باشد، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل های مکانیک جامدات و سازه (تنش - تغییر مکان) نمی شود. با استفاده از این نرم افزار می توان مسایل مختلفی نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل حرارتی اجزای الکتریکی، اکوستیک، مکانیک خاک و پیرو الکتریک را مورد مطالعه قرار داد.

استفاده از نرم افزار ABAQUS با وجود اینکه مجموعه قابلیت های بسیار گسترده ای را در اختیار کاربر قرار می دهد، کار نسبتا ساده ای می باشد. پیچیده ترین مسایل را می توان به آسانی مدل کرد. به عنوان

مثال مسایل شامل بیش از یک جزء را می توان با ایجاد مدل هندسی هر جزء و سپس نسبت دادن رفتار ماده مربوطه به هر جزء و سپس مونتاژ اجزاء مختلف مدل کرد. در اغلب مدلسازی ها، حتی مدل های با درجه غیر خطی بالا، کاربر می بایست تنها داده های مهندسی نظیر هندسه مساله، رفتار ماده مربوط به آن، شرایط مرزی و بار گذاری آن مساله را تعیین کند. در یک تحلیل غیر خطی ABAQUS، به طور اتوماتیک میزان نمو بار<sup>۱</sup> و تکرارهای همگرایی را انتخاب و همچنین در طول تحلیل مقادیر آنها را جهت دستیابی به یک جواب صحیح تعدیل می کند. در نتیجه کاربر بندرت می بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مساله را تعیین کند. ABAQUS/CAE محیط اصلی و گرافیکی ABAQUS می باشد که در آن قابلیت های متنوعی جهت مدلسازی، اجرای فرمان حل و مانیتور کردن آن به طور هم زمان و نیز مشاهده نتایج در دسترس قرار گرفته است. ABAQUS/CAE به محیط های ده گانه ای تقسیم شده است که در هر یک از این محیط ها طبق یک فرآیند منطقی یکی از بخش های مدلسازی انجام می گیرد. هنگامی که مدلسازی به اتمام رسید، ABAQUS/CAE یک فایل ورودی<sup>۲</sup> ایجاد می کند که ساختاری بسیار شبیه به یک کد برنامه نویسی شده دارد. توسط یکی از دو روش ضمنی و یا صریح مورد تحلیل قرار می گیرد. حل گر نرم افزار، فایل ورودی را خوانده و طی فرآیند حل اطلاعاتی را به CAE می فرستد که قابلیت مانیتور کردن پروسه حل به طور همزمان را ممکن می سازد. همچنین نتایج تحلیل در یک فایل خروجی ذخیره می گردد. در نهایت کاربر با استفاده از محیط Visualization فایل خروجی حل گر را باز کرده و به مشاهده نتایج به صورت نمودار، کانتور، انیمیشن و یا هر رابط گرافیکی دیگر می پردازد [39].

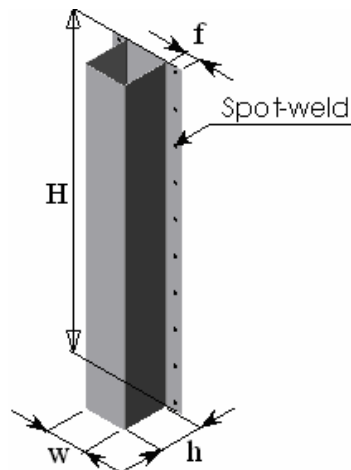
### ۳-۴- مدل سازی و ابعاد نمونه ها

شکل (۱-۳) هندسه ستونهای جدار نازک مورد استفاده را نشان می دهد. با توجه به شکل،  $h$  طول سطح مقطع،  $W$  عرض سطح مقطع،  $H$  ارتفاع ستون و  $f$  عرض فلنج را نشان می دهد. همچنین ضخامت ستون

<sup>۱</sup> Load Increment

<sup>۲</sup> Input file

با  $t$  نشان داده می شود. در این مطالعه ستونهای جدار نازک نقطه جوش شده در محدوده  $40 \leq h \leq 60$  و  $1 \leq t \leq 2$  و  $15 \leq f \leq 30$  ،  $40 \leq w \leq 60$  ،  $200 \leq H \leq 250$  همچنین اثر تعداد نقطه جوش بر انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش بررسی می شود.



شکل ۳-۱- هندسه ستون جدار نازک ساخته شده توسط نقطه جوش

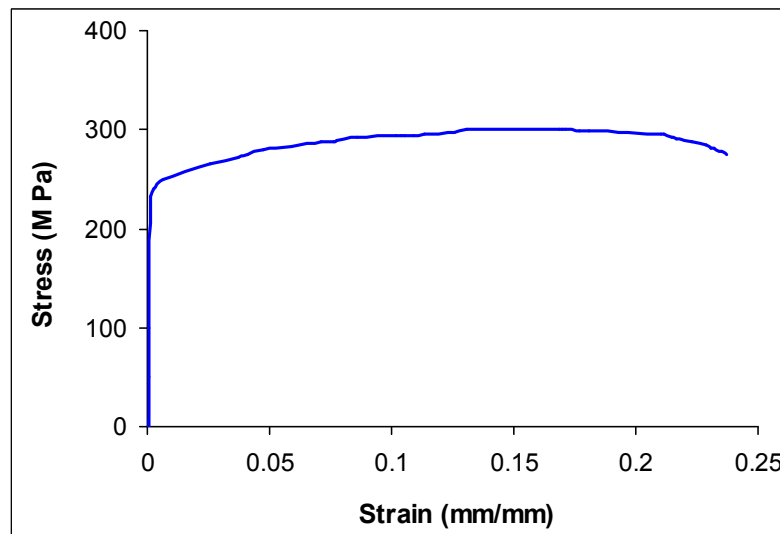
### ۳-۵- نامگذاری نمونه ها

نامگذاری هندسی نمونه ها بدین صورت است که مقدار عددی هر پارامتر در جلوی آن آورده شده است. به عنوان مثال نمونه  $H200-t1-f15-w60-h50$ ، نشان دهنده مشخصات ستونی است که دارای ارتفاع آن ۲۰۰، ضخامت ۱ و طول فلنج ۱۵ میلیمتر می باشد. همچنین عرض و طول سطح مقطع به ترتیب ۶۰ و ۵۰ میلیمتر می باشد.

### ۳-۶- خواص مکانیکی ماده

ورقهای مورد استفاده در این مطالعه از فولاد نرم تهیه شده است. نمودار تنش- کرنش، خواص الاستیک، پلاستیک و مقادیر عددی آن در شکل (۳-۲) نشان داده شده است.





شکل ۳-۲- نمودار تنش- کرنش ورق مورد بررسی

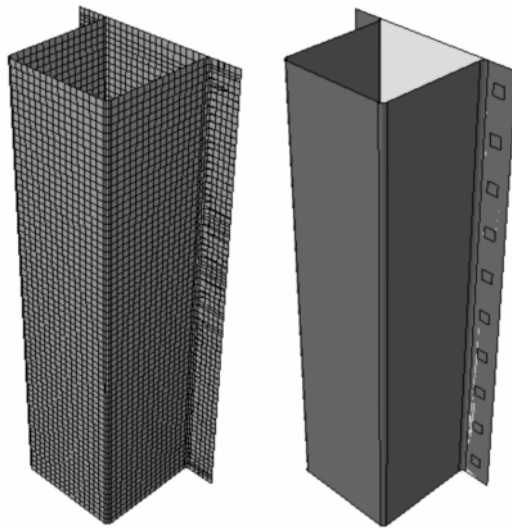
به کمک بخش خطی نمودار تنش\_ کرنش مدول الاستیک  $E=170$  GPa محاسبه شده و تنش تسلیم  $\sigma_y=220$  MPa بدست آمده است. ضریب پواسون نیز برابر  $\nu = 0.33$  در نظر گرفته شده است.

### ۳-۷- شرایط مرزی نمونه

برای اعمال بار، یک ورق صلب در زیر ستون قرار داده شده است سپس نمونه ها توسط یک صفحه صلب نیروی محوری عمودی قرار می گیرند. به علاوه، همه درجات آزادی صفحه پائینی مقید شده است و صفحه بالایی تنها در جهت محوری آزادی حرکت دارد.

### ۳-۸- المان بندی نمونه ها

در این تحلیل از المان غیر خطی S8R5، که دارای هشت گره و شش درجه آزادی برای هر گره می باشد، برای تحلیل مناسب است، استفاده شده است و از المان خطی S4R که یک المان خطی مستطیلی با چهار گره می باشد، استفاده شده است. از هر دو المان خطی و غیر خطی برای تحلیل استفاده شده و مش بهینه به دست آمد و در نهایت نتایج با هم مقایسه شده اند. نحوه مش بندی نمونه ها در شکل (۳-۳) نشان داده شده است.



شکل ۳-۳- نحوه مش بندی نمونه ها

### ۳-۹- تعیین نوع تحلیل

روش المان محدود به عنوان یک روش مناسب برای تحلیل مسائل سازه ای که تحلیل آن ها مشکل است می باشد. اولین گام برای حل این مسئله ارائه یک مدل المان محدود مناسب است. در حالت کلی، انرژی پتانسیل جسم الاستیک به صورت زیر است:

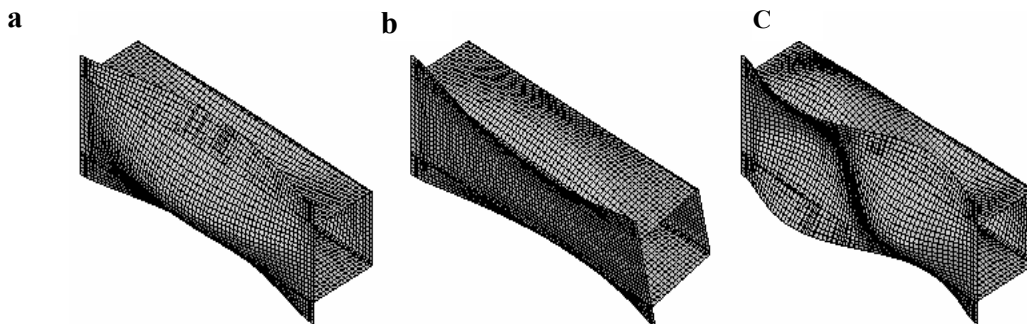
$$\Pi = U + V \quad (3-13)$$

تحلیل کمانش هیچ گونه اطلاعاتی درباره رفتار پس کمانش سازه ها نمی دهد. برای آزمایش اثر غیر خطی، باید برای هر مورد یک تحلیل غیر خطی انجام شود. در هر حال، تحلیل کمانش تخمین خوبی از بار کمانش واقعی در مورد تغییر شکل سازه می دهد. تحلیل مقدار ویژه، بار کمانش را بیشتر از مقدار واقعی آن نشان می دهد، علت هم این است که از خواص پلاستیک ماده در فرایند تحلیل هیچ استفاده ای نمی شود. برای تحلیل کمانش، برای همه نمونه ها ابتدا باید تحلیل مقدار ویژه انجام گیرد تا شکل مد و مقدار ویژه بدست آید. مدهای اول کمانش مقدار ویژه کمتری دارند و کمانش معمولاً در این مدها اتفاق می افتد.

### ۳-۹-۱- تحلیل مقدار ویژه

برای حل مقادیر ویژه در تحلیل از مرحله ای به نام Frequency استفاده می شود که باید نتایج آن در تحلیل غیر خطی کمانش لحاظ شود. در غیر این صورت، نرم افزار ممکن است شکل مدهای کمانش را به صورت اختیاری انتخاب کند که باعث بروز جوابهای غیر واقعی در تحلیل غیر خطی می شود.

در مرحله Step، نرم افزار از روش حل Subspace استفاده می کند. لازم است که بین صفحات صلب و پوسته یک تماس تعریف شود، لذا نمی توان از روش حل Lanczos استفاده کرد [32]. در شکل (۳-۴) سه شکل مد کمانش برای نمونه نمایش داده شده است.



شکل ۳-۴- سه شکل مد برای نمونه (a: h50-w50-t1-f15-h200) شکل مد اول، (b) شکل مد دوم و (c) شکل مد سوم

برای مدل کردن نقطه جوش از دستور Tie استفاده شده است و در این دستور دو المان به طول و عرض ۵ میلیمتر به یک دیگر متصل می شوند.

### ۳-۹-۲- تحلیل صریح دینامیکی

بعد از تحلیل Frequency، از یک تحلیل غیر خطی برای بدست آوردن نمودار نیرو-جابجایی استفاده می شود. مقدار ماکزیمم نیرو در این نمودار، نشان دهنده بار کمانش است. این مرحله (Dynamic explicit) نامیده می شود. در این مرحله خواص غیر خطی و پلاستیک ماده در نظر گرفته می شود.

### ۳-۱۰- نتایج تحلیل عددی ستونهای نقطه جوش شده تحت بار فشاری

#### محوری

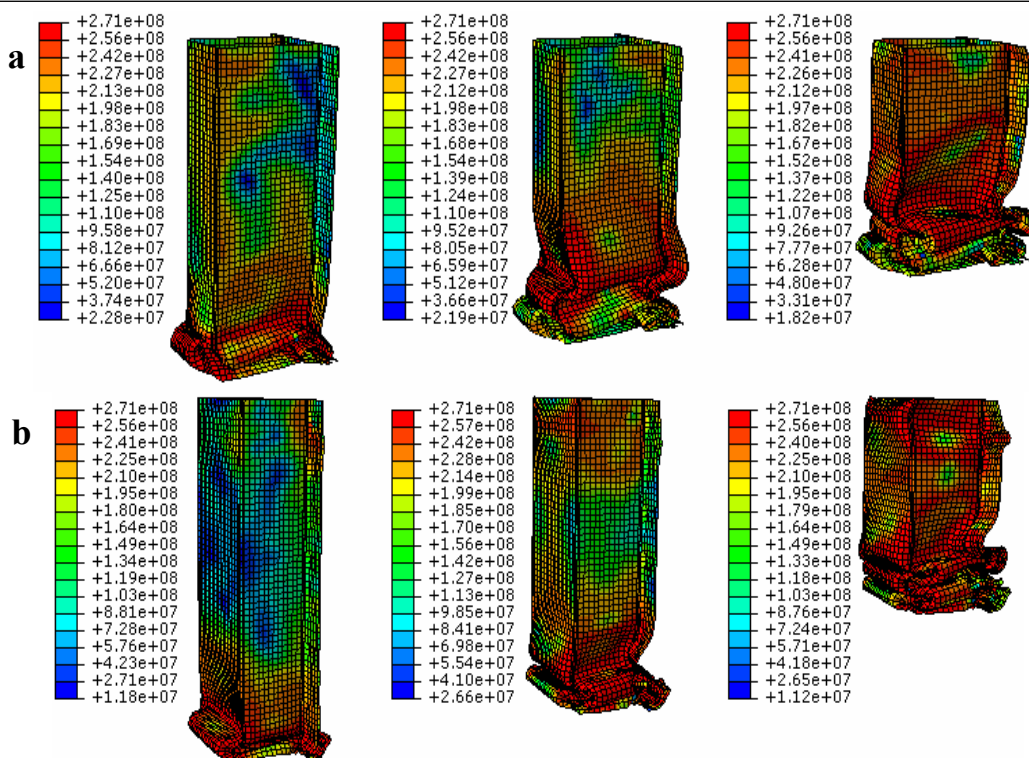
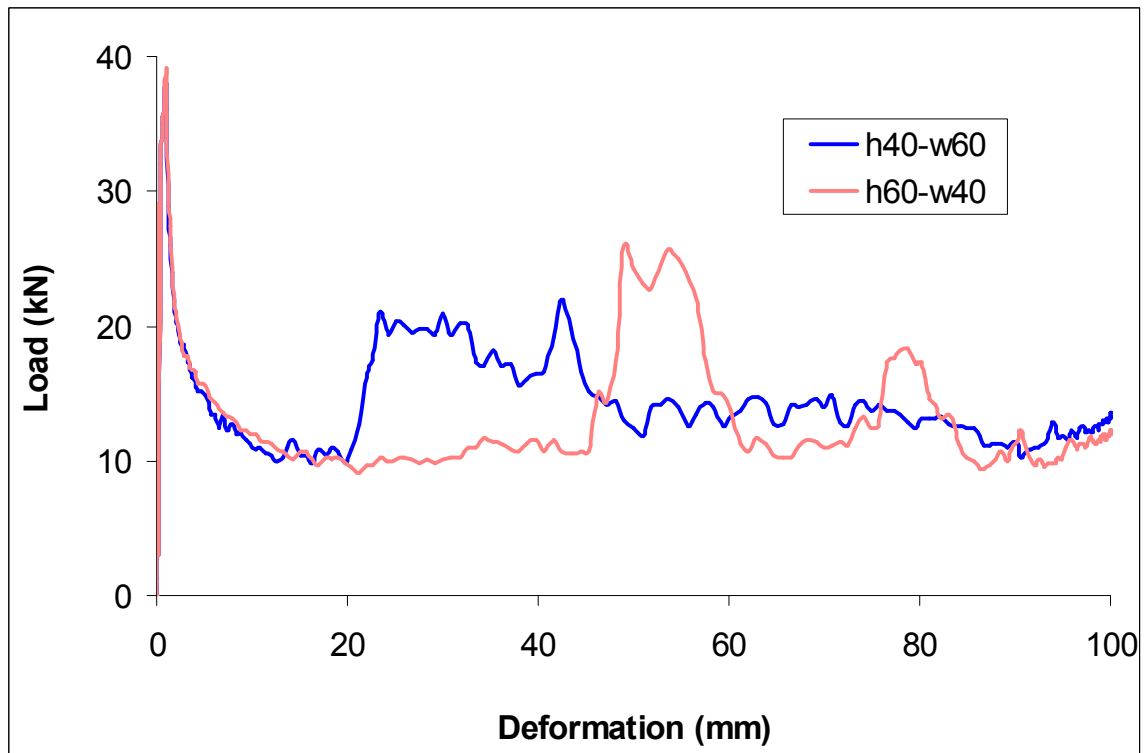
در این بخش نتایج تحلیل ستونهای جدار نازک ساخته شده توسط نقطه جوش تحت بار فشاری محوری برای نمونه‌هایی با اندازه های متفاوت ارائه شده است. هدف از انجام این تحلیل ها بررسی تأثیر پارامتر های هندسی ستونها بر روی نیروی ماکزیمم کمانش و همچنین مقدار انرژی جذب شده می باشد.

### ۳-۱۰-۱- بررسی تأثیر اندازه طول و عرض سطح مقطع بر مقدار انرژی جذب شده و

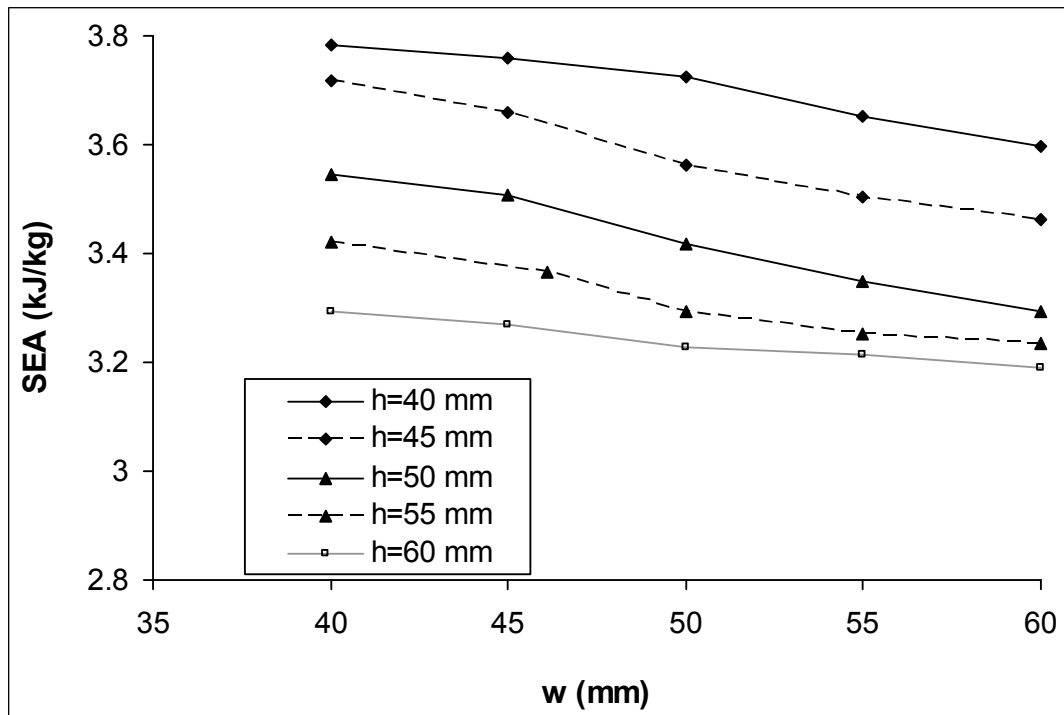
#### نیروی ماکزیمم کمانش

برای بررسی تاثیر اندازه طول و عرض سطح مقطع بر روی مقدار انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش چندین ستون با اندازه هایی در محدوده  $40 \leq h \leq 60$  ,  $40 \leq w \leq 60$  میلیمتر بررسی می شوند.

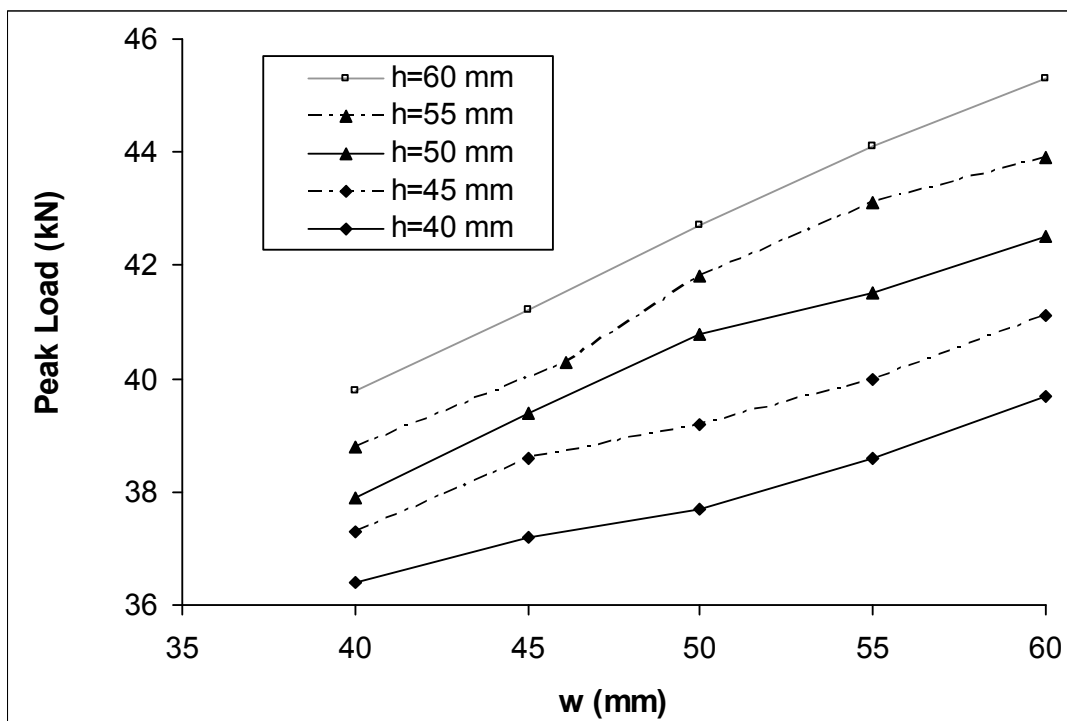
شکل (۳-۵) نمودار نیرو- جابجایی و کانتور تنش فون میسز را برای نمونه های h40-w60-t1-f15-H200 و h60-w40-t1-f15-H200 نشان می دهد. از شکل ۳-۵ می توان نتیجه گرفت که قرار گرفتن فلنج در قسمت با طول کمتر ، باعث افزایش جذب انرژی و کمتر شدن نیروی ماکزیمم کمانش می شود. به طوریکه نمونه h60-w40-t1-f15-H200 نسبت به h40-w60-t1-f15-H200 مقدار  $0.2/0$  انرژی بیشتر و  $0.9/4$  نیروی ماکزیمم کمانش کمتر را دارا می باشد. نتایج حاصل از تحلیل ها با المان غیر خطی برای نمونه هایی با ارتفاع ۲۰۰ ، ضخامت ۱ و عرض فلنج ۱۵ میلیمتر در جدول (۳-۱) و شکل (۳-۶) و شکل (۳-۷) ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که با افزایش طول و عرض سطح مقطع نیروی میانگین کمانش افزایش می یابد. و همچنین با افزایش طول و عرض سطح مقطع مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم کاهش می یابد. به عبارت دیگر برای انتخاب بهترین جاذب انرژی باید ستونی با کمترین اندازه سطح مقطع را انتخاب کرد تا کمترین مقدار نیروی ماکزیمم کمانش و بیشترین مقدار SEA را داشته باشد.



شکل ۳-۵- نمودار نیرو جابجایی و کانتور تنش فون میسز برای دو نمونه  
 h60-w40-t1-f15-H200 (b), h40-w60-t1-f15-H200 : (a)



شکل ۳-۶- نمودار انرژی جذب شده بر واحد جرم بر حسب طول و عرض سطح مقطع برای ستونی با ضخامت ۱ میلیمتر



شکل ۳-۷- نمودار نیروی ماکزیمم کمانش بر حسب طول و عرض سطح مقطع برای ستونی با ضخامت ۱ میلیمتر

جدول ۳-۱. نیروی ماکزیمم کمانش و انرژی ویژه جذب شده

h (mm)	w (mm)	Peak load (kN)	SEA (kJ/kg)
40	40	36.4	3.78
40	45	37.2	3.76
40	50	37.7	3.72
40	55	38.6	3.65
40	60	39.7	3.60
45	40	37.3	3.72
45	45	38.6	3.66
45	50	39.2	3.56
45	55	40	3.50
45	60	41.1	3.46
50	40	37.9	3.54
50	45	39.4	3.51
50	50	40.8	3.42
50	55	41.5	3.35
50	60	42.5	3.29
55	40	38.8	3.42
55	45	40.3	3.37
55	50	41.8	3.29
55	55	43.1	3.25
55	60	43.9	3.24
60	40	39.8	3.29
60	45	41.2	3.27
60	50	42.7	3.23
60	55	44.1	3.21
60	60	45.3	3.19

### ۳-۱۰-۲- بررسی تأثیر ضخامت بر مقدار انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش

برای بررسی تأثیر ضخامت بر مقدار انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش چندین ستون مورد تحلیل قرار می گیرند. شکل (۳-۷) نمودار نیرو- جابجایی و کانتور تنش فون میسز را برای نمونه های h50-w50 و t1-f15-H200 و h50-w50-t2-f15-H200 نشان می دهد. همانطور که از نمودار فوق مشخص است ،

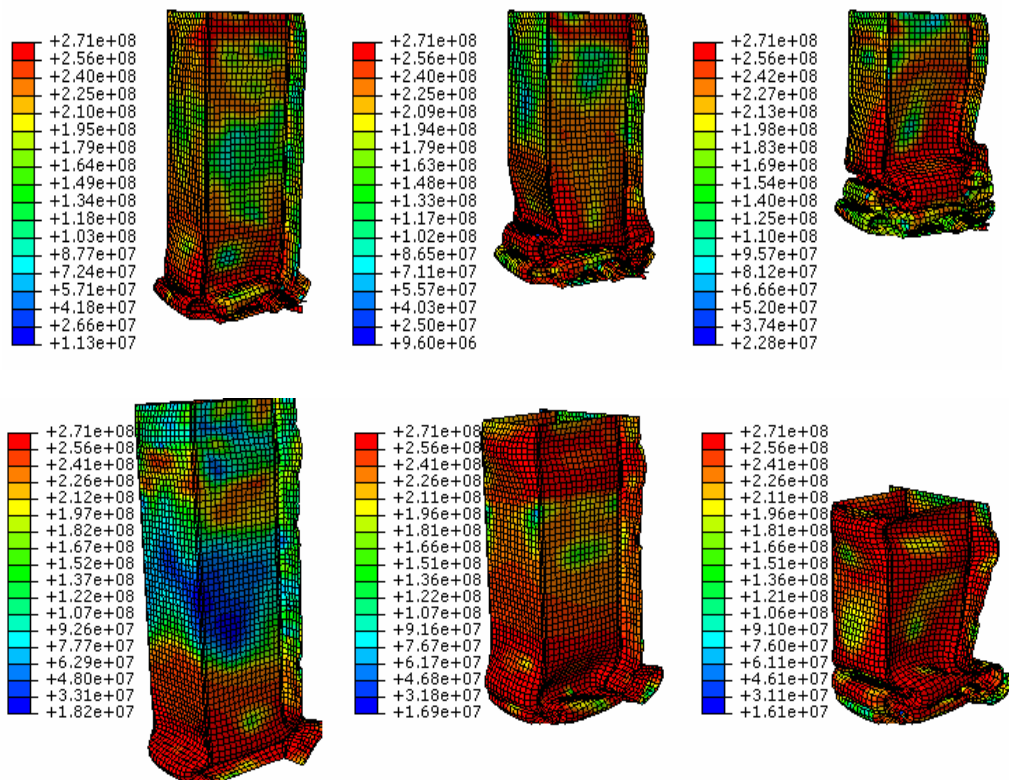
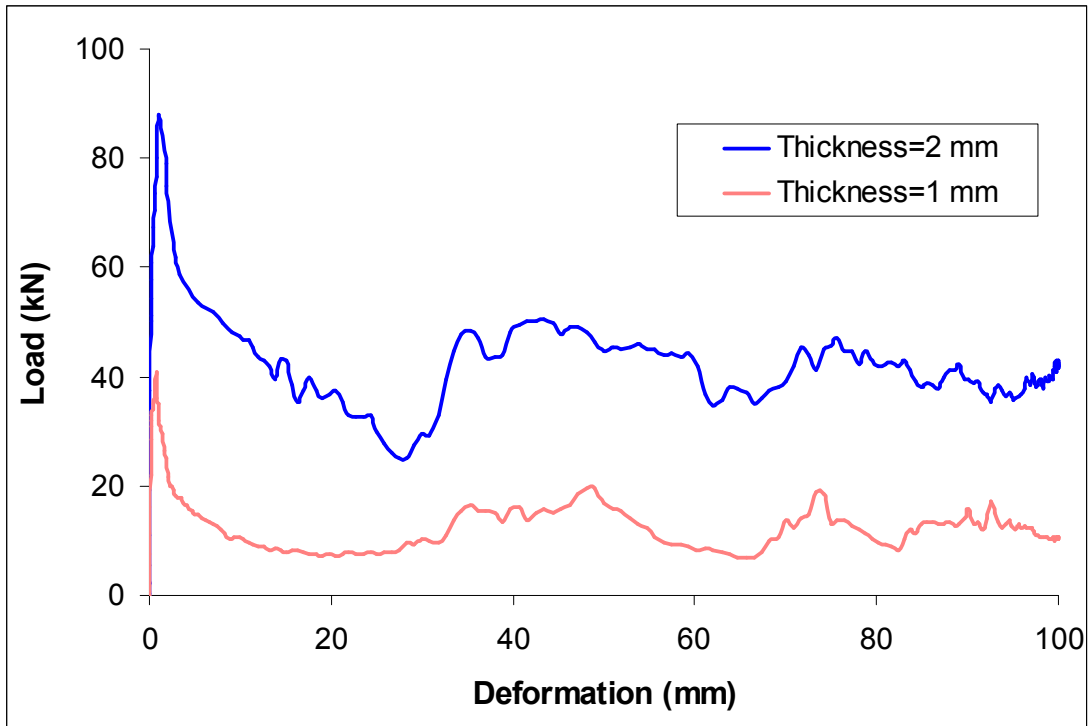
افزایش ضخامت میزان انرژی و نیروی ماکزیمم کمانش را افزایش می دهد به طوریکه برای دو نمونه فوق با افزایش ضخامت مقدار انرژی به میزان ۹۴٪ و نیروی ماکزیمم کمانش ۱۱۵٪ افزایش می یابد. شکل های (۳-۳) و (۸) و (۹-۳) میزان انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش را برای ستونهای h50-w50- f15- H200 و h55-w55- f15-H200 در ضخامتهای مختلف نشان می دهد.

جدول (۳-۲) نشان می دهد با افزایش ضخامت از یک به دو میلیمتر برای نمونه های h50-w50- f15- H200 میزان انرژی جذب شده ۹۴٪ و نیروی ماکزیمم کمانش ۱۱۵٪ افزایش می یابد و برای نمونه های h55-w55-f15-H200 میزان انرژی جذب شده ۸۵٪ و نیروی ماکزیمم کمانش ۱۴۵٪ افزایش می یابد. به عبارت دیگر درصد افزایش نیروی ماکزیمم کمانش به ازای تغییر ضخامت از ۱ به ۲ میلیمتر در ستونهایی با سطح مقطع بزرگتر بیشتر می باشد و این در حالی است که درصد افزایش انرژی جذب شده بر واحد جرم به ازای تغییر ضخامت از ۱ به ۲ میلیمتر در ستونهایی با سطح مقطع کوچکتر بیشتر می باشد.

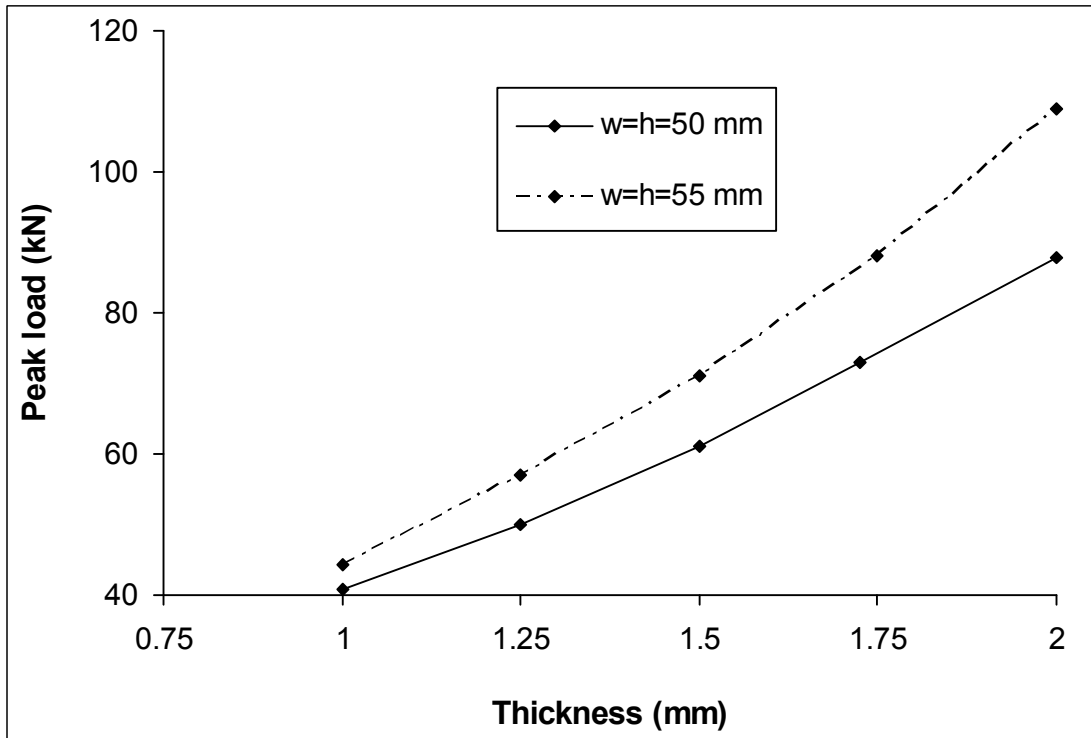
جدول ۳-۲. میزان انرژی جذب شده بر واحد جرم و نیروی ماکزیمم کمانش برای نمونه h50-w50-f15-H200

h (mm)	w (mm)	t (mm)	Peak load (kN)	SEA (kJ/kg)
50	50	1	40.8	3.4
50	50	1.25	50	4.1
50	50	1.5	61	4.8
50	50	1.724	73	5.54
50	50	2	87.9	6.6
55	55	1	44.5	3.19
55	55	1.25	57	3.81
55	55	1.531	71	4.56
55	55	1.75	88	5.18
55	55	2	109	5.93

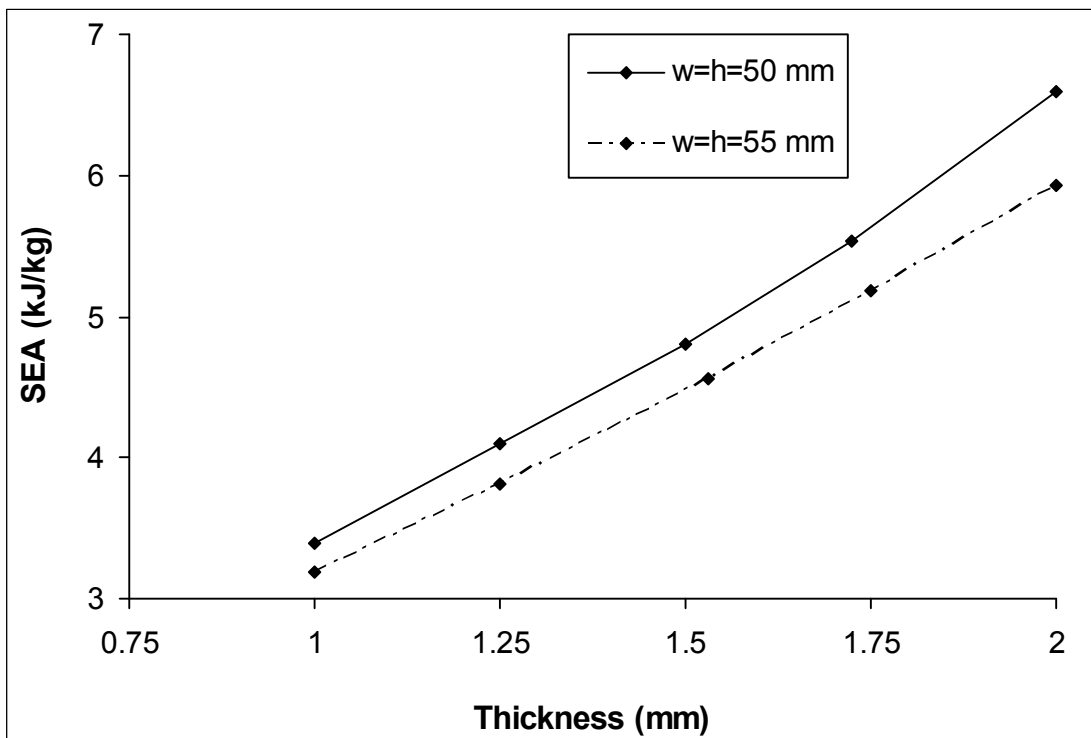




شکل ۳-۷- نمودار نیرو جابجایی و کانتور تنش فون میسز برای دو نمونه: (a) H200-h50-w50-t1-f15, (b) H200-h50-w50-t2-f15



شکل ۳-۸- نمودار نیروی ماکزیمم کمانش بر حسب ضخامت برای ستون های f15-H200



شکل ۳-۹- نمودار انرژی جذب شده برواحد جرم بر حسب ضخامت برای ستون های f15-H200

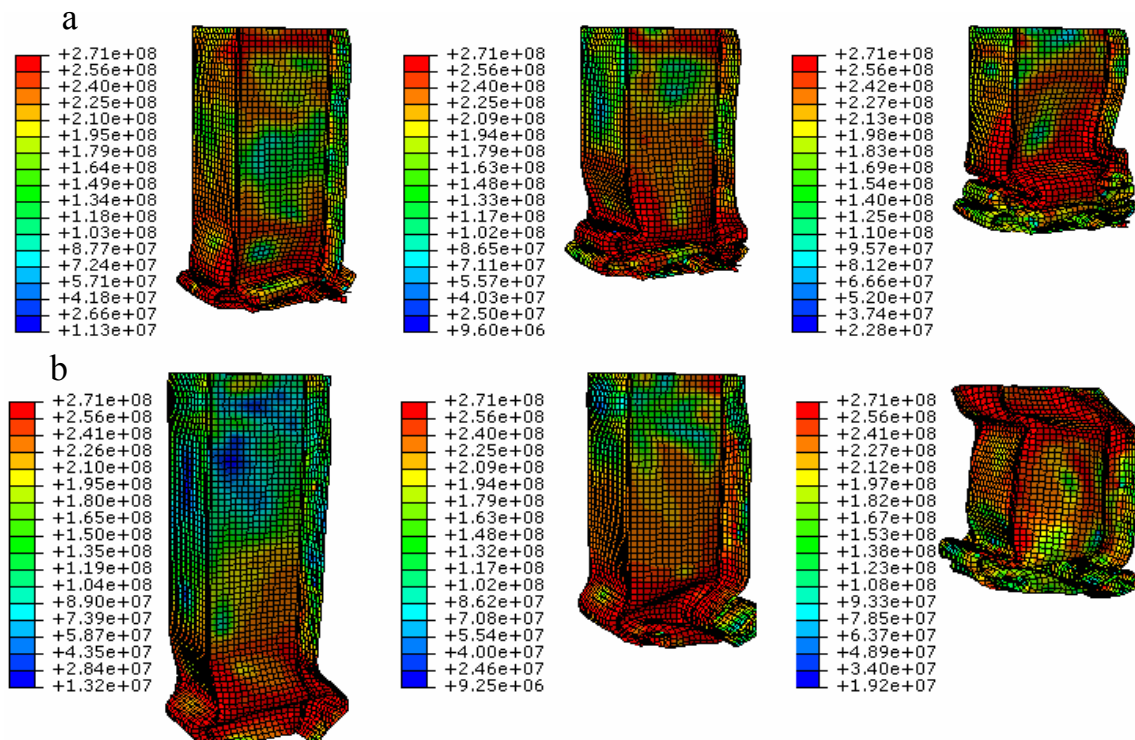
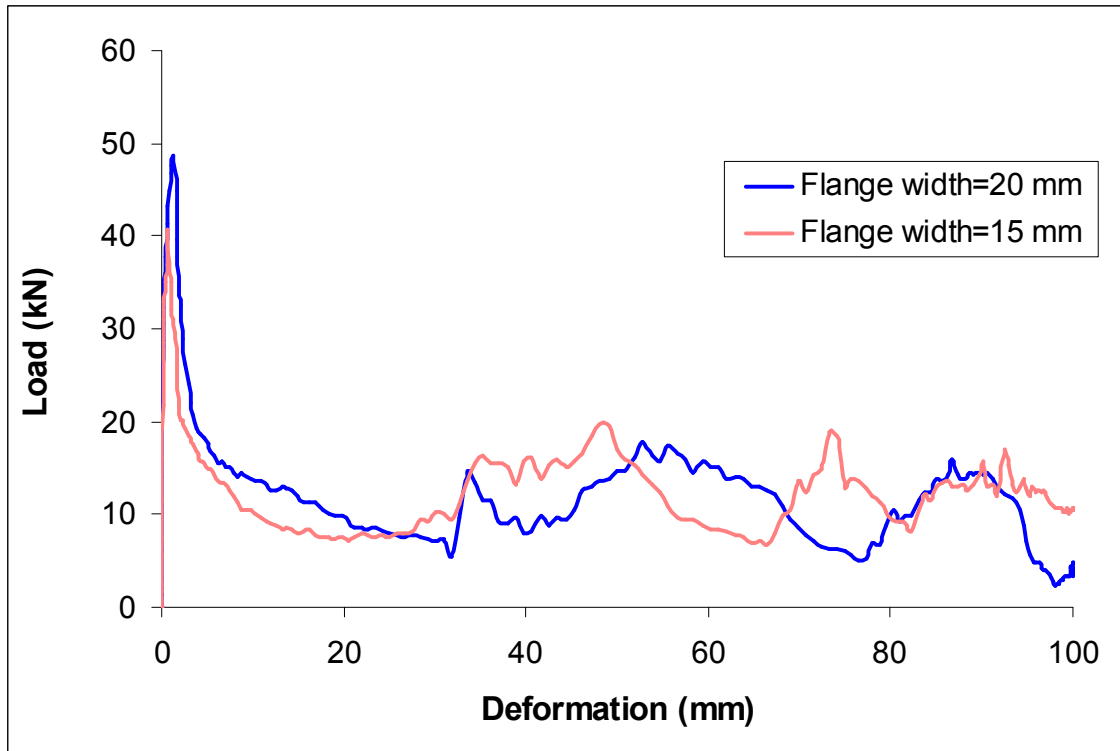
### ۳-۱۰-۳- بررسی تأثیر طول فلنج بر مقدار انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش

برای بررسی تاثیر طول فلنج بر مقدار انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش چندین ستون مورد تحلیل قرار می گیرند. شکل (۳-۱۰) نیرو- جابجایی و کانتور تنش فون میسر را برای نمونه های h50-w50-H200 و t1-H200 نشان می دهد. همانطور که از شکل فوق مشخص است با کاهش طول فلنج تغییر شکل ستون یکنواخت تر می باشد که این امر باعث می شود ستون تا ارتفاع فشردهگی بیشتر به صورت منظم چین بخورد که در نهایت باعث افزایش جذب انرژی بیشتری می شود.

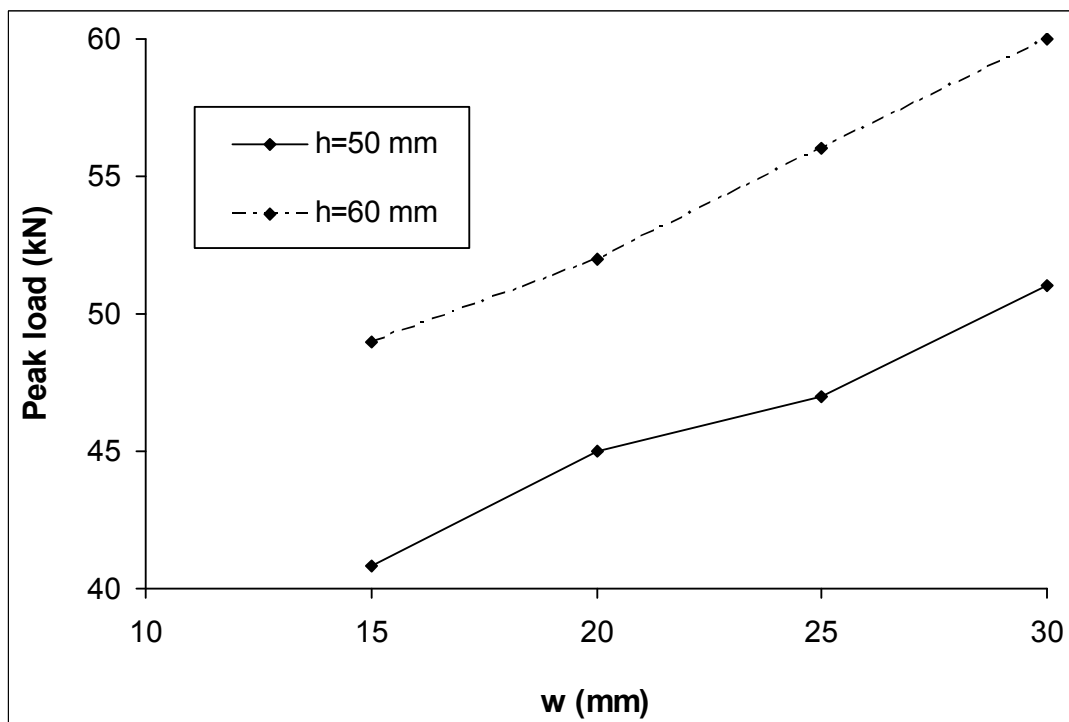
شکل های (۳-۱۱) و (۳-۱۲) نیروی ماکزیمم کمانش و مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود با افزایش طول فلنج نیروی ماکزیمم کمانش افزایش و مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم کاهش می یابد. بنابراین برای طراحی این ستونها به عنوان جاذب انرژی باید حتی الامکان طول فلنج را کاهش داد.

### ۴-۱۰-۴- بررسی تأثیر ارتفاع ستون بر مقدار انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش

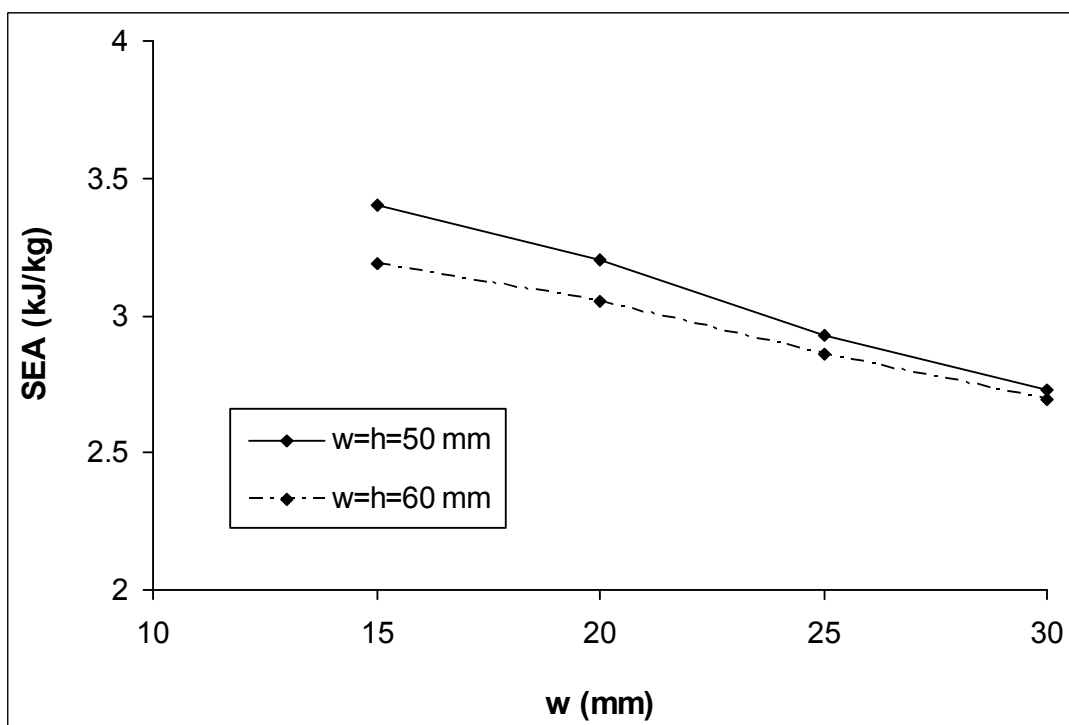
در این بخش تاثیر ارتفاع ستون بر مقدار انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش بررسی می شود. شکل (۳-۱۳) نمودار نیرو- جابجایی را برای ستونهای h50-w50-t1-f15-H200 و h50-w50-t1-f15-H250 نشان می دهد. همانطور که شکل فوق نشان می دهد با افزایش ارتفاع ستون، نمودار نیرو- جابجایی تغییر محسوسی پیدا نمی کند. جدول (۳-۲) مقدار انرژی جذب شده و همچنین نیروی ماکزیمم کمانش را برای چند نمونه نشان می دهد. با توجه به جدول (۳-۳) می توان مشاهده کرد درصد کاهش نیروی ماکزیمم کمانش برای نمونه h50-w50-t1-f15 از طول ۲۰۰ به ۳۰۰ میلیمتر ۴/۹٪ می باشد و برای نمونه h60-w60-t1-f15 و t1-f15 ۵/۱٪ می باشد. همچنین کاهش مقدار انرژی جذب شده برای نمونه h50-w50-t1-f15 از طول ۲۰۰ به ۳۰۰ میلیمتر ۳۲٪ می باشد و برای نمونه h60-w60-t1-f15 و h60-w60-t1-f15 ۳۵٪ می باشد.



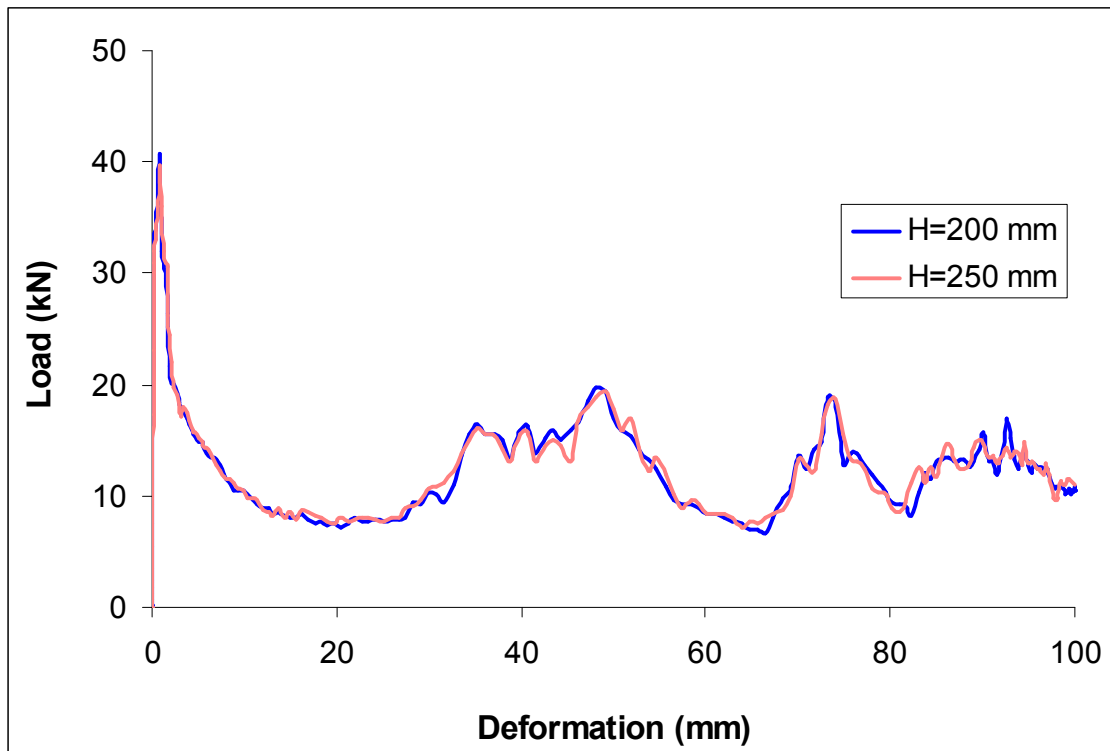
شکل ۳-۱۰- نمودار نیرو-جابجایی و کانتور تنش فون میسز برای نمونه h50-w50-t1-f20-H200 (b) و h50-w50-t1-f15-h200 (a)



شکل ۳-۱۱- نمودار نیروی ماکزیمم کمانش بر حسب طول فلنج برای ستون های t1-H200



شکل ۳-۱۲- نمودار نیروی ماکزیمم کمانش بر حسب طول فلنج برای ستون های t1-H200



شکل ۳-۱۳- نمودار نیرو- جابجایی و برای ستون های h50-w50-t1-f15

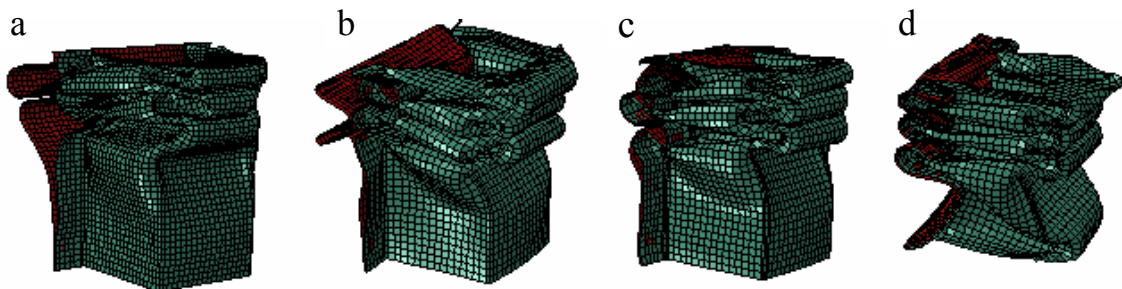
جدول ۳-۳. میزان انرژی جذب شده بر واحد جرم و نیروی ماکزیمم

کمانش برای ستون های t1-f15-h200

h (mm)	w (mm)	H (mm)	load Peak (kN)	SEA (kj/kg)
50	50	200	40.8	3.4
50	50	225	40.4	3.0
50	50	250	39.6	2.6
50	50	275	39.0	2.4
50	50	300	38.8	2.3
60	60	200	49.0	3.1
60	60	225	48.1	2.7
60	60	250	47.5	2.5
60	60	275	47.0	2.3
60	60	300	46.5	2.0

### ۳-۱۰-۵- بررسی تأثیر تعداد نقطه جوش بر مقدار انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش

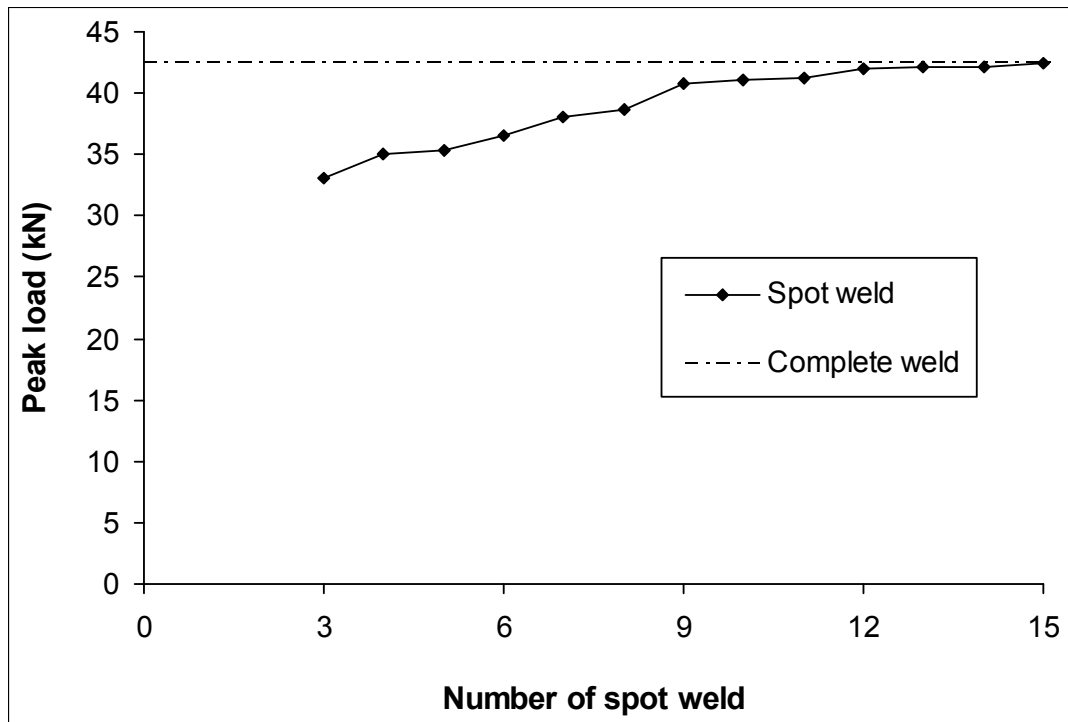
در این بخش اثر تعداد نقطه جوش بر نیروی ماکزیمم کمانش و مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم بررسی می شود. شکل (۳-۱۴) تغییر شکل ستون ها را برای تعداد نقطه جوش های متفاوت نشان می دهد. همانطور که از شکل (۳-۱۴) مشخص است با تغییر تعداد نقطه جوش تغییر شکل ستون نیز متفاوت می باشد که باعث تغییر در میزان انرژی جذب شده می شود.



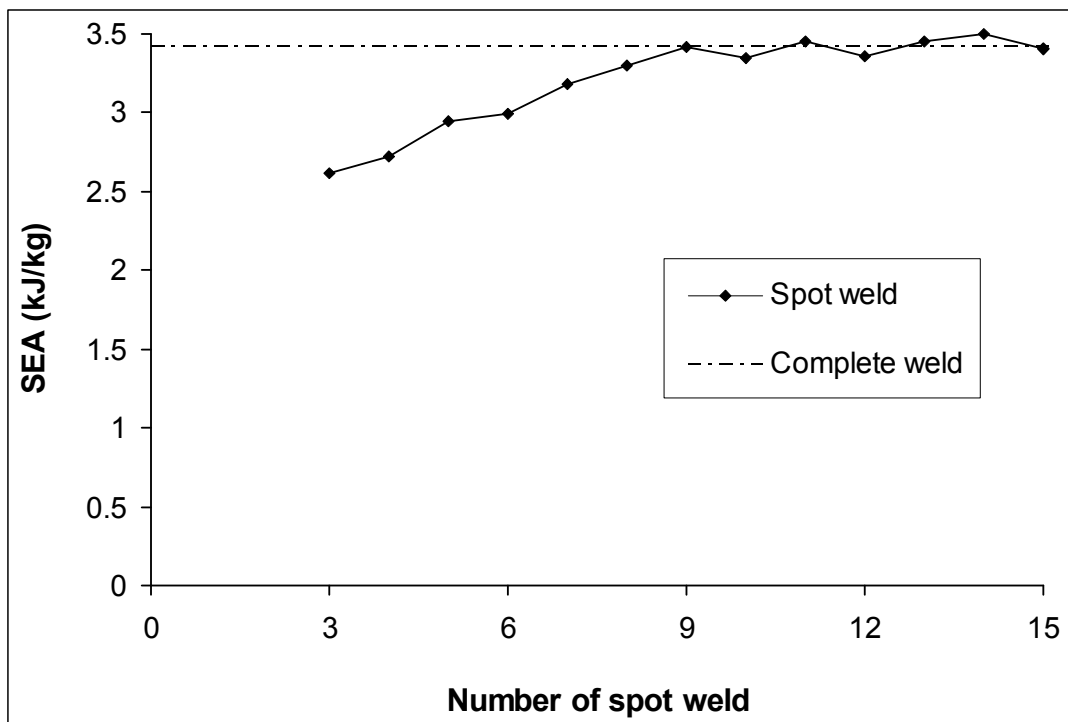
شکل ۳-۱۴- تغییر شکل ستونهای نقطه جوش شده با تعداد نقطه جوش متفاوت  
(a) ۳ نقطه جوش ، (b) ۵ نقطه جوش ، (c) ۱۰ نقطه جوش و (d) ۱۵ نقطه جوش ،

شکل (۳-۱۵) نمودار نیروی ماکزیمم کمانش را برای تعداد نقاط جوش متفاوت و همچنین در حالت جوش کامل را نشان می دهد. همانطور که از این نمودار مشخص است با کاهش تعداد نقطه جوش نیروی ماکزیمم کمانش به طور یکنواخت کاهش می یابد.

شکل (۳-۱۶) مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم را برای تعداد نقطه جوش متفاوت و همچنین در حالت جوش کامل را نشان می دهد. این نمودار نشان می دهد با کاهش تعداد نقطه جوش از ۱۵ به ۹ جفت میزان انرژی جذب شده تغییر چندانی نمی کند و تقریباً برابر با حالت جوش کامل می باشد ولی با کمتر شدن تعداد نقطه جوش از ۹ جفت میزان انرژی جذب شده بر واحد جرم به طور یکنواخت کاهش می یابد. با توجه به بحث فوق می توان نتیجه گرفت که برای ستون مورد نظر ۹ جفت نقطه جوش بهترین حالت ممکن می باشد.



شکل ۳-۱۵- نمودار نیروی ماکزیمم کمانش بر حسب تعداد نقطه جوش برای ستون h50-w50-t1-f15-H200

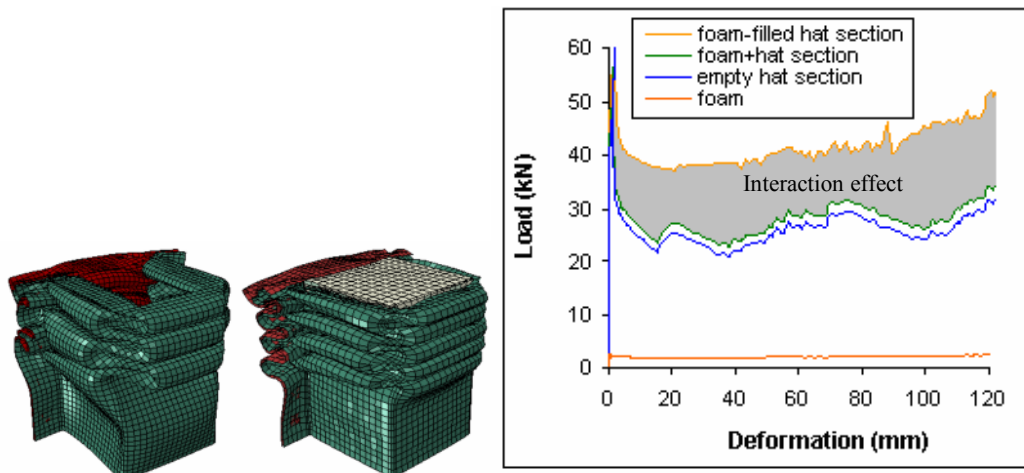


شکل ۳-۱۶- نمودار انرژی جذب شده برواحد جرم بر حسب تعداد نقطه جوش برای ستون h50-w50-t1-f15-H200



### ۳-۱۱- تاثیر پرکردن ستونها با فوم بر قابلیت جذب انرژی

برای جذب بیشتر انرژی، جذب های انرژی را با فوم پر می کنند. شکل ۳-۱۷ نمودار نیرو-جابجایی را برای یک ستون با مشخصات h50-w50-t1-f15-H200 را که توسط فوم پر شده است را نشان می دهد. در این تحلیل برای مقایسه با [۳۲] مقاومت تسلیم فولاد برابر 380MPa و مدول یانگ برابر 200 GPa انتخاب شده است. همچنین مشخصات فوم نیز در مراجع [۳۲ و ۴۰] آورده شده است.



۳-۱۷- نمودار نیرو-جابجایی و تغییر شکل ستونهای فوم دار و بدون فوم

همانطور که از شکل فوق مشخص است مقدار انرژی جذب شده ستون فوم دار از مجموع انرژی جذب شده توسط ستون بدون فوم و همچنین فوم تنها بیشتر می باشد. این اختلاف را اثر بر هم کنش می نامند. همچنین از شکل (۳-۱۷) نتیجه می شود که با پر کردن فوم تعداد چین ها افزایش می یابد.

### ۳-۱۱-۱- بهینه سازی

با توجه به گستردگی فوم ها با چگالی های مختلف، همواره انتخاب بهترین چگالی فوم مورد نظر محققین بوده است. برای بهینه سازی جاذبه های انرژی معمولاً از روش RSM استفاده می شود. مسئله طراحی به صورت زیر تعریف می شود.

$$\begin{cases} \text{Minimize : } y = P(x) \\ \text{S.t } SEA_x \geq SEA_{const.} \\ x^L \leq x \leq x^U \end{cases}$$

که  $SEA_{const} = 12 \text{ kJ/kg}$  می باشد و  $x^L = (x_1^L, x_2^L, \dots, x_k^L)$  و  $x^U = (x_1^U, x_2^U, \dots, x_k^U)$  به ترتیب کران پایین و بالای متغیرهای طراحی می باشد.

### ۳-۱۱-۲- روش RSM

در این قسمت یک ستون مربعی نقطه جوش شده با ضخامت های مختلف و پر شده با فوم با چگالی های مختلف بررسی می شود. متغیرهای  $\rho$  و  $t$  به عنوان به عنوان پارامترهای طراحی انتخاب می شوند و بازه تغییر آنها به صورت  $200 \leq \rho \leq 400$  و  $1 \leq t \leq 2$  میلیمتر در نظر گرفته می شوند. تاثیر این پارامترها بر میزان انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کماتش بررسی می شود. در این مسئله جواب  $SEA(\rho, t)$  توسط توابع پایه تقریب زده می شود

$$\hat{y}_{(x)} = SEA_{(\rho, t)} = \sum_{i=1}^n B_i \varphi_i(\rho, t) \quad (14-3)$$

که  $n$  تعداد توابع پایه  $\varphi_i(\rho, t)$  می باشد برای بدست آوردن  $\varphi_i(\rho, t)$  از عبارتهای چندجمله ای استفاده می شود. در معادله بالا  $B_i$  به عنوان ضریب رگرسیون شناخته می شود که توسط روش حداقل مربعات تخمین زده می شود.

$$L = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^m \left[ y_i - \sum_{j=1}^n B_j \varphi_j(\rho, t) \right]^2 \quad (15-3)$$

که  $m$  تعداد نقاط طراحی می باشد و  $\varepsilon_i$  خطای بین  $y_i$  متناظر با نقاط طراحی و جواب RS می باشد و

متغیرهای  $B_j$  بوسیله  $\frac{\partial L}{\partial B} = 0$  بدست می آید که  $\phi$  ماتریسی تشکیل شده از توابع پایه می باشد

$$B = (\phi^T \phi)^{-1} \phi^T y \quad (16-3)$$

$$\phi = \begin{bmatrix} \phi_1(a,t)_1 & \cdots & \phi_n(a,t)_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi_1(a,t)_m & \cdots & \phi_n(a,t)_m \end{bmatrix} \quad (17-3)$$

برای بیان دقت RS خطای نسبی به صورت زیر بیان می شود .

$$RE = \frac{[\hat{y}_x - y_x]}{y(x)} \quad (18-3)$$

دو پارامتر مهم دیگر برای تخمین خطا موارد زیر می باشند :

$$SS_E = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (19-3)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (20-3)$$

که  $\bar{y}_i$  میانگین  $y_i$  می باشد. همچنین متغیرهای آماری زیر نیز معرفی می شوند .

$$F = \frac{(SS_T - SS_E) / n}{SS_E / (m - n - 1)} \quad (21-3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (22-3)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{m-1}{m-n} (1 - R^2) \quad (23-3)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{SS_E}{m - n - 1}} \quad (24-3)$$

در نهایت هر چه مقدار  $R^2$  و  $R_{adj}^2$  بیشتر و RMSE کمتر باشد جواب دقیقتر است .

به کمک روش فاکتوریل ماتریس طراحی را انتخاب می کنیم و توسط نرم افزار Abaqus تعداد ۲۵ تحلیل

انجام می دهیم. معالات ۲۵-۳ و ۲۶-۳ رابطه بین  $t$  و  $\rho$  را نسبت به انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم

کمانش را نشان می دهد.

$$SEA = 67.9045 + 16.5230t - 1051.6148\rho - 6.33573t^2 - 71.49991t\rho + 6142.203120\rho^2 + 1.7709t^3 + 9.850467t^2\rho + 186.1808t\rho^2 - 14938.372t^3 + 0.000000061t^4 - 5.227t^3\rho + 24.35718t^2\rho^2 - 279.9877t\rho^3 + 13105.8014\rho^4 \quad (25-3)$$

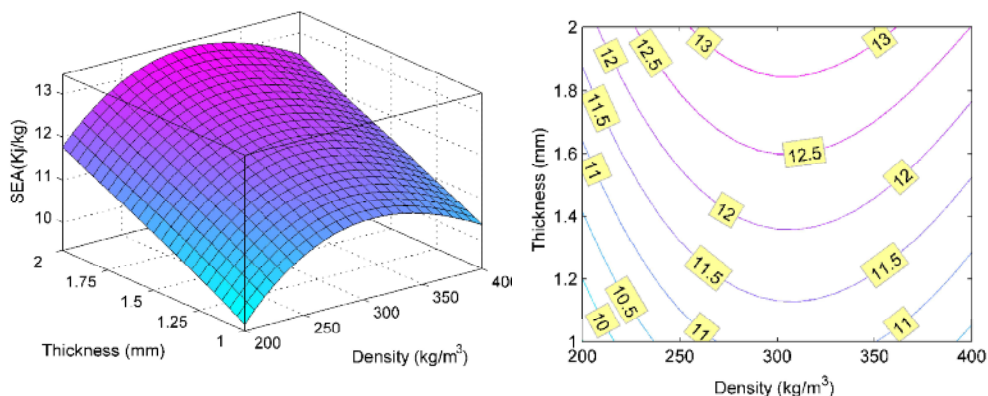
$$P = -343.0761 + 756.9416t + 772.8856\rho - 821.1445t^2 + 1662.1798t\rho - 9389.4534\rho^2 + 370.1847t^3 - 9.5812t^2\rho - 5255.3188t\rho^2 + 32753.2963\rho^3 - 57.60t^4 - 71.76079t^3\rho + 516.9804t^2\rho^2 + 3895.686t\rho^3 - 33968.2539\rho^4 \quad (26-3)$$

جدول ۳-۴ مقدار خطای چند جمله ای های پیش بینی شده توسط روش RSM را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود چند جمله ایهای درجه ۴ بهترین تقریب می باشند.

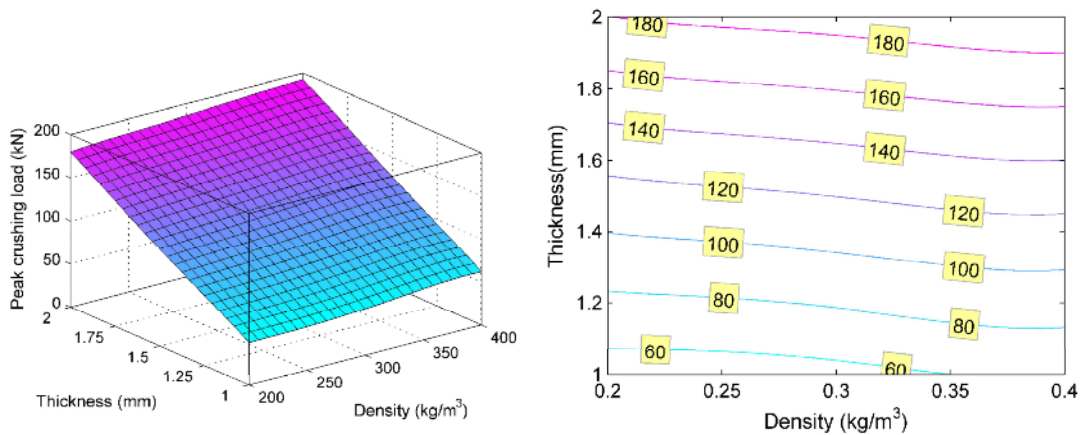
جدول ۳-۴ - خطای محاسبه شده برای چند جمله ایهای پیش بینی شده توسط روش RSM

RS model	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	RMSE	RE interval (%)
Quadratic polynomial (foam-filled)	0.9752	0.9669	0.00991	[-1.88 , 2.12]
Cubic polynomial (foam-filled)	0.9894	0.9818	0.00927	[-0.69 , 1.49]
Quartic polynomial (foam-filled)	0.9995	0.998	0.00119	[-0.44 , 1.05]

شکل های (۳-۱۸) و (۳-۱۹) نمودار انرژی جذب شده و نیروی ماکزیمم کمانش را نسبت به پارامتر های طراحی نشان میدهد. همانطور که شکل فوق نشان می دهد همواره با افزایش چگالی فوم انرژی جذب شده بر واحد جرم افزایش پیدا نمی کند؛ بلکه با افزایش چگالی ابتدا نیروی ماکزیمم کمانش افزایش پیدا می کند و سپس بعد از آن کاهش می یابد.



شکل ۳-۱۸- نمودار انرژی ویژه جذب شده بر حسب چگالی و ضخامت



شکل ۳-۱۹- نمودار نیروی ماکزیمم کمانش بر حسب چگالی و ضخامت

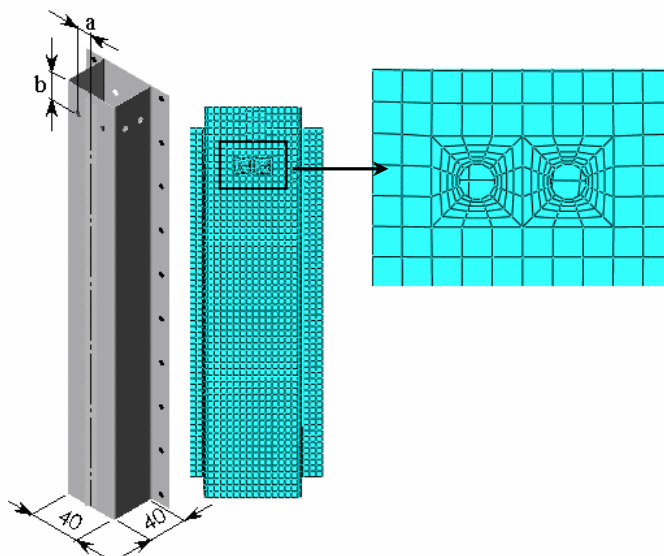
حال به کمک نرم افزار MATLAB و به کمک دستور fmincon مقدار بهینه پارامتر های طراحی را انتخاب می کنیم. این پارامتر ها در جدول (۳-۵) نشان داده شده است.

جدول ۳-۵- مقادیر بهینه به دست آمده توسط روش RSM

	t (mm)	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	P <sub>max</sub> (kN)	SEA (kJ/kg)
Optimum foam-filled	1.34	300	102.3	12

### ۳-۱۲- کنترل کننده برای کاهش نیروی ماکزیمم کمانش

یک جاذب انرژی مناسب باید دارای نیروی ماکزیمم کمانش کنترل شده باشد و نیروی ماکزیمم کمانش در کاربردهای مختلف نباید از حد مجاز تجاوز کند. به همین منظور در جاذبهای انرژی از کنترل کننده هایی استفاده می شود. این کنترل کننده ها انواع متفاوتی دارند که از آن جمله می توان به دندانه کردن، مخروطی کردن جاذب اشاره کرد [۴۱-۴۲] متداول ترین این کنترل کننده ها استفاده از سوراخهایی کوچک در سازه می باشد، شکل (۳-۲۰).



شکل ۳-۲۰. همدسه و نحوه مش زدن برای ستون دارای کنترل کننده h40-w40-t1-f15-H200

شکل (۳-۲۱) نیز تغییر شکل h40-w40-t1-f15-H200 آورده شده است. سازه مورد نظر همراه سوراخهایی a10-b20 برای کاهش نیروی ماکزیمم می باشد. همانطور که از شکل فوق مشخص است اولین چین خوردگی از محل سوراخها شروع می شود که این امر باعث کاهش نیروی ماکزیمم کمانش می شود.

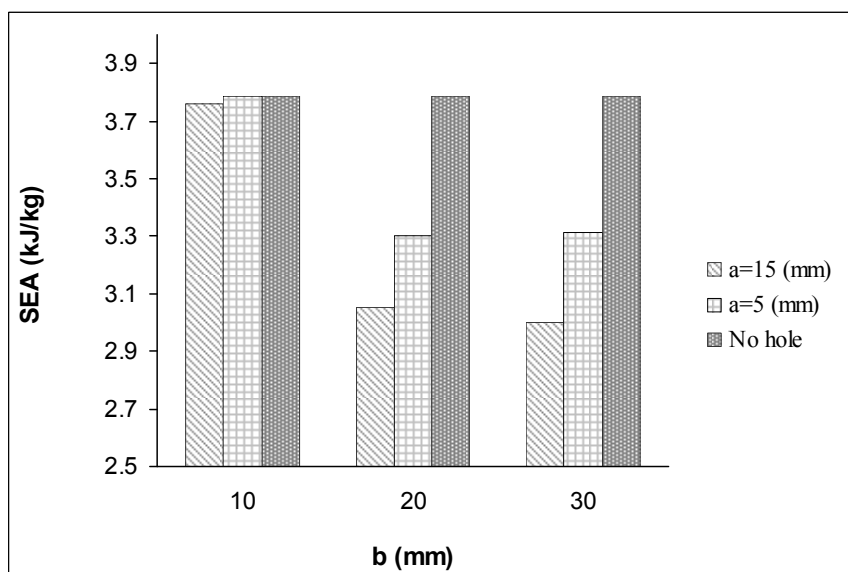


شکل ۳-۲۱. تغییر شکل برای نمونه h40-w40-t1-f15-H200 و کنترل کننده با مشخصات a10-b20

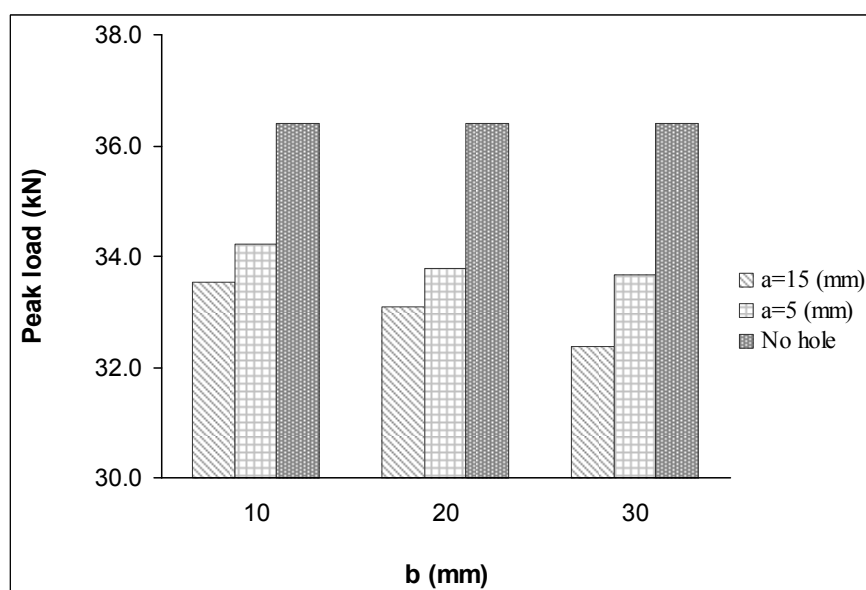
در شکل‌های (۳-۲۲) و (۳-۲۳) نمودار پارامتری نتایج عددی برای مقایسه تاثیر طول  $a$  و  $b$  بر نیروی میانگین کمانش آورده شده است.

از شکل های (۳-۱۹) و (۳-۲۰) نتیجه گرفته می شود که با افزایش فاصله سوراخ از خط مرکزی ستون  $a$ ، و با افزایش فاصله سوراخ از لبه انتهایی ستون  $b$ ، بار ماکزیمم کمانش و انرژی جذب شده کاهش می یابد با توجه به شکل های (۳-۱۹) و (۳-۲۰) می توان بهترین مکان را برای ایجاد سوراخ را در  $a=15$  و

$b=10$  میلیمتر (حداقل فاصله از لبه پایینی و کناری) دانست زیرا مقدار انرژی جذب شده را ثابت نگه می دارد در حالیکه نیروی ماکزیمم کمانش را حدود ۱۰٪ کاهش می دهد یا به عبارت دیگر می توان گفت با ایجاد سوراخ در  $b=10$  mm، نیروی ماکزیمم کمانش، بدون اینکه انرژی جذب شده کم شود کاهش می یابد.



شکل ۳-۲۲. نمودار انرژی جذب شده بر حسب مکان کنترل کننده برای نمونه h40-w40-t1-f15-H200



شکل ۳-۲۳. نمودار نیروی ماکزیمم کمانش بر حسب مکان کنترل کننده برای نمونه h40-w40-t1-f15-H200

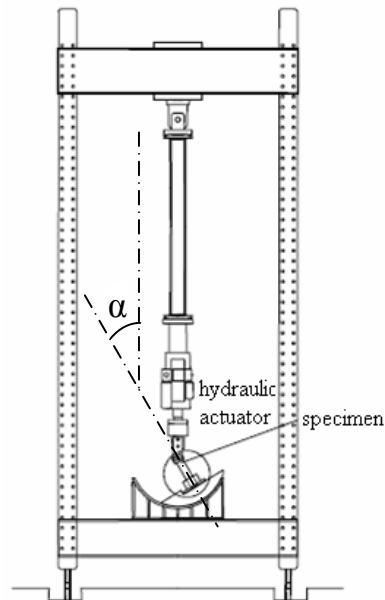
### ۳-۱۳- نتایج تحلیل عددی ستون های نقطه جوش شده تحت بار گذاری مایل

در این بخش نتایج تحلیل عددی پوسته های جدار نازک ساخته شده توسط نقطه جوش در بارگذاری مایل بررسی می شود. شکل (۳-۲۴) نحوه بارگذاری را نشان می دهد. برای تحلیل فوق دو سر ستون را داخل فیکسچرهای مخصوص قرار داده و با توجه به شکل ستون در سه جهت می توان به آن نیرو اعمال کرد. شکل (۳-۲۵) جهت های اعمال نیرو به ستون را نشان می دهد. زاویه کوچکتر که امتداد ستون با امتداد بارگذاری است با  $\alpha$  نشان داده می شود. این زاویه در شکل (۳-۲۱) نشان داده شده است.

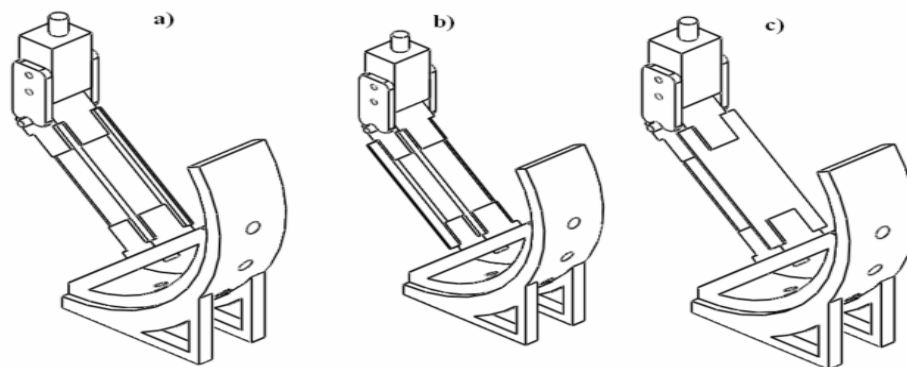
برای جلوگیری از حرکت ستون، دو طرف هر کدام از ستونها به اندازه ۳۰ میلیمتر در داخل فیکسچر قرار می گیرد. شکل (۳-۲۶) نمودار نیرو-جابجایی و تغییر شکل ستون h50-w50-t1-f15-h200 را در حالت بارگذاری M1، M2، M3 با زاویه ۳۰ درجه و در حالت محوری نشان می دهد. شکل (۳-۲۷) نیز نمودار نیرو-جابجایی همان ستون را برای زوایای مختلف و در حالت محوری را نشان می دهد. جدول (۳-۶) نیروی ماکزیمم کمانش و انرژی جذب شده بر واحد جرم را برای ستون h50-w50-t1-f15-h200 در حالت های مختلف نشان می دهد. از جدول فوق می توان نتیجه گرفت که در حالت بارگذاری به صورت M1 نیروی ماکزیمم کمانش کمترین مقدار و در حالت بارگذاری به صورت M2 نیروی ماکزیمم کمانش بیشترین مقدار خود را دارد. همچنین مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم در حالت M1 بیشترین و در حالت M3 کمترین مقدار خود را دارد. به عبارت دیگر می توان گفت که بارگذاری به صورت M1 بهترین نوع بارگذاری می باشد زیرا کمترین نیروی ماکزیمم کمانش و بیشترین مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم را دارد. در این حالت نیروی ماکزیمم کمانش و انرژی جذب شده بر واحد جرم آن نسبت به حالت بارگذاری محوری به ترتیب ۷۳٪ و ۲۸٪ کمتر می باشد. همچنین با توجه به جدول ۳-۳ می توان نتیجه گرفت که با افزایش زاویه ستون نیروی ماکزیمم کمانش و انرژی جذب شده بر واحد جرم کاهش می یابد. به طوریکه با افزایش



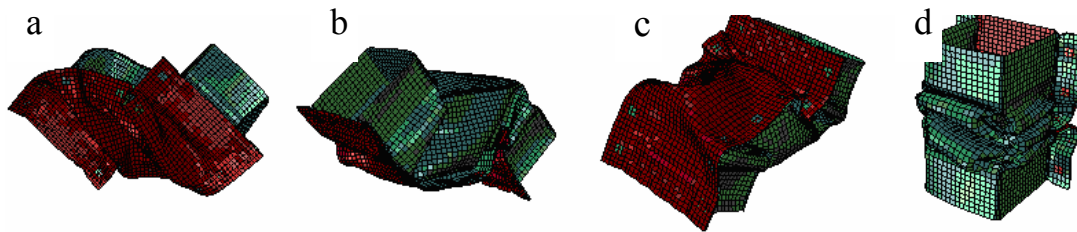
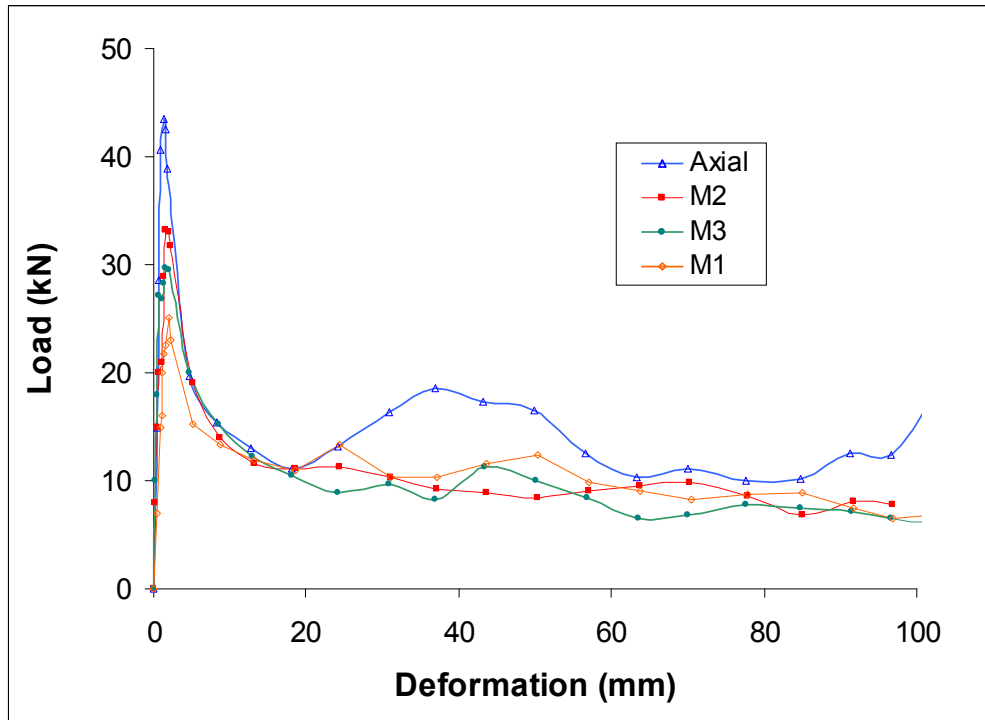
زاویه از ۳۰ به ۶۰ درجه نیروی ماکزیمم کمانش و انرژی جذب شده بر واحد جرم به ترتیب ۲۹٪ و ۳۲٪ کاهش می یابد.



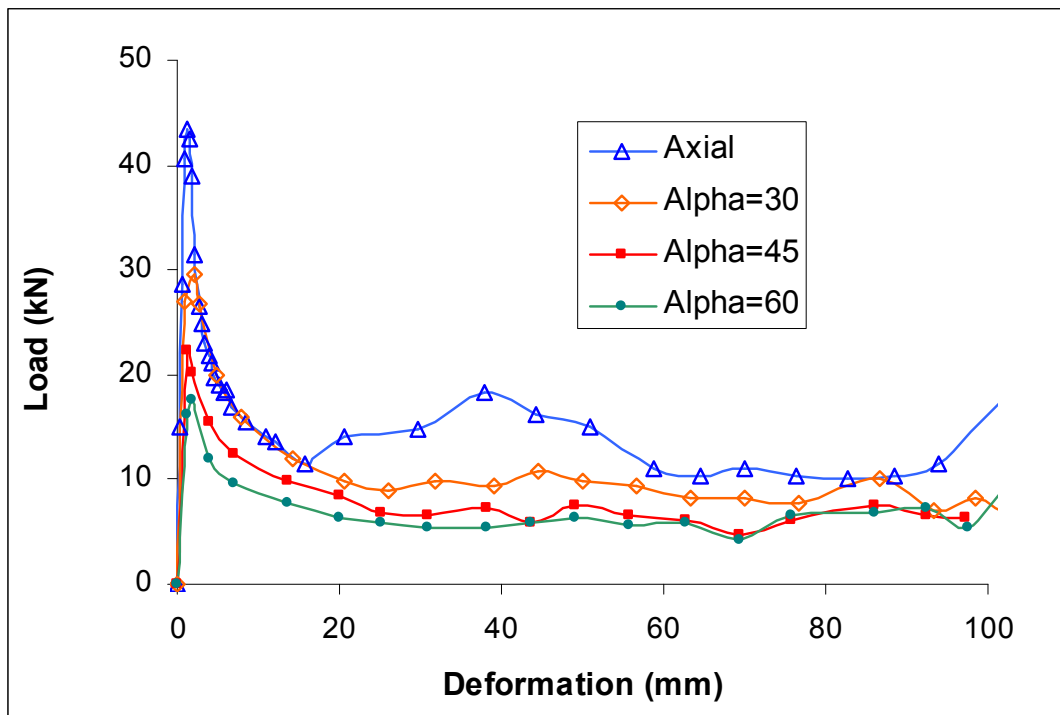
شکل ۳-۲۴. نحوه اعمال بارگذاری به صورت مایل [25]



شکل ۳-۲۵. نحوه بارگذاری مایل ستون نقطه جوش شده (a) M1، (b) M2، (c) M3



شکل ۳-۲۶. نمودار نیرو-جابجایی و تغییر شکل ستون h50-w50-t1-f15-h200 در حالت بارگذاری مایل و محوری  
 Axial (d و M3 (c , M2 (b , M1 (a



شکل ۳-۲۷. نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه h50-w50-t1-f15-H200 در حالت بارگذاری مایل با زوایای مختلف

جدول ۳-۶. میزان انرژی جذب شده بر واحد جرم و نیروی ماکزیمم کمانش برای ستون های h50-w50-t1-f15-H200 در حالت بارگذاری مایل

جهت بارگذاری	$\alpha = 30$		$\alpha = 45$		$\alpha = 60$	
	نیروی ماکزیمم کمانش (kN)	انرژی ویژه (kj/kg)	نیروی ماکزیمم کمانش (kN)	انرژی ویژه (kj/kg)	نیروی ماکزیمم کمانش (kN)	انرژی ویژه (kj/kg)
M1	25.1	2.5	22.9	1.8	17.8	1.7
M2	33.2	2.4	30.1	1.6	24.3	1.5
M3	29.6	2.2	28.5	1.5	24.0	1.5



## فصل چهارم

### بررسی تجربی





شده و کار از بین آنها بیرون آورده می شود. ترتیب جوشکاری نقطه ای می تواند تغییر کند اما ساده ترین آن به شرح ذیل است .

الف ) اتصال بین الکترودها قرار داده می شود. به منظور تامین وضعیت صحیح جوش، باید دقت شود قطعه کار با الکترودها هم محور باشد. برای این منظور، در صورتی که بخواهیم تعداد زیادی از این نقطه جوشها ایجاد نماییم از کار گیر ( فیکسچر ) استفاده می شود .

ب ) عملیات جوشکاری معمولاً با بکار اندازی یک پدال یا یک کلید پایی شروع میشود .

ج) الکترودهای بسته شده و قطعه کار را فشار می دهند تا ورق ها در تماس نزدیک قرار گیرند.

د) فشار تا حد بهینه، برای مدت زمانی که به عنوان زمان فشرده شدن خوانده می شود، افزایش می یابد .

ه ) جریان برقرار شده و اجازه داده می شود برای مدت از قبل تعیین شده ای جریان یابد تا اینکه فلز به حالت خمیری درآمده و جوش تا اندازه مورد نظر بزرگ شود. بطور کلی، زمانهای جوشکاری در حد شایان توجهی از یک ثانیه کمتر است و بر حسب سیکل بیان می گردد . یک سیکل معادل  $1/50$  ثانیه یعنی عکس فرکانس در استاندارد انگلستان است.

و) هنگام انجام جوش به منظور عمل آهنگری (فورجینگ) فشار روی الکترودها برای مدتی حفظ می شود.

ز) در پایان، فشار برداشته می شود، الکترودها جدا شده و قطعه کار از روی ماشین برداشته می شود.

مواردی که کار تکراری وجود دارد ، دستگاهها با سیلندر پنوماتیک ، فشارهای بیشتری تولید نموده و

خستگی جوشکاری را کاهش میدهد . با این ابزار می توان تا ۲۰۰ جوش نقطه ای در دقیقه انجام داد.

حد عملی ضخامت ورقه های هم ضخامتی را که می توان طی فرایند های جوشکاری نقطه ای بهم وصل

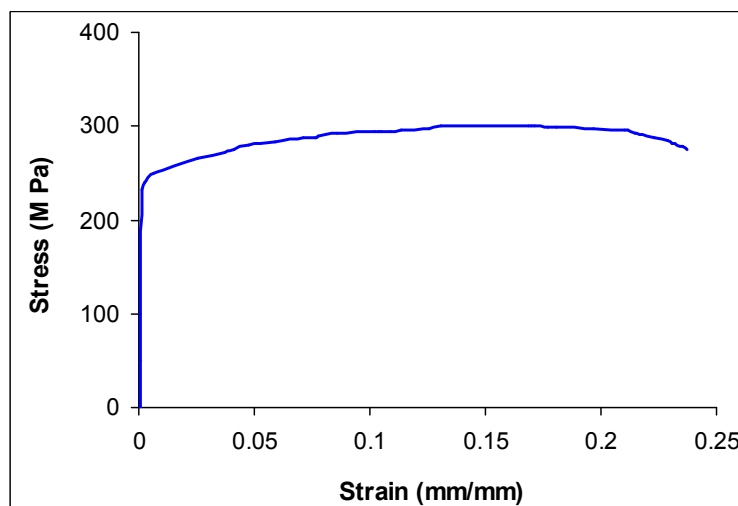
کرد ، حدود  $1/8$  اینچ است ، ولی براحتی می توان یک ورقه ضخیم تر از  $1/8$  اینچ را جوش داد . اخیراً

ورقه های فولادی  $1/2$  اینچی را نیز بجای پیچ و مهره با جوش نقطه ای بهم متصل نموده اند.[۴۳]



## ۴-۳- نتایج تست کشش

همانطور که در فصل قبل گفته شد؛ برای انجام تحلیلهای عددی با نرم افزار ABAQUS، به منحنی تنش- کرنش ماده نیاز بود. به همین منظور تعدادی نمونه تست کشش ساده، از پوسته های در نظر گرفته شده برای آزمایشات، مطابق با استاندارد ASTM E8 تهیه شد و با استفاده از دستگاه سرو هیدرولیک INSTRON 8802، آزمایش کشش ساده، در سرعت یسار پایین انجام شد. شکل (۴-۱) انجام آزمایش کشش ساده روی یک نمونه تهیه شده را نشان می دهد. به منظور افزایش دقت از یک نیروسنج با ظرفیت ۲۵ کیلو نیوتن برای انجام آزمایشات استفاده شد. منحنی های تنش- کرنش بدست آمده در شکل (۴-۲) نشان داده شده اند. مدول یانگ و ضریب پواسون در بخش ۳-۵ ارائه شده است.



شکل ۴-۱. نمودار تنش- کرنش

از منحنی آزمایش کشش، که با سرعت ۰/۰۵ میلی متر بر ثانیه انجام شد برای استفاده در نرم افزار استفاده می شود. بدین منظور، منحنی تنش- کرنش واقعی و تنش- کرنش پلاستیک، با روابط زیر بدست می آید:

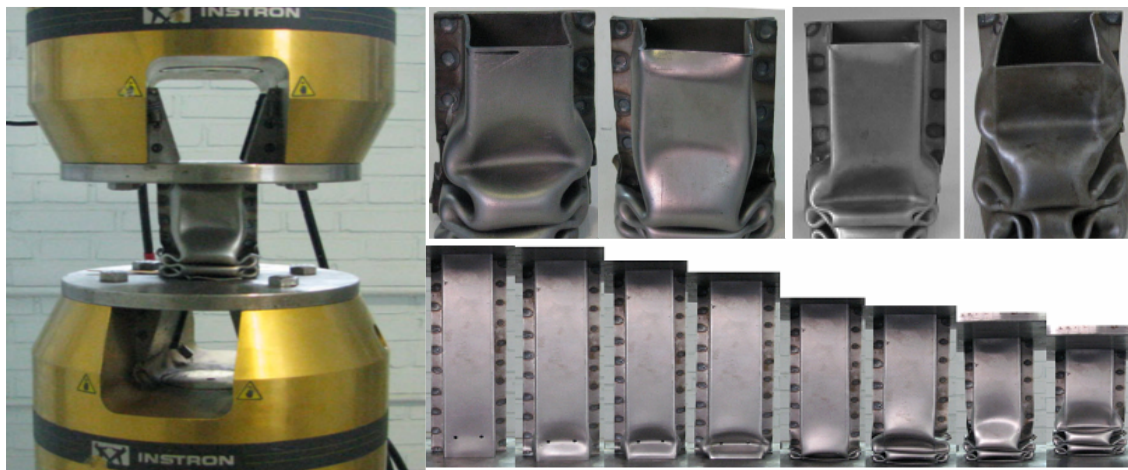
$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon_{Eng.}) \quad (۴-۱)$$

$$\sigma_{real} = \sigma_{Eng.} (1 + \varepsilon_{Eng.}) \quad (۴-۲)$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{real} - \frac{\sigma_{real}}{E} \quad (۴-۳)$$

#### ۴-۴- نتایج تجربی فشردگی ستونهای ساخته شده توسط نقطه جوش

برای انجام آزمایشات از یک دستگاه سروهیدرولیک INSTRON8802، مطابق شکل (۴-۲) استفاده شد. نمونه ها در ابعاد مختلف تهیه شده است و تمامی آزمایشات در حالت کنترل جابجایی انجام شد. در ادامه نتایج بدست آمده ارائه شده است.

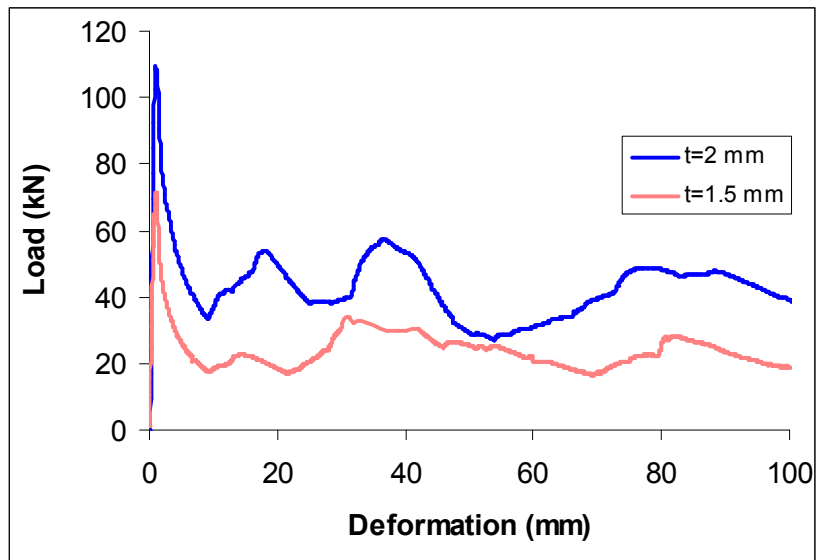


شکل ۴-۲- تعدادی از نمونه های آزمایش با دستگاه INSTRON

#### ۴-۴-۱- بررسی تاثیر پارامترهای هندسی ستون بر قابلیت جذب انرژی

ابعاد نمونه های آزمایش شده، همان ابعادی هستند که در فصل پیش برای تحلیل عددی استفاده شد. فقط تعداد نمونه های آزمایش شده کمتر است. البته لزومی نیست که تعداد نمونه های بیشتری آزمایش شوند و همین تعداد آزمایش برای مقایسه و تایید نتایج بدست آمده از روش عددی کفایت می کند. منحنی بار کمانش برای نمونه هایی که به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته اند؛ در ادامه نشان داده شده است.

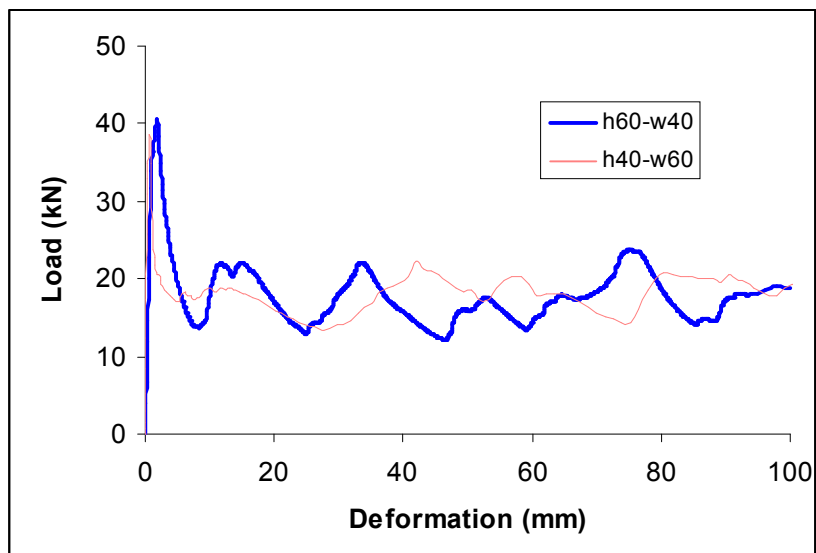
شکل (۴-۳) نمودار نیرو-جابجایی را برای نمونه های h55-w55-f15-H200 با دو ضخامت ۱/۵ و ۲ میلیمتر نشان می دهد. همانطور که از تحلیل های عددی نتیجه شد، با افزایش ضخامت نیروی ماکزیمم کمانش و انرژی جذب شده بر واحد جرم افزایش می یابد.



شکل ۴-۳- منحنی های بار- جابجایی برای ستونهای h55-w55-f15-H200 در ضخامت های مختلف

شکل (۴-۴) نمودار نیرو-جابجایی را برای نمونه های h40-w60-t1-f15-H200 و h60-w40-t1-f15-

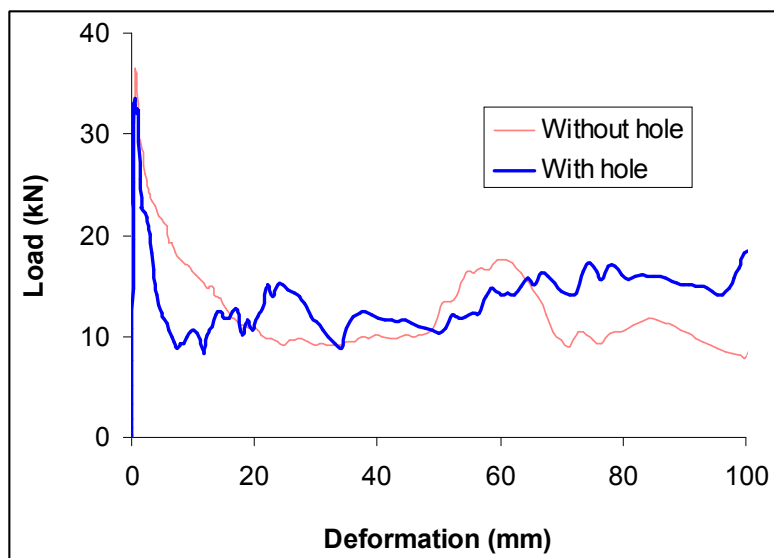
H200 را نشان می دهد. از نمودار فوق نیز نتیجه می شود نیروی ماکزیمم کمانش ستون h40-w60-t1-f15-H200 نسبت به h60-w40-t1-f15-H200 کمتر می باشد.



شکل ۴-۴- منحنی های بار- جابجایی برای ستونهای h40-w60-t1-f15-H200 و h60-w40-t1-f15-H200

#### ۴-۴-۲- بررسی ایجاد سوراخ به منظور پایین آوردن نیروی ماکزیمم کمانش

همانطور که قبلاً گفته شد به منظور کنترل کردن و پایین آوردن نیروی ماکزیمم کمانش از سوراخهایی در انتهای ستون استفاده می شود. شکل ۳-۳ نمودار نیرو جابجایی را برای ستون h40-w40-t1-f15-H200 نشان می دهد. همانطور که شکل فوق نشان می دهد با ایجاد سوراخ نیروی ماکزیمم کمانش می یابد.



شکل ۴-۵- منحنی های بار- جابجایی برای ستونهای h40-w40-t1-f15-H200 در حالت با کنترل کننده و بدون کنترل کننده

## فصل پنجم

# مقایسه نتایج عددی و تجربی

## ۵-۱- مقدمه

در این فصل به منظور اطمینان از صحت نتایج تحلیل عددی، این نتایج با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌شوند و دقت و صحت نتایج عددی مورد بحث قرار می‌گیرد.

## ۵-۲- مقایسه نتایج عددی و تجربی ستونهای جدار نازک نقطه جوش شده

نتایج تحلیلهای عددی و تجربی همراه با درصد اختلاف بین این نتایج در جداول (۵-۱) و (۵-۲) آورده شده است.

جدول ۵-۱. مقایسه نتایج عددی و تجربی برای ستونهای نقطه جوش شده

عنوان نمونه	نتایج عددی				نتایج تجربی	
	نیروی ماکزیمم کمانش (kN)		انرژی جذب شده (kJ/kg)		نیروی ماکزیمم کمانش (kN)	انرژی جذب شده (kJ/kg)
	المان S8R5	المان S4R	المان S8R5	المان S4R		
h55-w55-t1.5-f15-H200	71.2	71.5	4.56	4.62	66.5	4.25
h55-w55-t2-f15-H200	109.5	110.1	5.93	6.02	104	5.82
h40-w60-t1-f15-H200	39.7	39.9	3.59	3.7	37.05	3.45
h60-w40-t1-f15-H200	39.8	39.9	3.29	3.36	38.25	3.16
h40-w40-t1-f15-H200	36.4	36.6	3.78	3.85	33.5	3.55
h40-w40-t1-f15-H200 trigger (a10-b20)	33.8	34	3.51	3.61	31.5	3.32

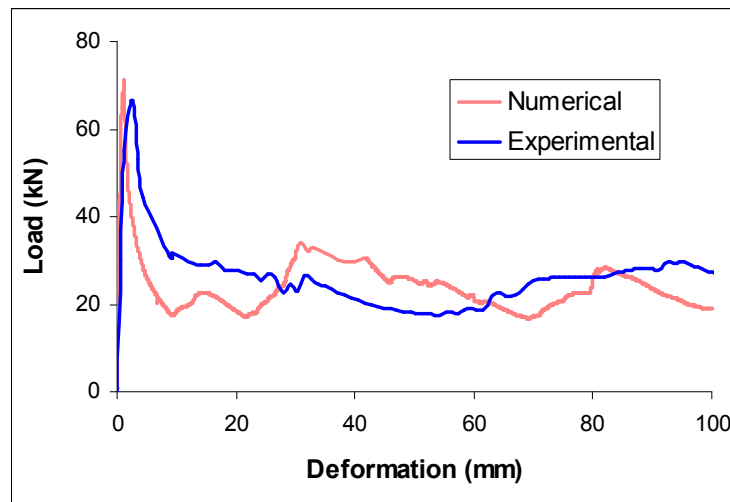
جدول ۵-۲. خطای بین نتایج عددی و تجربی

عنوان نمونه	نیروی ماکزیمم کمانش (kN)		انرژی جذب شده (kJ/kg)	
	المان S8R5	المان S4R	المان S8R5	المان S4R
h55-w55-t1.5-f15-H200	7.1	7.5	7.3	8.7
h55-w55-t2-f15-H200	5.3	5.9	1.9	3.4
h40-w60-t1-f15-H200	7.2	7.7	4.1	7.2
h60-w40-t1-f15-H200	4.1	4.3	4.1	6.3
h40-w40-t1-f15-H200	8.7	9.3	6.5	8.5
h40-w40-t1-f15-H200 trigger (a10-b20)	7.3	7.9	5.7	8.7

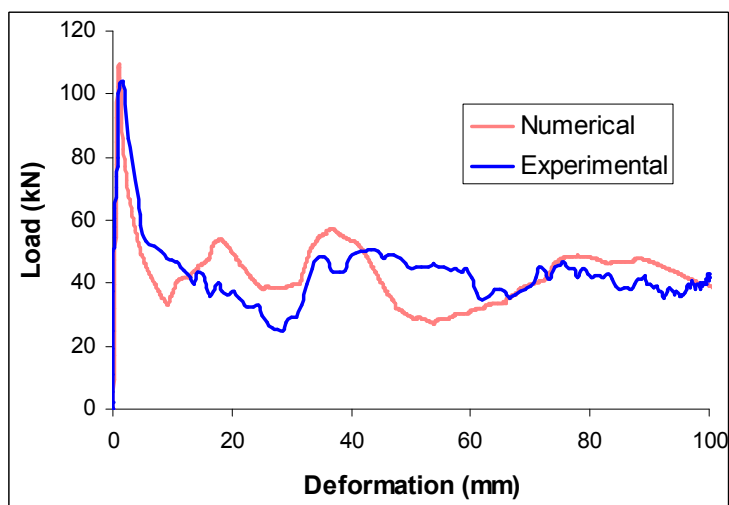
جدول (۲-۵) نشان می دهد که میانگین اختلاف نیروی ماکزیمم کمانش حاصل از نتایج عددی با المانهای غیر خطی S8R5 در مقایسه با نتایج تجربی،  $6/5\%$  و برای المان S4R،  $7\%$  درصد می باشد. این میانگین خطا برای انرژی جذب شده بر واحد جرم  $4/9\%$  و  $7/1\%$  به ترتیب برای المانهای غیرخطی و خطی می باشد. لذا می توان گفت نتایج حاصل از تحلیل با المان های غیر خطی دقیقتر است.

### ۵-۳- مقایسه منحنی های بار - جابجایی ، حاصل از تحلیلهای عددی و تجربی

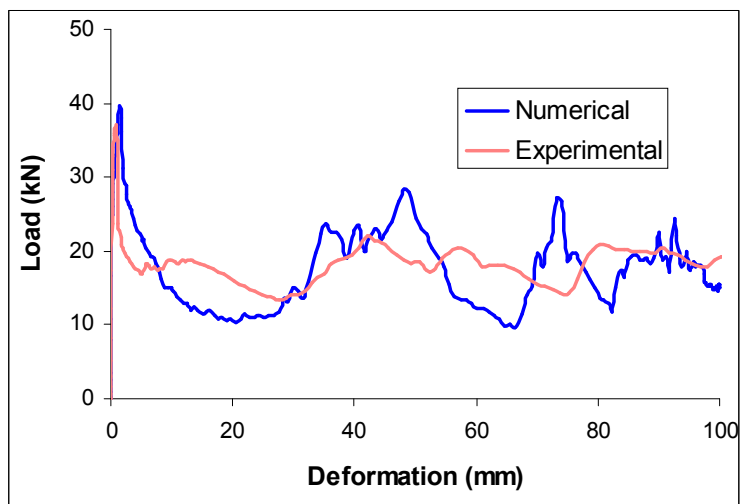
منحنی های بار- جابجایی انتهایی، حاصل از تحلیلهای عددی و تجربی، برای برخی نمونه های آزمایش در شکلهای (۱-۵) تا (۷-۵) ارائه شده است. همچنین تغییر شکل نمونه ها برای هر دو روش تجربی و عددی نیز مقایسه شده اند. از مقایسه منحنی های عددی با تجربی نتیجه می شود که منحنی های عددی و تجربی مطابقت بسیار خوبی دارند.



شکل ۵-۱. مقایسه نتایج تجربی و عددی برای نمونه h55-w55-t1.5-f15-H200

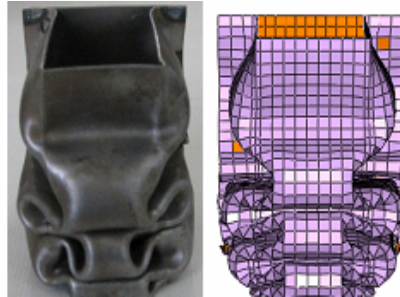
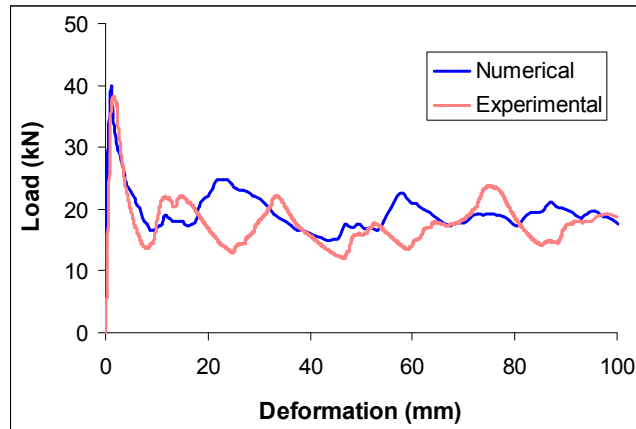


شکل ۵-۲. مقایسه نتایج تجربی و عددی برای نمونه h55-w55-t2-f15-H200

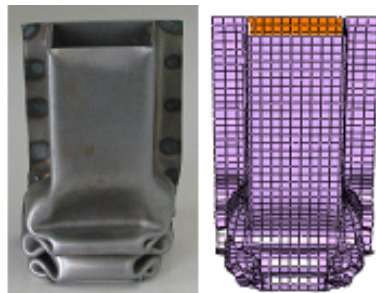
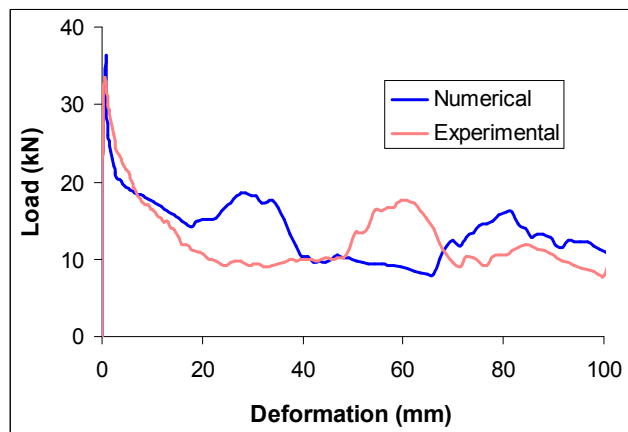


شکل ۵-۳. مقایسه نتایج تجربی و عددی برای نمونه h40-w60-t1-f15-H200

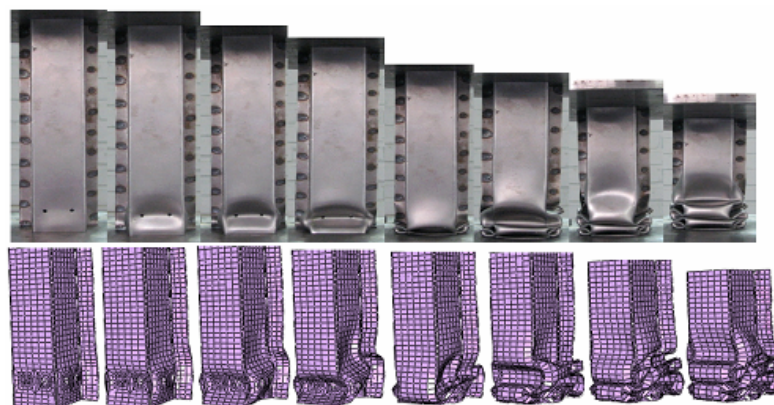
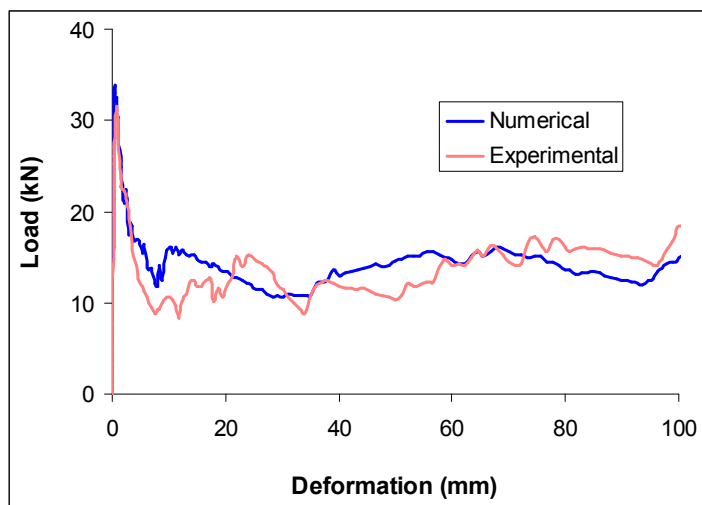




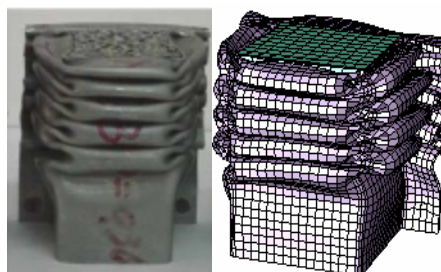
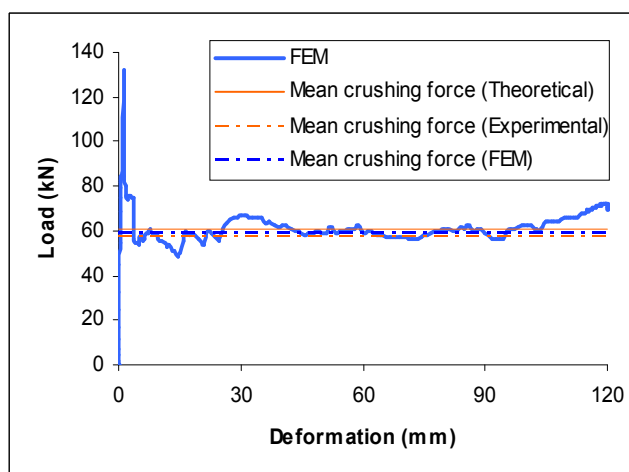
شکل ۴-۵- مقایسه نتایج تجربی و عددی برای نمونه h60-w40-t1-f15-H200



شکل ۵-۵- مقایسه نتایج تجربی و عددی برای نمونه h40-w40-t1-f15-H200



شکل ۵-۶- مقایسه نتایج تجربی و عددی برای نمونه h40-w40-t1-f15-H200 در حالت دارای گشودگی a10-b20



شکل ۵-۷- مقایسه نتایج تجربی [۳۲] و عددی برای نمونه h50-w50-t1-f15-H200 در حالت فوم دار

## فصل ششم

### نتایج و پیشنهادها

## ۶-۱- مقدمه

در این پایان نامه قابلیت جذب انرژی ستونهای جدار نازک ساخته شده توسط نقطه جوش بررسی شد. این ستون ها در ابعاد مختلف به صورت بارگذاری محوری و مایل تحلیل شدند. نتایج حاصل از تحلیلها در بخشهای مربوطه، به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در این بخش نتایج بدست آمده به طور خلاصه و فهرست وار گردآوری شده است. همچنین پیشنهاداتی برای انجام کارهای بعدی و برای علاقه مندان به مطالعه و تحقیق در این زمینه ارائه شده است.

## ۶-۲- نتایج بدست آمده

- ۱- نتایج بدست آمده از تحلیل اجزای محدود با نرم افزار ABAQUS از دقت خوبی برخوردار است.
- ۲- با افزایش طول و عرض سطح مقطع نیروی ماکزیمم کمانش افزایش یافته و انرژی جذب شده بر واحد جرم کاسته می شود.
- ۳- با افزایش ضخامت ستون نیروی ماکزیمم کمانش و انرژی جذب شده بر واحد جرم افزایش می یابد.
- ۴- با افزایش ارتفاع ستون نیروی ماکزیمم کمانش و انرژی جذب شده بر واحد جرم کاهش می یابد.
- ۵- با افزایش طول فلنج نیروی ماکزیمم کمانش افزایش یافته و انرژی جذب شده بر واحد جرم کاهش می یابد.
- ۶- درصد افزایش نیروی ماکزیمم کمانش، با افزایش ضخامت در سطح مقطعی با طول اضلاع بزرگتر بیشتر است.
- ۷- با کاهش تعداد نقطه جوش، نیروی ماکزیمم کمانش به صورت یکنواخت کاهش می یابد.

- ۸- مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم همواره با افزایش تعداد نقطه جوش افزایش نمی یابد و می توان تعداد نقطه جوش بهینه ایی پیدا کرد که با توجه به آن مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم بیشترین مقدار خود را دارد.
- ۹- با استفاده از سوراخهایی کوچک در یک انتهای ستون می توان مقدار نیروی ماکزیمم کمانش را کاهش داد بدون اینکه مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم کاهش یابد.
- ۱۰- بهترین مکان برای ایجاد سوراخ به منظور کاهش نیروی ماکزیمم کمانش نزدیک لبه پایینی و کناری ستون می باشد.
- ۱۱- در بار گذاری مایل کمترین نیروی ماکزیمم کمانش و بیشترین انرژی جذب شده زمانی است که ستون به پهلو قرار گرفته باشد.
- ۱۲- از مقایسه منحنی های حاصل از روش عددی و تجربی نتیجه می شود که این منحنی ها مطابقت بسیار خوبی دارند. همچنین المانهای غیرخطی خطای کمتری نسبت به المانهای خطی دارند.

## ۶-۳- پیشنهادها

- ۱- تحلیل تجربی قابلیت جذب انرژی ستون های جدار نازک ساخته شده توسط نقطه جوش تحت بار خمشی به کمک طراحی یک فیکسچر که قابلیت تبدیل حرکت خطی به چرخش را داشته باشد.
- ۲- انجام تحلیل تجربی و عددی قابلیت جذب انرژی برای ستونهایی با مقاطع متفاوت
- ۳- انجام تحلیل تجربی و عددی قابلیت جذب انرژی برای ستونهایی با جنس متفاوت
- ۴- انجام تحلیل تجربی و عددی قابلیت جذب انرژی ستون های پر شده با فوم
- ۵- استفاده از کنترل کننده های غیر دایرووی و همچنین با چیدمان های متفاوت

۶- بررسی قابلیت جذب انرژی ستونهای ساخته شده توسط تکنیک های دیگر ، تکنیکهایی مانند استفاده از چسب های صنعتی، پرچ، جوش برنج و ...

## **Abstract**

A very important issue in car design nowadays, is the crashworthiness of thin-walled structure. A good crashworthy design requires that the energy absorption should occur in a regular controlled manner and the forces experienced during collapse should be kept within the allowable limits.

This research presents a crashworthiness design of thin walled spot-welded columns made from mild steels in axial and oblique loading. The numerical analysis carried out by Abaqus software. Subsequently, the collapse behavior of spot-weld structures was experimentally characterized. Systematic parametric studies are carried out to study the effect of geometrical parameters such as thickness, the sides of the cross section, height of column and flange width on peak loading and specific energy absorption. Also the effect of number of spot-weld is investigated; too. This research shows that with increasing side lengths and flange width the absorbed energy is reduced, monotonously while the peak force increases. And also with increasing column height the peak crushing force is decrease and SEA was reduced. Also it can be seen with increasing thickness peak crushing force and SEA was increased.

It also is shown that the crash response could be controlled by varying the location and the geometry of the trigger. It reduces peak crushing force without decreasing specific energy absorption. The best location for the trigger is near lateral and down edge.

*Keywords:* crashworthiness , *spot-welding*, *thin-walled structures*, *experimental*, *numerical*

- [1] N.K. Gupta , N. Mohamed Sheriff , R. Velmurugan, (2006) . “ A study on buckling of thin conical frusta under axial loads”. **Thin-Walled Structures**, 44, pp 986–996.
- [2] Z. Ahmad, D.P. Thambiratnam, (2009). “ Dynamic computer simulation and energy absorption of foam-filled conical tubes under axial impact loading”. **Computers and Structures**, 87(3-4), pp 186- 197.
- [3]-Gupta NK , Eswara Prasad GL , Gupta SK, (1999). “Axial compression of metallic spherical shells between rigid plates”. **Thin-Walled Structures** . , 34, PP 21–41.
- [4]-Gupta NK , Venkatesh G, (2004). “Experimental and numerical studies of dynamic axial compression of thin walled spherical shells”. **International Journal of Impact Engineering** . 30 , 8–9 , PP 1225–40.
- [5]-Gupta NK, Mohamed Sheriff N, Velmurugan R, (2008). “Experimental and numerical studies of buckling of thin spherical shells under axial loads” . **International Journal of Mechanical Sciences** . 50 , PP . 422–432 .
- [6] Xiong Zhang, Gengdong Cheng, (2007). “ A comparative study of energy absorption characteristics of foam-filled and multi-cell square columns. ” **International Journal of Impact Engineering**, 34 , pp 1739–1752.
- [7] Yucheng Liu, (2008). “ Crashworthiness design of multi-corner” **Thin-walled columns**. **Thin-Walled Structures**, 46 ,pp 1329– 1337.
- [8] Shujuan Hou, Qing Li , Shuyao Long, XujingYang,Wei Li, (2007). “Design ptimization of regular hexagonal thin-walled columns with crashworthiness criteria”. **Finite Elements in Analysis and Design**, 43 ,pp 555 – 565.
- [9] Ying Liu, Xin-Chun Zhang, (2009). “The influence of cell micro-topology on the in-plane dynamic crushing of honeycombs.” **International Journal of Impact Engineering**, 36 ,pp 98–109.
- [10] J Han. K Yamazaki, (2003). “ Crashworthiness optimization of S-shape square tubes” **Int. J. of Vehicle Design**, 31 ,pp 72-85.
- [11] C. Zhang, A. Saigal, (2007). “Crash behavior of a 3D S-shape space frame structure .” **Journal of Materials Processing Technology**, 191 ,pp 256–259.



- [۱۲] اسدی ح، رضایی ک، (۱۳۸۶)، بررسی تاثیر تقویت کننده ها در میزان جذب انرژی سازه های S شکل. شانزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک ، تبریز
- [13] Parisa Hosseini-Tehrani , Mossa Nikahd, (2006). “Two materials S-frame representation for improving crashworthiness and lightening. ” **Thin-Walled Structures**, 44 ,pp 407–414.
- [14] Rusinek , J.A. Rodríguez-Martínez, R. Zaera, J.R. Klepaczko, A. Arias, C. Sauvelet , (2009). “Experimental and numerical study on the perforation process of mild steel sheets subjected to perpendicular impact by hemispherical projectiles. ” **International Journal of Impact Engineering**, 36 ,pp 565–587.
- [15] Pedro A. Rosa, Rui M.O. Baptista, Jorge M.C. Rodrigues, Paulo A.F. Martins, (2004). “An investigation on the external inversion of thin-walled tubes using a die. ” **International Journal of Plasticity**, 20 ,pp 1931–1946.
- [16] X. Huang, G. Lu, T.X. Yu, (2002) .“On the axial splitting and curling of circular metal tubes. ” **International Journal of Mechanical Sciences**, 44 ,pp 2369–2391.
- [17] A.G. Olabi , E. Morris , M.S.J. Hashmi , M.D. Gilchrist, (2008). “Optimised design of nested circular tube energy absorbers under lateral impact loading. ” **International Journal of Mechanical Sciences**, 50 ,pp 104–116.
- [18]. Elfetori F. Abdewi, Shamsuddeen Sulaiman, A.M.S. Hamouda, E. Mahdi, (2008). “Quasi-static axial and lateral crushing of radial corrugated composite tubes. ” **Thin-Walled Structures**, 46 ,pp 320–332.
- [19] Hui Lu , Lin-Hai Han, Xiao-Ling Zhao, (2009). “Analytical behavior of circular concrete-filled thin-walled steel tubes subjected to bending” **Thin-Walled Structures**, 47, pp 346–358.
- [20] S.R. Guillow, G. Lu, R.H. Grzebieta. “Quasi- static axial compression of thin-walled circular tube. ” **int.J.Mech.Sci** ,43,pp 2103-2123. 2001.
- [21] B.P. DiPaolo , P.J.M. Monteiro, R. Gronsky, (2004). “Quasi-static axial crush response of a thin-wall, stainless steel box component. ” **International Journal of Solids and Structures**, 41,pp 3707–3733.

[۲۲] میرمحمدصادقی ا، حسینی پور ج ، بخشی جویباری م، گرجی ا، (۱۳۸۶)، بررسی جذب انرژی در لهیدگی محوری لوله های جدار نازک شیار دار به کمک روش اجزاء محدود، شانزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک ، تبریز

[23] S.J.Hosseini-pour, G.H.Daneshi. Energy, (2003). "Absorption and Mean Crushing Load of thin-walled Grooved tubes under axial compression." **Journal of thin-walled structures**, 41, pp 31-46.

[۲۴] محمدی پور ر، واحدی خ، (۱۳۸۶)، بررسی میزان جذب انرژی مقاطع جدار نازک مربعی ناشی از بارگذاری مایل، شانزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، تبریز

[25] A. Reyes, O.S. Hopperstad, M. Langseth (2004), Aluminum foam-filled extrusions subjected to oblique loading: experimental and numerical study, **International Journal of Solids and Structures**, 41 ,pp.1645–1675.

[26] White, M.D., Jones, N., (1999). "A theoretical analysis for the dynamic axial crushing of top-hat and double-hat thin-walled sections, ". **Journal of Automobile Engineering**, 213, pp 307–325.

[27] Hong-Wei Song, Zi-Jie Fan, Gang Yu, Qing-Chun Wang, A. Tobota, (2005). "Partition energy absorption of axially crushed aluminum foam-filled hat sections." **International Journal of Solids and Structures**, 42 ,pp 2575–2600.

[28] Yujiang Xiang, QianWang, Zijie Fan, Hongbing Fang, (2006). "Optimal crashworthiness design of a spot-welded thin-walled hat section." **Finite Elements in Analysis and Design**, 42, pp 846 – 855.

[۲۹] خلخالی ا، درویزه ا، نریمان زاده ن، اسدی ح، حدادی م، (۱۳۸۶)، طراحی تکاملی شبکه های عصبی پایه شعاعی برای مدلسازی میزان جذب انرژی سازه های جدار نازک با مقطع کلاهی شکل، شانزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، تبریز

[30] Myeong-Han Lee , Heon-Young Kim , Soo-Ik Oh, (2006). "Crushing test of double hat-shaped members of dissimilar materials with adhesively bonded and self-piercing riveted joining methods." **Thin-Walled Structures**, 44, pp 381–386.

[31] Qingchun Wang, Zijie Fan, Liangjin Gui, (2006). "A theoretical analysis for the dynamic axial crushing behaviour of aluminium foam-filled hat sections." **International Journal of Solids and Structures**, 43, pp 2064–2075.

[32] Qingchun Wang, Zijie Fan, Liangjin Gui, (2007). "Theoretical analysis for axial crushing behaviour of aluminium foam-filled hat sections,". **International Journal of Mechanical Sciences**, 49, pp 515–521.

[33] F. Schneider, N. Jones., (2008). "Observations on the design and modelling of some joined thin-walled." **Thin-Walled Structures**, 46, pp 887–897.

[34] Recep Gumruk, Sami Karadeniz, (2008). "A numerical study of the influence of bump type triggers on the axial crushing of top hat thin-walled sections." **Thin-Walled Structures**, 46, pp 1094–1106.

[35] Lorenzo Peroni, Massimiliano Avalle, Giovanni Belingardi, (2009). "Comparison of the energy absorption capability of crash boxes assembled by spot-weld and continuous joining techniques." **International Journal of Impact Engineering**, 36, pp 498–511.

[36] Recep Gumruk, Sami Karadeniz, (2009) . "The influences of the residual forming data on the quasi-static axial crash response of a top-hat section." **International Journal of Mechanical Sciences**, 51, pp 350–362.

[37] M.R. Bambach , G.Tana, R.H.Grzebie, (2009). "Steel spot-welded hat sections with perforations subjected to large deformation pure bending". **Thin-Walled Structures**, 47, pp 1305–1315.

[۳۸] سگرلیند. ۱۳۸۱. تحلیل اجزای محدود کاربردی. جلد اول. محمدرضا شریعتی. چاپ اول. انتشارات دانشگاه صنعتی اصفهان. ۴۵-۱۰

[39] ABAQUS 6.9 PR11 user's manual.

[40] Qingwu Cheng, William Altenhof, Shun Yi Jin, Chris Powell, Anne-Marie Harte. (2006) "Energy absorption of aluminum foam filled braided stainless steel tubes under quasi-static tensile loading conditions". **International Journal of Mechanical Sciences**, 48, pp 1223–1233

[41] Siavash T. Taher , Rizal Zahari , Simin Ataollahi, Faizal Mustapha , ShahNor Basri, (2009). "A double-cell foam-filled composite block for efficient energy absorption under axial compression". **Composite Structures**, 89 , pp. 399–407.

[42] Chiandussi G, Avalle M, 2002. "Maximisation of the crushing performance of a tubular device by shape optimisation". **Comput Struct**, ,80(27–30), pp.2425–32.

[۴۳] شریعتی م، (۱۳۸۶). "یک تحقیق تجربی بر روی رفتار عمر خستگی اتصالات نقطه جوش شده." گزارش نهایی طرح پژوهشی ، دانشکده مکانیک ، دانشگاه صنعتی شاهرود.





**Shahrood University of Technology**

Mechanical Department

An experimental and numerical crashworthiness investigation of  
crash columns assembled by spot-weld under axial and oblique  
loading

**By**  
Hamid reza allahbakhsh

**Supervisor**  
Dr. Mahmoud shariati

**Date:**  
May 2010