





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی مکانیک

گروه طراحی کاربردی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

همینة سازی ممیزان جذب انرژی یک پوسته نازک مخروطی ناقص از
جنس فولاد ضد زنگ تحت بارگذاری محوری به روش عددی و تجربی

دانشجو:

بابک جاهد

استاد راهنما:

دکتر محمود شریعتی

شهریور ۱۳۹۳

آيسَ اللّٰهُ بِكَافٍ عَبْدَهٗ و

(قرآن كريم، س ۳۹، ي ۳۹)

تقديم به عزيزترين ما

پدر و مادر م



به جبران قطره‌ای از دریای محبتشان

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجل از آن است که در مقام قدردانی از

زحمات او، بازبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، پاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند، را تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب

﴿من لم یسکر المنعم من المخلوقین لم یسکر الله عزوجل﴾

از پدر و مادر عزیزم، این دو معلم بزرگوارم، که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده‌اند و گریانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند و در تمام عرصه‌های زندگی، یار و یاور بی‌چشم داشت برای من بوده‌اند؛ و از استاد ارجمند و شایسته؛ جناب آقای پرفور محمود شیرینی، که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی،

از

پیچ‌کلی در این عرصه، بر من دریغ ننمودند و زحمت راه‌نمایی این رساله را به عهده گرفتند؛

کمال تشکر و قدردانی را دارم

باشد که این خردترین، بخشی از زحمات آنان را پاس گوید.

چکیده:

پوسته‌ها ابزاری مناسب برای جذب انرژی مکانیکی در ضربه‌ها و تصادفات محسوب می‌شوند. آن‌ها با تغییر شکل پلاستیکی که در حین برخورد از خود نشان می‌دهند، ضربه وارده بر سازه‌ها و یا سرنشینان یک خودرو را مستهلک می‌کنند. میزان جذب انرژی در پوسته‌ها در هنگام تصادفات بالا می‌باشد. در این پایان‌نامه سعی بر آن بوده است که با ارائه‌ی مناسب‌ترین تغییرات در هندسه‌ی مخروط‌ها، بیشترین جذب انرژی در تصادفات اتفاق افتد. بر همین اساس بصورت تجربی به کمک دستگاه سروو هیدرولیک ۸۸۰۲، اینسترون و بصورت عددی به کمک نرم‌افزار تجاری آباکوس به تحقیق بر روی پوسته‌های مخروطی ناقص از جنس فولاد ضد زنگ تحت بار محوری پرداخته می‌شود.

برای بررسی امکان و نحوه‌ی افزایش بازدهی پوسته‌های مخروطی در جذب انرژی تغییراتی بر روی هندسه‌ی آن‌ها اعمال می‌گردد. از آن جمله می‌توان به ایجاد گشودگی، اعمال شیار، تغییر در محل قرارگیری گشودگی‌ها، اندازه قطرهای مختلف گشودگی‌ها اشاره نمود.

این پایان‌نامه کمک می‌کند تا بتوان از پوسته‌های مخروطی جدارنازک به‌منظور جذب بیشتر انرژی استفاده نمود. پس از اعمال تغییرات هندسی، آزمایش تجربی بر روی مخروط‌ها صورت پذیرفت. نتایج نشان می‌دهند که پوسته‌های مخروطی دارای شروع‌کننده‌ها، حداکثر نیروی اولیه را کاهش و میزان جذب انرژی را افزایش می‌دهند.

کلمات کلیدی: پوسته، مخروط ناقص، گشودگی، جذب انرژی، شروع کننده‌ها

فصل اول: مقدمه‌ای درباره‌ی پوسته‌ها و مروری بر پژوهش‌های انجام شده.....	۱.....
۱-۱- مقدمه.....	۲.....
۲-۱- تعریف علمی پوسته.....	۲.....
۳-۱- مقدمه‌ای بر پوسته‌ها.....	۳.....
۴-۱- دسته‌بندی پوسته‌ها.....	۳.....
۵-۱- مروری بر مطالعات صورت گرفته.....	۴.....
فصل دوم: مطالعه تجربی.....	۹.....
۱-۲- مقدمه‌ای بر آزمایش‌های انجام شده.....	۱۰.....
۲-۲- دستگاه آزمایش.....	۱۰.....
۳-۲- آزمایش کشش استاندارد.....	۱۱.....
۴-۲- بارگذاری جابجایی- کنترل.....	۱۲.....
۵-۲- روش تجربی.....	۱۳.....
۱-۵-۲- اثر تقارن گشودگی با قطر ۱۵ میلی‌متر بر روی پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر.....	۱۴.....
۲-۵-۲- اثر تقارن گشودگی با قطر ۱۵ میلی‌متر بر روی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر.....	۱۶.....
۳-۵-۲- اثر ارتفاع، بر کمانش، بدون ایجاد شروع‌کننده بر روی پوسته.....	۱۹.....
۴-۵-۲- تأثیر محل قرارگیری گشودگی‌ها.....	۲۲.....
۱-۴-۵-۲- بررسی محل قرارگیری گشودگی‌ها با قطر ۲۰ میلی‌متر بصورت متقارن.....	۲۲.....
۲-۴-۵-۲- بررسی محل قرارگیری گشودگی‌ها با قطر ۱۰ میلی‌متر و اثر آن بر روی جذب انرژی.....	۲۵.....
۵-۵-۳- اثر ایجاد شیار بر جذب انرژی پوسته‌های مخروطی.....	۲۸.....
۶-۵-۲- اثر زاویه‌ی شیار بر جذب انرژی پوسته‌ی مخروطی.....	۳۰.....
فصل سوم: تحلیل عددی و مقایسه نتایج عددی با تجربی.....	۳۵.....
۱-۳- آشنایی با نرم‌افزار آباکوس.....	۳۶.....
۱-۱-۳- مقدمه.....	۳۶.....
۲-۱-۳- بخش‌های آباکوس.....	۳۶.....
۳-۱-۳- مبانی نرم‌افزار آباکوس.....	۳۷.....
۴-۱-۳- کنترل مش‌ریزی تطبیقی.....	۳۸.....
۵-۱-۳- اندازه‌ی المان‌ها و نوع المان‌ها.....	۳۸.....
۶-۱-۳- Solid یا Shell.....	۳۸.....
۷-۱-۳- نوع بارگذاری.....	۳۹.....
۸-۱-۳- متقارن محوری و نامتقارن محوری.....	۳۹.....
۲-۳- مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی.....	۳۹.....
۱-۲-۳- تحلیل عددی بررسی میزان جذب انرژی بر مخروط ناقص ۷۰ میلی‌متری.....	۴۰.....
۲-۲-۳- تحلیل عددی بررسی اثر گشودگی متقارن و نامتقارن در وسط بر روی مخروط ناقص ۷۰ میلی‌متری.....	۴۲.....

۳-۲-۳- تحلیل عددی بررسی اثر گشودگی متقارن و نامتقارن در جذب انرژی بر روی مخروط ناقص به ارتفاع ۱۰۰ میلی متر	۴۴
۳-۲-۴- تحلیل عددی اثر ارتفاع در میزان جذب انرژی بر روی پوسته‌های مخروطی	۵۰
۳-۲-۵- تحلیل عددی وجود یک گشودگی ۲۰ میلی متری در سه ارتفاع مختلف	۵۳
۳-۲-۶- تحلیل عددی اثر ضخامت بر روی پوسته‌ی مخروطی ناقص در جذب انرژی	۵۹
۳-۲-۷- بررسی تحلیل عددی پوسته‌های دارای ضخامت یکسان ۱ میلی‌متر، تحت اثر بارگذاری محوری با سرعت‌های تغییرشکل متفاوت	۶۱
۳-۲-۸- تحلیل عددی اثر اندازه‌ی عرض شیار بر روی پوسته‌ی مخروطی ناقص و اثر آن در جذب انرژی	۶۲
۳-۲-۹- تحلیل عددی اثر زاویه‌ی شیار بر روی میزان جذب انرژی	۶۷
۳-۲-۱۰- بررسی تحلیل عددی پوسته‌ی مخروطی جدارنازک با وجود گشودگی و شیار	۷۱
۳-۲-۱۱- تحلیل عددی، اثر زاویه‌ی شیارها بصورت دو به دو و متقارن بر روی جذب انرژی	۷۳
۷۷- فصل چهارم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها	
۴-۱- نتایج	۷۸
۴-۲- پیشنهادها	۸۰
۸۱- منابع	

فهرست شکل‌ها

صفحه

عنوان

- شکل (۱-۲): دستگاه سروو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ در حال انجام آزمایش کشش استاندارد ۱۰
- شکل (۲-۲): نمای دستگاه سروو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ با نیروسنج ۲۵ کیلونیوتنی ۱۱
- شکل (۳-۲): الف- قطعه‌ی اول برای آزمایش کشش استاندارد. ب- قطعه‌ی دوم برای آزمایش کشش استاندارد ۱۱
- شکل (۴-۲): نمودار تنش- کرنش واقعی و مهندسی برای فولاد SS304 ۱۲
- شکل (۵-۲): نمودار نیرو- جابه‌جایی پوسته‌ی مخروطی به ارتفاع ۷۰ میلی‌متر بصورت عددی و تجربی ۱۳
- شکل (۶-۲): شکل شماتیک انرژی جذب شده نیرو- جابه‌جایی ۱۳
- شکل (۷-۲): الف- پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و نامتقارن ب- پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و متقارن ۱۴
- شکل (۸-۲): تغییر شکل پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و دارای ۲ گشودگی متقارن ۱۴
- شکل (۹-۲): تغییر شکل پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و دارای ۱ گشودگی بصورت نامتقارن ۱۵
- شکل (۱۰-۲): نمودار نیرو - جابه‌جایی تغییر شکل پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و دارای ۲ گشودگی بصورت متقارن ۱۵
- شکل (۱۱-۲): نمودار نیرو - جابه‌جایی تغییر شکل پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و دارای ۱ گشودگی بصورت نامتقارن ۱۵
- شکل (۱۲-۲): الف- پوسته‌ی ۱۰۰ میلی‌متری با ۱ گشودگی ۱۵ میلی‌متری بصورت نامتقارن ب- پوسته‌ی ۱۰۰ میلی‌متری با ۲ گشودگی ۱۵ میلی‌متری بصورت متقارن ۱۶
- شکل (۱۳-۲): نمودار نیرو- جابه‌جایی برای پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متری دارای ۲ گشودگی بصورت متقارن ۱۷
- شکل (۱۴-۲): نمودار نیرو- جابه‌جایی برای پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متری دارای ۱ گشودگی بصورت نامتقارن ۱۷
- شکل (۱۵-۲): ترسیم نمودار پوسته‌ی مخروطی متقارن و نامتقارن با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متری ۱۸
- شکل (۱۶-۲): الف- پوسته‌ی مخروطی با ارتفاع ۷۰ میلی‌متری ب- پوسته‌ی مخروطی ۱۰۰ میلی‌متری ۱۹
- شکل (۱۷-۲): نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متری تحت بارگذاری محوری و بصورت شبه استاتیکی ۱۹
- شکل (۱۸-۲): نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متری تحت بارگذاری محوری و بصورت شبه استاتیکی ۲۰
- شکل (۱۹-۲): ترسیم رفتار نیرو- جابه‌جایی پوسته‌ی با ارتفاع ۷۰ میلی‌متری و ۱۰۰ میلی‌متری همزمان در یک نمودار ۲۱
- شکل (۲۰-۲): نمونه‌ها با ارتفاع ۷۰ و ۱۰۰ میلی‌متر، دارای گشودگی متقارن و نامتقارن در وسط و بدون گشودگی ۲۱
- شکل (۲۱-۲): نحوه‌ی جمع‌شدگی ۴ نمونه آزمایش شده بصورت تجربی از نمای بالا و روبه‌رو ۲۲
- شکل (۲۲-۲): نحوه‌ی جمع‌شدگی قطعه‌ی داری گشودگی در $0.3L$ به قطر 20 میلی‌متر از نمای بالا ۲۳
- شکل (۲۳-۲): نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی در موقعیت $0.3L$ تحت بارگذاری محوری ۲۳
- شکل (۲۴-۲): نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی به موقعیت $0.5L$ تحت بارگذاری محوری ۲۴
- شکل (۲۵-۲): نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی به موقعیت $0.75L$ تحت بارگذاری محوری ۲۴
- شکل (۲۶-۲): نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته‌هایی با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی به ارتفاع $0.5L$ و $0.75L$ و $0.3L$ ، تحت بارگذاری محوری و بصورت شبه استاتیکی ۲۵
- شکل (۲۷-۲): جمع‌شدگی متقارن پوسته‌ی مخروطی با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی در طول $0.3L$ تحت بارگذاری محوری ۲۶
- شکل (۲۸-۲): نمودار نیرو- جابه‌جایی پوسته با قطر ۱۰ میلی‌متر و گشودگی در طول $0.3L$ ، تحت بارگذاری محوری و شبه استاتیکی بصورت تجربی ۲۶

- شکل (۲-۲۹): نمودار نیرو- جابه‌جایی، ۴ حالت قرارگیری گشودگی‌ها با هم در یک نمودار تحت بارگذاری محوری
 ۲۷..... بصورت تجربی.....
- شکل (۲-۳۰): (الف): پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۳ میلی‌متر در وسط.(ب): پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۲ میلی‌متر در وسط. شکل(پ): پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط
 ۲۸.....
- شکل (۲-۳۱): نمودار نیرو- جابه‌جایی پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط با زاویه‌ی صفر درجه، تحت بارگذاری محوری.....
 ۲۹.....
- شکل (۲-۳۲): نمودار نیرو- جابه‌جایی پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۲ میلی‌متر در وسط با زاویه‌ی صفر درجه، تحت بارگذاری محوری.....
 ۲۹.....
- شکل (۲-۳۳): نمودار نیرو- جابه‌جایی پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۳ میلی‌متر در وسط با زاویه‌ی صفر درجه، تحت بارگذاری محوری.....
 ۳۰.....
- شکل(۲-۳۴): پوسته‌های مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط با زاویه‌های به ترتیب صفر (عمودی)، ۴۵ و ۹۰ (افقی) درجه.....
 ۳۱.....
- شکل (۲-۳۵): نمودار نیرو- جابه‌جایی پوسته‌های مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط با زاویه‌های ۴۵ درجه و ۹۰ درجه (افقی).....
 ۳۲.....
- شکل(۲-۳۶): پوسته‌ی مخروطی با شیار به عرض ۳ میلی‌متر در وسط با زاویه‌ی ۰ درجه تحت بار محوری از نمای روبه‌رو تحت بارگذاری تحت آزمایش.....
 ۳۲.....
- شکل (۲-۳۷): رفتار نیرو- جابه‌جایی ۳ نوع وجود شیار با زاویه‌های مختلف ۰، ۴۵ و ۹۰ بر روی پوسته‌های مخروطی.....
 ۳۳.....
- شکل (۲-۳۸): رفتار نیرو- جابه‌جایی ۳ حالت وجود شروع کننده شیار با زاویه‌های یکسان و با اندازه عرض متفاوت ۱ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر.....
 ۳۴.....
- شکل (۳-۱): هندسه‌ی نمونه‌ی مورد آزمایش به ارتفاع ۷۰ میلی‌متر
 ۴۰.....
- شکل (۳-۲): نمودار نیرو- جابه‌جایی پوسته‌ی مخروطی ناقص به ارتفاع ۷۰ میلی‌متر بصورت عددی و تحلیلی.....
 ۴۰.....
- شکل (۳-۳): پوسته‌ی مخروطی ناقص به ارتفاع ۷۰ میلی‌متر دارای یک و دو گشودگی.....
 ۴۱.....
- شکل (۳-۴): نمودار نیرو - جابه‌جایی مخروط دارای دو گشودگی متقارن درمیان مخروط با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر بصورت عددی.....
 ۴۱.....
- شکل (۳-۵): نمودار نیرو - جابه‌جایی مخروط دارای یک گشودگی درمیان مخروط با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر بصورت عددی.....
 ۴۲.....
- شکل (۳-۶): تحلیل عددی و تجربی مخروط ناقص ۷۰ میلی‌متری دارای گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر در وسط بصورت متقارن تحت بارگذاری محوری.....
 ۴۲.....
- شکل (۳-۷): تحلیل عددی و تجربی مخروط ناقص دارای یک گشودگی ۱۵ میلی‌متر در وسط تحت بارگذاری محوری.....
 ۴۳.....
- شکل (۳-۸): الف- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته با ۱ گشودگی بصورت نامتقارن تحت بارگذاری محوری بصورت تحلیل عددی. ب- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته با ۲ گشودگی بصورت متقارن تحت بارگذاری محوری بصورت تحلیل عددی.....
 ۴۴۸.....
- شکل (۳-۹): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیل عددی پوسته‌ی مخروطی ۱۰۰ میلی‌متری دارای ۲ گشودگی بصورت متقارن در وسط ارتفاع پوسته.....
 ۴۴.....

- شکل (۱۰-۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی پوسته‌ی مخروطی ۱۰۰ میلی‌متری دارای ۱ گشودگی بصورت نا متقارن در وسط ارتفاع پوسته..... ۴۵
- شکل (۱۱-۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی و تجربی پوسته‌ی مخروطی دارای دو گشودگی تحت بارگذاری محوری بر روی هم ۴۵
- شکل (۱۲-۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی و تجربی پوسته‌ی مخروطی دارای یک گشودگی تحت بارگذاری محوری بر روی هم ۴۶
- شکل (۱۳-۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی روش تجربی مخروط ناقص با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر دارای یک و دو گشودگی تحت بارگذاری محوری بر روی هم ۴۷
- شکل (۱۴-۳-الف): نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی دارای دو گشودگی تحت بارگذاری محوری، شکل (۳-۱۴-ب): نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی دارای یک گشودگی تحت بارگذاری محوری، ۴۹
- شکل (۱۵-۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی و تجربی پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متری تحت بارگذاری محوری..... ۵۰
- شکل (۱۶-۳): مقایسه نمودارهای نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی و تجربی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری ۵۱
- شکل (۱۷-۳): مقایسه نمودارهای نیرو - جابه‌جایی پوسته با طول‌های ۷۰ میلی‌متر، ۱۰۰ میلی‌متر و ۱۵۰ میلی‌متر بصورت تحلیلی عددی..... ۵۲
- شکل (۱۸-۳): نحوه‌ی جمع‌شدگی با طول ۱۵۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری..... ۵۳
- شکل (۱۹-۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی پوسته‌ی ۱۰۰ میلی‌متری دارای گشودگی با قطر ۲۰ میلی‌متری در ارتفاع ۰/۳L تحت بارگذاری محوری..... ۵۳
- شکل (۲۰-۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی پوسته‌ی ۱۰۰ میلی‌متری دارای گشودگی با قطر ۲۰ میلی‌متری در ارتفاع ۰/۵L تحت بارگذاری محوری..... ۵۴
- شکل (۲۱-۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی پوسته‌ی ۱۰۰ میلی‌متری دارای گشودگی با قطر ۲۰ میلی‌متری در ارتفاع ۰/۷۵L تحت بارگذاری محوری..... ۵۴
- شکل (۲۲-۳): الف- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع ۰/۳L ب- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع ۰/۵L ۵۵
- شکل (۲۳-۳): مقایسه‌ی نموداری نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی و تجربی پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع ۰/۳L تحت بارگذاری محوری ۵۵
- شکل (۲۴-۳): مقایسه‌ی نموداری نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی و تجربی پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع ۰/۵L تحت بارگذاری محوری ۵۶
- شکل (۲۵-۳): مقایسه‌ی نموداری نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی و تجربی پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع ۰/۷۵L تحت بارگذاری محوری ۵۶
- شکل (۲۶-۳): مقایسه‌ی نموداری نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی و تجربی پوسته‌ی دارای ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و دارای گشودگی ۱۰ میلی‌متر در ارتفاع ۰/۳L ۵۷
- شکل (۲۷-۳): مقایسه نمودارهای نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی بر روی پوسته‌های دارای دو گشودگی به قطر ۲۰ میلی‌متر و ۱۰ میلی‌متر در سه ارتفاع ۵۸
- شکل (۲۸-۳): الف- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته با ضخامت ۲ میلی‌متر. ب- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر. پ- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته با ضخامت ۱ میلی‌متر. ت- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر ۵۹

- شکل (۳-۲۹): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیل عددی صورت گرفته بر روی پوسته‌ها با ضخامت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر ۶۰
- شکل (۳-۳۰): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیل عددی پوسته‌های مخروطی ناقص در سرعت‌های متفاوت تحت بارگذاری محوری بصورت استاتیکی ۶۱
- شکل (۳-۳۱): الف- پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار به عرض ۳ میلی‌متر، ب- پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار به عرض ۲ میلی‌متر، ج- پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار به عرض ۱ میلی‌متر ۶۳
- شکل (۳-۳۲): نمودار نیرو - جابه‌جایی مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر ۶۴
- شکل (۳-۳۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۲ میلی‌متر ۶۴
- شکل (۳-۳۴): نمودار نیرو - جابه‌جایی مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۳ میلی‌متر ۶۵
- شکل (۳-۳۵): نمودار نیرو - جابه‌جایی مقایسه‌ی تحلیل عددی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر و ۲ میلی‌متر ۶۶
- شکل (۳-۳۶): الف- پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار به عرض ۳ میلی‌متر، ب- پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار به عرض ۲ میلی‌متر، ج- پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار به عرض ۱ میلی‌متر ۶۷
- شکل (۳-۳۷): الف- پوسته‌ی جدارنازک با زاویه‌ی شیار ۰ درجه (عمودی)، ب- پوسته‌ی جدارنازک با زاویه‌ی شیار ۴۵ درجه، ج- پوسته‌ی جدارنازک با زاویه‌ی شیار ۹۰ درجه (افقی) ۶۸
- شکل (۳-۳۸): نمودار نیرو - جابه‌جایی مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر ۶۹
- شکل (۳-۳۹): نمودار نیرو - جابه‌جایی مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی ۴۵ درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر ۶۹
- شکل (۳-۴۰): نمودار نیرو - جابه‌جایی مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی ۹۰ درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر ۷۰
- شکل (۳-۴۱): الف- پوسته‌ی مخروطی دارای یک گشودگی به قطر ۱۰ میلی‌متر و شیار به عرض ۱ میلی‌متر با زاویه‌ی صفر درجه، ب- پوسته‌ی مخروطی دارای یک گشودگی به قطر ۱۰ میلی‌متر و شیار به عرض ۱ میلی‌متر با زاویه‌ی ۹۰ درجه ۷۱
- شکل (۳-۴۲): نمودار نیرو - جابه‌جایی، تحلیل عددی پوسته‌های جدارنازک دارای قطر گشودگی یکسان ۱۰ میلی‌متر و شیار به عرض ۱ میلی‌متر و زاویه‌ی ۰ و ۹۰ ۷۲
- شکل (۳-۴۳): الف- پوسته‌ی مخروطی دارای ۴ شیار متقارن با زاویه‌ی صفر درجه، ب- پوسته‌ی مخروطی دارای ۲ شیار متقارن با زاویه‌ی صفر درجه و ۲ شیار متقارن با زاویه‌ی صفر درجه، ج- پوسته‌ی مخروطی دارای ۲ شیار متقارن با زاویه‌ی صفر درجه و ۲ شیار متقارن با زاویه‌ی صفر درجه ۷۳
- شکل (۳-۴۴): مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی، پوسته‌های مخروطی جدارنازک با زاویه‌ی شیارهای بصورت دو به دو و متقارن ۷۴
- شکل (۳-۴۵): الف- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی جدارنازک دارای شیار به ترتیب با زاویه‌های افقی، ب- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی جدارنازک دارای شیار به ترتیب با زاویه‌های عمودی، ج- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی جدارنازک دارای شیار به ترتیب با زاویه‌های افقی - عمودی ۷۵

فهرست جداول

عنوان

صفحه

جدول (۲-۱): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروط ناقص ۱۰۰ میلی‌متری دارای دو و یک گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر.....	۱۸
جدول (۲-۲): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروط ناقص ۷۰ و ۱۰۰ میلی‌متری.....	۲۰
جدول (۲-۳): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی به موقعیت $L/3$ ، و $L/5$ و $L/75$	۲۵
جدول (۲-۴): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی به قطر ۲۰ میلی‌متر و موقعیت $L/3$ ، $L/5$ و $L/75$ و پوسته با ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر و گشودگی به قطر ۱۰ میلی‌متر و موقعیت $L/3$	۲۷
جدول (۲-۵): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌های مخروطی با شیار به عرض ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر در وسط با زاویه‌ی صفر درجه، تحت بارگذاری محوری.....	۳۰
جدول (۲-۶): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌های مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط با زاویه‌های صفر درجه (عمودی)، ۴۵ درجه و ۹۰ درجه (افقی).....	۳۳
جدول (۳-۱): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروط ناقص ۷۰ میلی‌متری دارای دو گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر.....	۴۳
جدول (۳-۲): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروط ناقص ۷۰ میلی‌متری دارای یک گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر.....	۴۳
جدول (۳-۳): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروط ناقص ۱۰۰ میلی‌متری دارای دو گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر.....	۴۶
جدول (۳-۴): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروط ناقص ۱۰۰ میلی‌متری دارای دو گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر.....	۴۶
جدول (۳-۵): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروط ناقص ۱۰۰ میلی‌متری دارای دو و یک گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر بصورت تجربی.....	۴۷
جدول (۳-۶): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری.....	۵۱
جدول (۳-۷): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری.....	۵۱
جدول (۳-۸): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته با ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری.....	۵۱
جدول (۳-۹): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع $L/3$ تحت بارگذاری محوری.....	۵۶
جدول (۳-۱۰): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع $L/5$ تحت بارگذاری محوری.....	۵۷
جدول (۳-۱۱): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع $L/75$ تحت بارگذاری محوری.....	۵۷
جدول (۳-۱۲): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع $L/3$ و قطر ۱۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری.....	۵۸
جدول (۳-۱۳): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌های مخروطی با ضخامت‌های ۰.۵، ۱، ۱.۵ و ۲ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری.....	۶۰

- جدول (۳-۱۴): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه‌ی پوسته‌های بر اثر سرعت‌های تغییرشکل به ترتیب، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر بر ثانیه..... ۶۱
- جدول (۳-۱۵): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه‌ی پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری..... ۶۵
- جدول (۳-۱۶): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه‌ی پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۲ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری..... ۶۵
- جدول (۳-۱۷): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه‌ی پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۳ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری..... ۶۶
- جدول (۳-۱۸): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه‌ی پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر..... ۷۰
- جدول (۳-۱۹): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه‌ی پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی ۴۵ درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر..... ۷۰
- جدول (۳-۲۰): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه‌ی پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی ۹۰ درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر..... ۷۰
- جدول (۳-۲۱): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه‌ی پوسته‌های جدارنازک دارای قطر گشودگی یکسان ۱۰ میلی‌متر و شیار به عرض ۱ میلی‌متر و زاویه‌ی ۰ و ۹۰..... ۷۲
- جدول (۳-۲۲): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌های جدار نازک، دارای شیار به ترتیب با زاویه‌های افقی، عمودی، افقی و عمودی (۰ و ۹۰ درجه)..... ۷۵

فصل اول

مقدمه‌ای درباره‌ی پوسته -

ها

و مروری بر پژوهش‌های

انجام شده

۱-۱- مقدمه

امروزه با گسترش نا وگان نقلیه نظیر خودروها، هواپیماها و قطارها، برای افزایش ایمنی سرنشینان و کاهش صدمات ناشی از تصادفات، استفاده از مستهلک‌کننده‌ها^۱ یا جاذب‌های انرژی^۲ در وسایل نقلیه و لوازم خانگی بسیار مرسوم شده است. جاذب‌های انرژی بصورت کلی از دیدگاه برگشت‌پذیری به سه نوع الاستیک^۳، الاستیک - پلاستیک و پلاستیک^۴ تقسیم می‌شوند. در وسایل گوناگون بسته به نوع جذب انرژی و میزان ضربه، از یکی از این جاذب‌ها استفاده می‌گردد. در مواردی که به تعداد دفعات بالا و با مقدار انرژی وارده‌ی تقریباً پایین اتفاق می‌افتد از مواد الاستیک استفاده می‌گردد. مانند لرزش‌گیر ماشین‌های لباسشویی و یا مهار ضربه‌ی وارد از زمین به چرخ جلوی یک هواپیما هنگام نشستن بر روی زمین که بیشتر با حالت الاستیک انرژی وارده را مستهلک می‌کنند. اما در مواردی که هدف فقط از بین بردن انرژی بالای وارده و جلوگیری از انتقال آن به هر نحو می‌باشد از مواد الاستیک - پلاستیک استفاده می‌گردد.

از مستهلک‌کننده‌های خودرو می‌توان به سپرها، شاسی‌های چندتکه، بدنه‌ی کامپوزیتی و میله‌های مورب متصل به شاسی و... نام برد. امروزه علاوه بر این جاذب‌ها از سازه‌هایی استفاده می‌گردد که مزیت‌های بسیاری به همراه دارند. از جمله‌ی این مزیت‌ها می‌توان به ارزان بودن، کم‌حجم بودن، سهولت ساخت، تغییر شکل با کمترین حجم اشغال شده و بالاترین میزان جذب انرژی و... اشاره نمود. این سازه‌ها، پوسته‌ها هستند که بصورت‌های استوانه‌ای، مخروطی، نیم‌کره‌ی و... مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در دهه‌های اخیر، آزمایشات زیادی بر روی پوسته‌ها، برای میزان جذب انرژی صورت گرفته است. در این پایان‌نامه، سعی شده است فاکتورهای جدیدی بصورت تجربی و عددی بر روی پوسته‌های مخروطی از جنس فولاد^۵ که بیشترین بازده را دارا می‌باشد بررسی شوند و بهترین روش برای افزایش میزان جذب انرژی یک مخروط ناقص از جنس فولاد بیان گردد.

۱-۲- تعریف علمی پوسته [۶۸]

پوسته، سازه‌هایی هستند که شکل اولیه‌ی آن‌ها به ترتیب تخت و خمیده، می‌باشد ضخامت آن‌ها نسبت به دو بعد دیگر بسیار کوچک‌تر است. معیاری که برای تعریف یک ورق یا پوسته نازک به کار برده می‌شود، این است که باید نسبت ضخامت به طول ضلع کوچک‌تر ورق، کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد. به دلیل وجود گسترده‌ی این گونه سازه‌ها در سیستم‌های طبیعی و مصنوعی، از دیرباز پوسته‌ها مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است.

1. Dampers

2. Energy absorption

3. Elastic

4. Plastic

5. Steel

۱-۳- مقدمه‌ای بر پوسته‌ها

پوسته‌ها^۱ به عنوان اجزای سازه‌ها نقش مهمی را در مهندسی به ویژه مهندسی مکانیک، هوافضا، عمران، معماری، و معدن دارند. نمونه‌های زیادی از این دسته سازه‌ها نظیر سقف‌های گنبدی شکل، تانکرها، مخازن نگهداری سیال، رآکتورهای اتمی، پرتابه‌ها، موشک‌ها و... در سیستم‌های مصنوعی و ساخته شده توسط بشر یافت می‌شود. این نمونه‌ها در سیستم‌های طبیعی نیز یافت می‌شوند که می‌توان برای مثال از جمجمه، صدف، لاک، استخوان‌ها و... نام برد. این نمونه‌ها، تنها تعداد محدودی از کاربرد وسیع پوسته‌ها در سیستم‌های طبیعی و مصنوعی می‌باشند.

موارد زیر را می‌توان به عنوان دلایل استفاده‌ی پرکاربرد پوسته‌های سازه‌ای برشمرد [۱].

۱- تحمل بالا در برابر نیروی محوری وارد شده؛

۲- فضای کم مورد نیاز؛

۳- کم بودن هزینه‌ی ساخت؛

از میان پوسته‌های بیان شده پوسته‌های استوانه‌ای و مخروطی به دلیل کاربردهای بیشتر در ساختار تجهیزات نظر پژوهشگران را از دیرباز به خود جلب کرده و در اکثر منابع درسی و پژوهشی بخشی را به خود اختصاص داده است. از بین پوسته‌ها، پوسته‌های مخروطی دارای بیشترین اثر در جذب انرژی را دارا می‌باشند پژوهشگران در پی اعمال تغییراتی در ماده یا هندسه‌ی پوسته‌های مخروطی، برآمدند تا مطلوبیت آن‌ها را افزایش دهد و ویژگی‌های جدیدی را به آن‌ها می‌افزایند. با توجه به آنچه بیان شد و لزوم کاربرد پوسته‌های مخروطی با مواد و هندسه‌ی جدید در تجهیزات حاضر پژوهشگران تلاش خود را برای تحلیل پوسته‌های مخروطی با مواد و هندسه‌ی جدید آغاز کردند. آنان با تغییر در هندسه‌ی پوسته‌های جدارنازک، سعی در کاهش وزن، افزایش جذب انرژی در هنگام جمع‌شدگی پوسته و کاهش حداکثر نیروی اولیه، دارند.

۱-۴- دسته‌بندی پوسته‌ها:

در این بخش، پوسته‌ها را از دیدگاه هندسی، مادی و رفتاری دسته‌بندی می‌کنیم.

الف) دیدگاه هندسی

پوسته‌ی جدار نازک:^۲ پوسته‌ای که نسبت ضخامت به شعاع انحنای سطح میانی^۳ آن کوچک‌تر از

$$\frac{1}{20} \text{ باشد.}$$

پوسته‌ی جدار ضخیم:^۴ پوسته‌ای که نسبت ضخامت به شعاع انحنای سطح میانی آن بزرگ‌تر از

$$\frac{1}{20} \text{ باشد.}$$

^۱ . Shells

^۲ . Thin Shell

^۳ . Middle Surface

^۴ . Thick Shell

ب) دیدگاه مادی

پوسته‌ی همگن و همسانگرد: ^۱ خواص مکانیکی ماده‌ی پوسته در نقاط مختلف و جهات مربوط به هر نقطه یکسان است.

پوسته‌ی همگن و ناهمسانگرد: خواص مکانیکی ماده‌ی پوسته در نقاط مختلف جسم یکسان است ولی در جهات مربوط به هر نقطه یکسان نیست.

پوسته‌ی ناهمگن و همسانگرد: خواص مکانیکی ماده‌ی پوسته در نقاط مختلف جسم یکسان نیست ولی در جهات مربوط به هر نقطه یکسان است.

پوسته‌ی ناهمگن و ناهمسانگرد: ^۲ خواص مکانیکی ماده‌ی پوسته هم در نقاط مختلف جسم و هم در جهات مربوط به هر نقطه یکسان نیست.

ج) دیدگاه رفتاری

پوسته با تغییرشکل‌های کوچک: ^۳ جابه‌جایی هر نقطه از پوسته قبل و پس از بارگذاری، کوچک است (رفتار خطی از نظر هندسی).

پوسته با تغییرشکل‌های بزرگ: ^۴ جابه‌جایی هر نقطه از پوسته قبل و پس از بارگذاری، کوچک نیست (رفتار غیرخطی از نظر هندسی).

پوسته با رفتار کشسان: ^۵ تغییرشکل‌ها بازگشت‌پذیرند و روابط تنش – کرنش از قانون عمومی هوک پیروی می‌کنند (رفتار خطی از نظر مادی).

پوسته با رفتار مومسان: ^۶ تغییرشکل‌ها بازگشت‌ناپذیرند و روابط تنش – کرنش از قانون عمومی هوک پیروی نمی‌کنند (رفتار غیرخطی از نظر مادی).

۱-۵- مروری بر مطالعات انجام شده

زمان نسبتاً طولانی است که محققین بطور گسترده به تحقیق بر روی پوسته‌ها پرداخته‌اند و این روند تا امروز نیز ادامه دارد. مطالعه‌های صورت گرفته در گذشته را می‌توان بر اساس تاریخ، نوع تحقیق، جنس ماده‌ی مورد آزمایش و... طبقه‌بندی نمود که هر کدام در جای خود مفید و سودمند خواهند بود. در ابتدا، بر اساس اهمیت و نوع تحقیقات و بر اساس زمان و تاریخ تحقیق طبقه‌بندی صورت گرفته و در آخر بصورت موضوعی به تحقیقات مرتبط با موضوع پایان‌نامه پرداخته شده است.

اولین بار، یک نمونه‌ی ساده توسط الکساندر [۱] در سال ۱۹۶۰ برای پیش‌بینی نیروی میانگین و میزان جذب انرژی از لوله‌های استوانه‌ای تحت فشار آزمایش شد. در سال‌های بعد سریده و آمدال در

^۱ . Homogeneous and Isotropic Shell

^۲ . Inhomogeneous and Anisotropic Shell

^۳ . Small Deflection

^۴ . Large Detlection

^۵ . Elastic Behavior

^۶ . Plastic Behavior

سال ۱۹۸۱ [۲-۵] و آندرونیکز در سال ۱۹۸۱ مدل الکساندر را گسترش دادند. در سال ۱۹۸۳، ویزریچی و آبرومویچ به بررسی میزان جذب انرژی توسط پوسته‌های چهارگوش پرداختند [۶] و مدل‌های قبلی که در ابتدا با مدل الکساندر شروع شده بود را توسعه دادند و فاکتورهای بیشتری را بررسی نمودند. آنها نشان دادند این پوسته‌ها با مقطع مربع جاذب خوبی هستند. در سال ۱۹۷۰، پست لتویت و میلز یک آزمایش برخورد محوری را بر روی پوسته‌هایی با زوایای ۵-۲۰ درجه را انجام دادند و میزان جذب انرژی آن‌ها را بررسی نمودند و نشان دادند که مخروط‌ها نیز می‌توانند جاذب‌های خوبی برای انرژی باشند [۷]. در سال ۱۹۷۷، رامسی به تحقیق بر روی پوسته‌ی مخروطی شکل از جنس آلومینیوم پرداخت [۸]. وی جنس آلومینیوم را برای جذب انرژی بررسی و میزان تغییر شکل الاستیک - پلاستیک آن را مطلوب توصیف نمود. و اعلام نمود که آلومینیوم توانایی جذب انرژی را افزایش می‌دهد. بعدها در سال ۱۹۸۳، ممالیس و جانسون به بررسی پوسته‌های مخروطی از جنس آلومینیوم با زوایای متغیر از ۵ تا ۱۰ درجه تحت بارگذاری شبه استاتیک^۱ پرداختند. آن‌ها رفتار تغییر شکل حداکثر بار اولیه^۲ و نمودار نیرو- جابه‌جایی را بررسی نمودند و حالت‌های فروپاشی گوناگون را بررسی کردند [۹]. آن‌ها تأثیر مثبت افزایش زاویه و افزایش ضخامت t ، نسبت به قطر d ، را ثابت کردند. t ضخامت پوسته به طور میانگین و d قطر بالای پوسته است).

در سال ۱۹۸۶، ممالیس و همکاران براساس نتیجه‌های قبلی و با تغییر جنس پوسته، با بررسی بر روی پوسته‌هایی از جنس PVC، نتیجه‌های قبل را با نتایج خود مقایسه نموده و نشان دادند که این سازه‌ها دارای میزان جذب انرژی کمتری نسبت به پوسته‌هایی از جنس فولاد هستند [۱۰]. در سال ۱۹۸۸، ممالیس و همکاران به تحقیق بر روی پوسته‌ها با مقطع شش ضلعی پرداختند [۱۱ و ۱۲]. آن‌ها پس از اثبات جذب انرژی در مقاطع مربعی، نشان دادند که مقاطع شش ضلعی میزان جذب انرژی بهتری نسبت به مقاطع مربعی بوده و حداکثر نیروی اولیه را کاهش می‌دهند. گوپتا و همکاران در سال ۱۹۷۷، به بررسی شبه استاتیک پوسته‌های مخروطی^۳ با زاویه‌ی خاص و مشخص پرداختند و در سال ۲۰۰۲ نشان دادند که تأثیر زاویه در پوسته‌ها بسیار زیاد بوده و بهترین زاویه برای پوسته را بین ۵ تا ۳۰ درجه از خط عمود بیان نمودند [۱۳]. در سال ۲۰۰۱، گیلو و همکارانش به تحقیق بر روی پوسته‌های استوانه‌ای با مقاطع دایروی پرداختند. آن‌ها به طور خاص سطح مقطع دایروی و تأثیر آن در جذب انرژی را بررسی نمودند. بر اساس نظر گیلو، در سال ۲۰۰۱ [۴۴ و ۴۵] و رید و ردی در سال ۱۹۷۹ و ممالیس و همکارانش، می‌توان سطح مقطع دایروی را دارای بیشترین جذب انرژی و همچنین دارای بیشترین تقارن در سطح مقطع در جمع‌شدگی پلاستیک دانست [۱۴-۱۶]. به عبارتی هرچه گوشه‌ها بیشتر باشد، جذب انرژی بیشتری صورت می‌گیرد. وقتی گوشه‌ها بینهایت شود. شکل سطح مقطع به دایره نزدیک‌تر می‌شود. پس دایره جاذب بهتری نسبت به بقیه می‌باشد.

در سال ۲۰۰۰، درونتز نیز به بررسی میزان جذب انرژی توسط پوسته‌های کروی^۴ پرداخت و

^۱. Quasi-static

^۲. Peak initial force

^۳. Conical Shells

^۴. Shells

نتایج قبلی را در بارگذاری بررسی نمود. آن‌ها بیان نمودند پوسته‌های کروی توانایی کمتری نسبت به پوسته‌های استوانه‌ای در جذب انرژی دارند [۱۷]. در سال ۲۰۰۴، ریز و همکارانش به بررسی کاربرد فوم آلومینیوم با چگالی بالا پرداختند. آن‌ها تأثیر فوم بر روی جذب انرژی را اثبات و آن‌ها را به عنوان یک فاکتور مهم در بالا بردن جذب انرژی و میزان تغییر شکل بیان نمودند [۱۸]. در سال ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹، به ترتیب آقایان کروگر و زارعی سعی نمودند تا مقدار وزن پوسته‌های فوم آلومینیومی را کاهش و میزان جذب انرژی را افزایش دهند. آن‌ها می‌دانستند که فاکتور وزن در کاربرد عملی جاذب‌ها دارای اهمیت بالایی می‌باشند. آن‌ها اثبات نمودند که علاوه بر این خاصیت، میزان چگالش فوم‌ها تأثیر بسزایی علاوه بر میزان جذب انرژی بر نوع کمانش ایفا می‌نماید [۱۹ و ۲۰]. در سال ۲۰۰۹، هوو و همکارانش از ستون‌های پوسته‌ای مربع‌ای پر شده از فوم آلومینیوم برای از بین بردن انرژی وارده و یا کاهش آن استفاده نمودند. آن‌ها تأثیر مستقیم فوم آلومینیوم را اثبات نموده و نشان دادن پوسته‌های مربعی جمع‌شدگی متقارن دارند و ضربه‌ی اولیه را بخوبی توسط این فوم‌ها جذب می‌نمایند [۲۱].

نریمان‌زاده به این نتیجه رسیدند که وجود فوم پلی‌اتان در لوله‌های دایروی اثر کمی در افزایش میزان جذب انرژی دارد. همچنین آن‌ها بیان نمودند قلّه‌ی ضربه‌ی اولیه^۱ در پوسته‌های با درپوش ۲۰ تا ۳۰ درصد کمتر است از پوسته‌های بدون درپوش و پوسته‌هایی با مقطع دایروی دارای درپوش در برخورد بهترین بازده را داشته و جاذب خوبی محسوب می‌شود [۲۲]. آن‌ها اثبات نمودند که گرد شدن^۲ درپوش‌ها در میزان قلّه‌ی اولیه‌ی ضربه بسیار مؤثر است.

در طول دهه‌ی گذشته، می‌توان بیان نمود که تحقیقات بر روی این سازه‌ها از منظرهای گوناگون صورت گرفته است که می‌توان آن‌ها را به چندین گروه کلی تقسیم نمود.

از آن جمله می‌توان به:

۱- هندسه (که خود دارای جزییات بسیاری است).

۲- نوع بارگذاری

۳- فوم (وجود یا عدم وجود آن)

۴- جنس پوسته و جنس فوم

۵- نوع پوسته

۶- ارتفاع

۷- ضخامت

و... اشاره نمود.

در سال ۱۹۶۵، برای اولین بار، ادینز به بررسی کاربرد این سازه‌ها در هواپیماها و... برای جذب انرژی پرداخت [۲۳].

¹ . Initial peak load

² . Fillet

در سال‌های اخیر کاربرد شروع‌کننده‌ها افزایش یافته است. در سال ۱۹۸۶، مامالیس و همکارانش به بررسی پوسته‌های دارای شیار^۱ و تأثیر آن بر روی پوسته‌ها برای اولین بار پرداختند. آنها همچنین پس از این آزمایش جنس پوسته‌ها را تغییر دادند و از PVC نیز تحت بار محوری استفاده و میزان جذب انرژی و نمودار نیرو - جابه‌جایی آن را رسم نمودند. آن‌ها بیان نمودند که شروع‌کننده‌ها به میزان زیاد جذب انرژی را افزایش می‌دهند [۲۹-۳۱].

همچنین آن‌ها نشان دادند که با استفاده از شروع‌کننده‌ها می‌توان مکان و نوع تغییرشکل پلاستیک را کنترل نمود. در سال ۱۹۷۳، فیشر و همکارانش به بررسی کماتش دینامیکی یک پوسته‌ی تقویت شده با رینگ^۲ پرداختند [۳۲]. تحقیق فیشر در سال بعد در ۱۹۸۲ توسط جونز و همکارانش و در سال ۱۹۸۳ توسط اسمیتز و همکارانش ادامه پیدا نمود [۳۳ و ۳۴].

آن‌ها تأثیر رینگ به دور پوسته، فاکتور فاصله‌ی رینگ‌ها و... را آزمایش و نتایج خود را بیان نمودند. نتایج حاکی از اثر خوب رینگ‌ها به عنوان شروع‌کننده‌ها و تأثیر فاصله‌ی شروع‌کننده‌ها مانند ضخامت در میزان جذب انرژی بود. آن‌ها برای فاصله‌ی رینگ‌ها فرمولی را بیان و تأثیر رینگ‌ها به دور پوسته‌ها در جذب انرژی را اثبات نمودند. در سال ۱۹۹۰، بیرچ اینکار را ادامه و نوع رینگ‌ها را تغییر و میزان استهلاک انرژی را بررسی نمود [۳۵]. همچنین در سال ۲۰۰۷، ژانگ با تغییر سطح مقطع پوسته‌ها به بررسی رینگ‌ها و سطح مقطع و تأثیر این عوامل برهم پرداخت [۳۶].

دسته‌ی دیگری که تحقیقات زیادی روی آن‌ها صورت گرفته است، کامپوزیت‌ها^۳ هستند. در سال ۱۹۹۱، وانگ و همکاران، به بررسی برخورد بر روی ساختار ساده‌ی یک کامپوزیت پرداختند [۳۷]. در سال ۲۰۰۰، سانگ و همکاران، به بررسی جذب انرژی و تأثیر جنس کامپوزیت در جذب انرژی پرداختند [۳۸]. بررسی بر روی الیاف کامپوزیت و محل قرارگیری الیاف صورت پذیرفت. در سال ۲۰۰۲، مهدی و حامود به بررسی دو نوع کامپوزیت از جنس فیبر شیشه^۴ و فیبر کربن^۵ و تفاوت آن‌ها و تأثیرشان بر میزان جذب انرژی و حداکثر نیروی اولیه پرداختند [۴۰]. در سال ۲۰۰۳، الکوس و همکاران، به بررسی سطح مقطع دایروی کامپوزیتی پرداختند [۴۱]. آن‌ها نشان دادند که سازه‌های کامپوزیتی می‌توانند میزان حداکثر نیروی اولیه را کاهش دهند. پس از ادامه این روند در سال ۲۰۰۵، بابیج و همکاران، تأثیر فوم بر روی میزان بالای جذب انرژی و کاهش حداکثر نیروی اولیه در کامپوزیت‌ها را اثبات نمود [۴۲].

در سال ۲۰۰۷، گودن و هوآنگ و همکاران، تأثیر تقویت‌کننده‌ها را بصورت عددی و تجربی بررسی و از اثر بالای آن‌ها در کنترل و افزایش سطح زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی خبر دادند [۴۳]. در سال ۱۳۹۱، آقایان عامریان و عابدی، به بررسی پوسته‌های جدارنازک دایروی با سرپوش و بدون سرپوش پرداختند و نشان دادند که شوک اولیه‌ی وارده، در پوسته‌های دارای سرپوش از پوسته‌های

1. Groove

2. Ring

3. Composites

4. Glass Fiber

5. Carbon Fiber

بدون سرپوش کمتر است، همچنین آن‌ها اثبات نمودند، فوم پلی اورتان، تاثیر ناچیزی در افزایش جذب انرژی داشته و می‌توان از آن چشم‌پوشی نمود [۴۳]. آن‌ها نشان دادند که گردشگی بین محیط سرپوش و دیواره‌ی پوسته، در افزایش جذب انرژی موثر است. در سال ۱۳۹۱، عباس نیک‌نژاد، به بررسی سازه‌های لانه زنبوری باسلول‌های پرشده از فوم در جذب انرژی پرداخت و روابطی برای پیش-بینی نیروی لحظه‌ای چین‌خوردگی در لانه‌ی زنبوری‌های تک سلوله در دو حالت توخالی و پرشده از فوم بیان نمود. در سال ۲۰۱۳، گنگ یانگ و فنگ‌ژیان و همکاران، به بررسی تاثیر پارامتر تغییر ضخامت بر روی پوسته‌های استوانه‌ای پرداختند. آن‌ها با تغییر ضخامت در طول پوسته‌ی جدارنازک بامقطع مربعی، پوسته را تحت بارگذاری محوری قرار دادند و میزان جذب انرژی و حداکثر نیروی اولیه را بررسی نمودند. آن‌ها اثبات نمودند که تغییر ضخامت در طول پوسته می‌تواند میزان جذب انرژی وارده بر پوسته‌ی جدارنازک را افزایش دهد. در همان سال، آقایان المارکبی، ژین لانگ و مکین‌تایر، و همچنین آقایان علوی و پارساپور به بررسی اثر تغییر سطح مقطع در پوسته‌های جدارنازک پرداختند و میزان جذب انرژی و حداکثر نیروی اولیه را بررسی نمودند و بیان کردند که پوسته‌های جدارنازک دارای مقطع شش ضلعی از پوسته‌های جدارنازک دارای مقطع چهار ضلعی دارای جذب انرژی بیشتری می‌باشند همچنین پوسته‌های جدارنازک دارای مقطع هشت ضلعی دارای ظرفیت بیشتری برای جذب انرژی نسبت به پوسته‌های جدارنازک دارای مقطع شش ضلعی می‌باشند.

پس از سال‌ها تحقیق بر روی این سازه‌ها، تحقیقی بر روی مکان و اندازه‌ی آن‌ها و متقارن بودن آن‌ها یا متقارن نبودن و تاثیر آن‌ها بر روی جمع‌شدگی متقارن^۱ و نامتقارن^۲ آزمایشی صورت نگرفته است و آزمایش‌ها بیشتر بر روی اثبات اثر عوامل مختلف تمرکز داشته‌اند. همچنین تأثیر عوامل مختلف بر روی هم نیز فاکتور مهمی می‌باشد که به آن اشاره‌ای نشده است.

در این پایان‌نامه، از دستگاه آزمایش سروویدرولیک ۸۸۰۲، بنام اینسترون^۳، ساخت کشور انگلستان که دارای دقت بالا، توان اعمال نیرو تا ۲۵۰ kN و سنسورهای دقیق دارا می‌باشد، استفاده شده است. برای حل عددی نیز از نرم‌افزار تجاری آباکوس ۶/۱۱، بهره برده شده است. این نرم‌افزار امروزه در سطح وسیعی در دانشگاه‌ها، صنایع مختلف بخصوص خودروسازی، هواپیماسازی و نظامی و... مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این پایان‌نامه سعی بر آن شده است که به این پرسش‌ها بصورت مقتضی جواب داده شود. ابتدا در فصل روش تجربی، به بیان آزمایش‌های تجربی انجام شده توسط دستگاه اینسترون پرداخته شده است، سپس در فصل بعدی به بیان آزمایش‌های عددی که توسط نرم‌افزار آباکوس، برای تایید آزمایش‌های تجربی صورت گرفته است، پرداخته شده و نتایج عددی و تجربی با هم مقایسه و تاثیر شروع‌کننده‌ها بر روی پوسته‌های مخروطی بیان شده است. در فصل آخر نیز نتایج و پیشنهادات بیان شده است.

1. Axisymmetric

2. UnAxisymmetric

3. Instron

فصل دوم

روش تجربی

۲-۱- مقدمه‌ای بر آزمایش‌های انجام شده

در این فصل، نتایج تجربی بدست آمده از آزمایش‌های مختلفی که روی پوسته‌های مخروطی ناقص انجام شده مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های انجام شده بصورت ایجاد شروع‌کننده‌های مختلف بر روی پوسته‌ها و بررسی سرعت‌های متفاوت بارگذاری، تأثیر ارتفاع و ضخامت پوسته‌ها بر روی میزان جذب انرژی، صورت پذیرفته است. لذا در هر بخش بسته به شرایط مختلف اعمال شده بر روی نمونه‌ها، به بررسی نتایج آن‌ها پرداخته شده است.

۲-۲- دستگاه آزمایش

همه‌ی آزمایش‌های انجام شده در این پایان‌نامه با استفاده از دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون^۱ ۸۸۰۲، انجام شده است، شکل (۲-۱).



شکل (۲-۱): دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ در حال انجام آزمایش کشش استاندارد

این دستگاه بصورت دینامیکی توانایی اعمال بار تا مقدار ۲۵۰ kN را دارد. البته برای انجام آزمایش‌های کشش استاندارد، بدست آوردن خواص مکانیکی پوسته‌ها از نیروسنج^۲ با ظرفیت تحمل بار ۲۵ kN استفاده شده است. همچنین برای بدست آوردن جابه‌جایی با دقت بالاتر در آزمایش‌های کشش استاندارد از یک طول‌سنج^۳ نیز استفاده شده است. شکل (۲-۲)

1. Instron
2. Load cell
3. Extensometer



شکل (۲-۲): نمای دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ با نیروسنج ۲۵ کیلونیوتنی

۳-۲ آزمایش کشش استاندارد

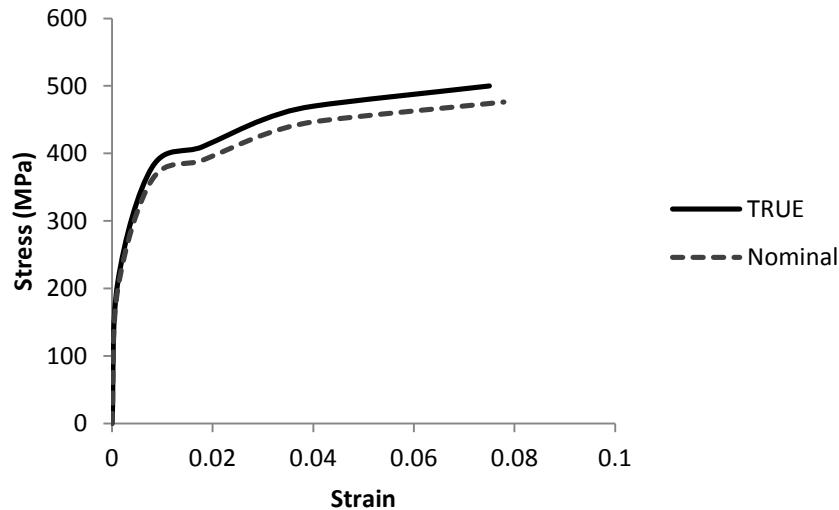
در آزمایش‌های عددی تا حد امکان باید شرایط گوناگون اعمال شده برای تحلیل نمونه از جمله دما، شرایط مرزی، نوع بارگذاری و... با واقعیت هماهنگی داشته باشد. یکی از عوامل مهم در روند تحقیق، خواص مکانیکی ماده‌ی مورد نظر است. اما به علت وجود ایراداتی در روند ساخت و همچنین عوامل محیطی و ویژگی‌های کیفی و کمی، تقریباً می‌توان گفت هر قطعه دارای خواص و ویژگی‌های منحصر بفرد است و نمی‌توان به صرف نام آن، به دنبال خواص آن در جداول باشیم. بر همین اساس، ماده‌ی مورد آزمایش، تحت آزمایش کشش استاندارد^۱ قرار می‌گیرد. روند انجام این آزمایش بدین ترتیب است که طبق اندازه‌های استاندارد ASTM E8، ابتدا قطعه‌ی آزمایش کشش از پوسته بریده شده، سپس صاف می‌گردد (باید دقت شود که تا حد امکان تنش ناخواسته در نمونه، ایجاد نگردد). در نهایت اندازه‌های داده شده از پوسته، طبق استاندارد مربوطه مطابق زیر بدست می‌آید. شکل (۲-۳-الف) و شکل (۲-۳-ب)، دو قطعه‌ی آزمایش شده برای آزمایش کشش استاندارد را نشان می‌دهند.



شکل (۲-۳): الف- نمونه‌ی اول برای آزمایش کشش استاندارد. ب- نمونه‌ی دوم برای آزمایش کشش استاندارد

^۱ . Standard Tensile Test

خواص مکانیکی پوسته‌ای استوانه‌ای مورد آزمایش بر طبق استاندارد ASTM E8 ، بدست آمده است. فولاد مورد آزمایش SS304 با مدول یانگ ۱۸۰ GPa می‌باشد که بصورت تجربی بدست آمده است. ضریب پواسون نیز ۰/۳ در نظر گرفته شده است. شکل (۴-۲)

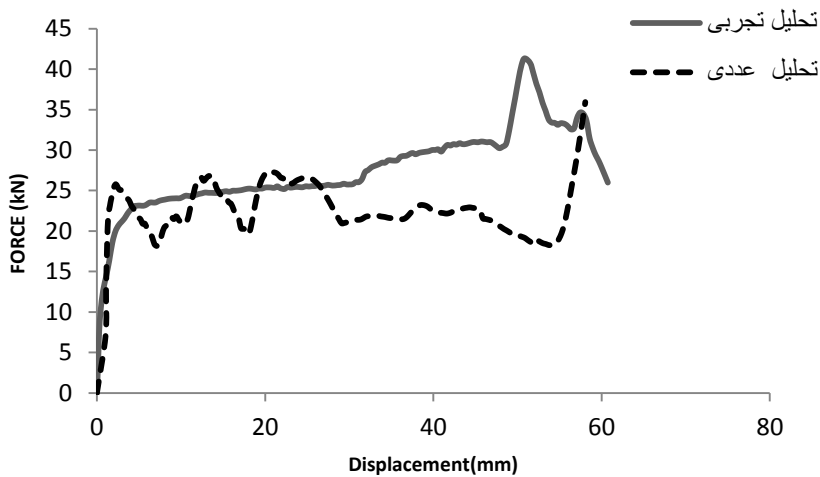


شکل (۴-۲): نمودار تنش- کرنش واقعی و مهندسی برای فولاد SS304

۴-۲- بارگذاری جابجایی-کنترل

برای بدست آوردن رفتار قطعه در شرایط مختلف در برابر تغییر شکل و تنش‌های اعمالی از روش جابه‌جایی کنترل استفاده می‌کنیم. مزیت این روش، کنترل بر روی تغییر شکل قطعه می‌باشد. البته لازم به ذکر است که برای حالت‌های مختلف شرایط تغییر می‌کند. اما بطور کلی سرعت دستگاه در حدود ۵ میلی‌متر بر ثانیه، تنظیم شده است. جابه‌جایی دستگاه نیز برابر $\frac{2}{3}$ کل ارتفاع پوسته در نظر گرفته شده است. بارگذاری با سرعت ثابت، ۵ میلی‌متر بر ثانیه و تحلیل بصورت استاتیک^۱ می‌باشد. در شکل (۵-۲)، یک نمونه نمودار نیرو- جابه‌جایی ناشی از اعمال نیرو به روی یک پوسته‌ی مخروطی به ارتفاع ۷۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

^۱. Static



شکل (۲-۵): نمودار نیرو- جابه‌جایی پوسته‌ی مخروطی به ارتفاع ۷۰ میلی‌متر بصورت عددی و تجربی

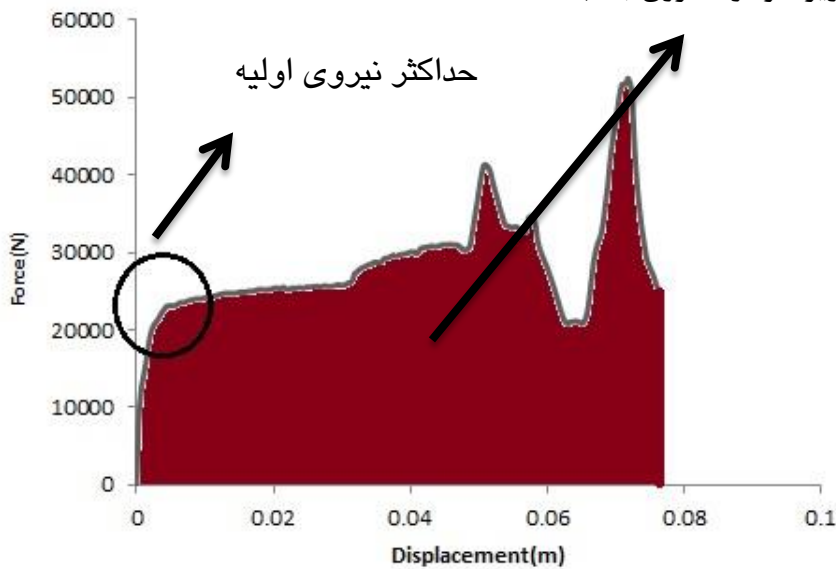
۲-۵ روش تجربی

در بررسی جذب انرژی دو نکته مهم و از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده و می‌توانند معیار مناسبی برای مقایسه‌ی میزان جذب انرژی و کاهش حداکثر نیروی اولیه باشد. این نکات عبارتند از:

۱- نقطه‌ی اوج اولیه نمودار نیرو - جابه‌جایی

۲- مساحت زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی

که در مساحت زیر نمودار = انرژی جذب شده



شکل (۲-۶): شکل شماتیک انرژی جذب شده نیرو- جابه‌جایی

مطابق شکل (۲-۶)، از این فاکتورهای مهم برای بررسی آزمایش‌ها در ادامه استفاده شده است.

۲-۵-۱- اثر تقارن گشودگی^۱ با قطر ۱۵ میلی‌متر بر روی پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر

طبق شکل (۷-۲ - الف) و شکل (۷-۲ - ب)، دو پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر را در نظر گرفته و بر روی قطعه‌ی اول، دو گشودگی، بصورت متقارن و با قطر ۱۵ میلی‌متر و بر روی قطعه‌ی دوم، در یک طرف (بصورت نامتقارن) یک گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر ایجاد شده است. سرعت دستگاه نیز با فرکانس ۰/۰۵ هرتز و مقدار جابه‌جایی $\frac{2}{3}$ ارتفاع پوسته در نظر گرفته شده است.



شکل (۷-۲): الف- پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و نامتقارن ب- پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و متقارن

تغییر شکل در شکل (۸-۲) و (۹-۲) نشان داده شده است. نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ها در شکل‌ها نشان می‌دهد که پوسته‌ی دارای دو گشودگی دارای تغییر شکل منظم‌تری می‌باشد و دیرتر تسلیم می‌گردد و جذب انرژی بهتری نیز خواهد داشت.



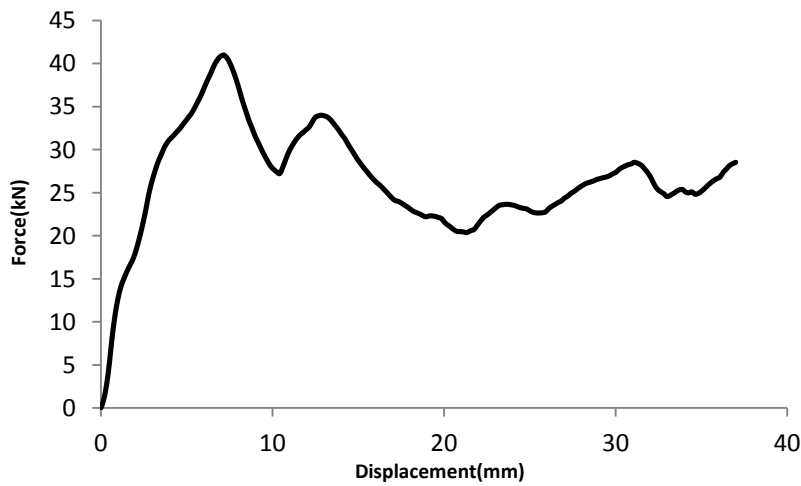
شکل (۸-۲): تغییر شکل پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و دارای ۲ گشودگی متقارن

^۱. Cut out

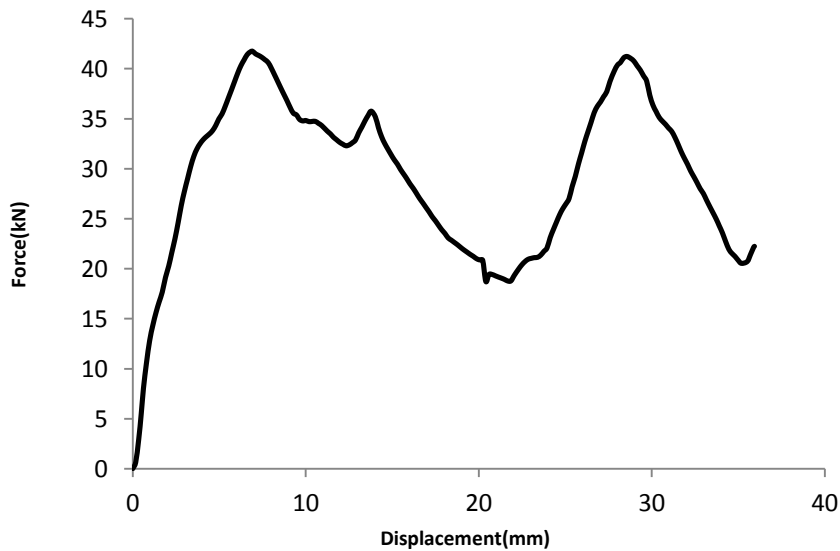


شکل (۹-۲): تغییر شکل پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و دارای ۱ گشودگی بصورت نامتقارن

نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته‌ی دارای ۲ گشودگی بصورت متقارن در شکل (۱۰-۲) و پوسته‌ی با ۱ گشودگی بصورت نامتقارن در شکل (۱۱-۲)، آمده است.



شکل (۱۰-۲): نمودار نیرو - جابه‌جایی تغییر شکل پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و دارای ۲ گشودگی بصورت متقارن



شکل (۱۱-۲): نمودار نیرو - جابه‌جایی تغییر شکل پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و دارای ۱ گشودگی بصورت نامتقارن

در نمودارهای بالا مشخص است، هردو پوسته دارای توان برابری در جذب انرژی و تحمل بارگذاری را دارند، از نظر حداکثر نیروی اولیه، نیز تقریباً یکسان هستند، اما در ادامه پوسته‌ی متقارن دارای نوسان کمتری بوده و سطح زیر نمودار آن نیز نسبت به پوسته‌ی نامتقارن بیشتر می‌باشد. هر چه نوسان نمودار کمتر باشد، نیروی وارده به سرنشین کمتر خواهد بود.

۲-۵-۲- اثر تقارن گشودگی با قطر ۱۵ میلی‌متر بر روی پوسته با ارتفاع

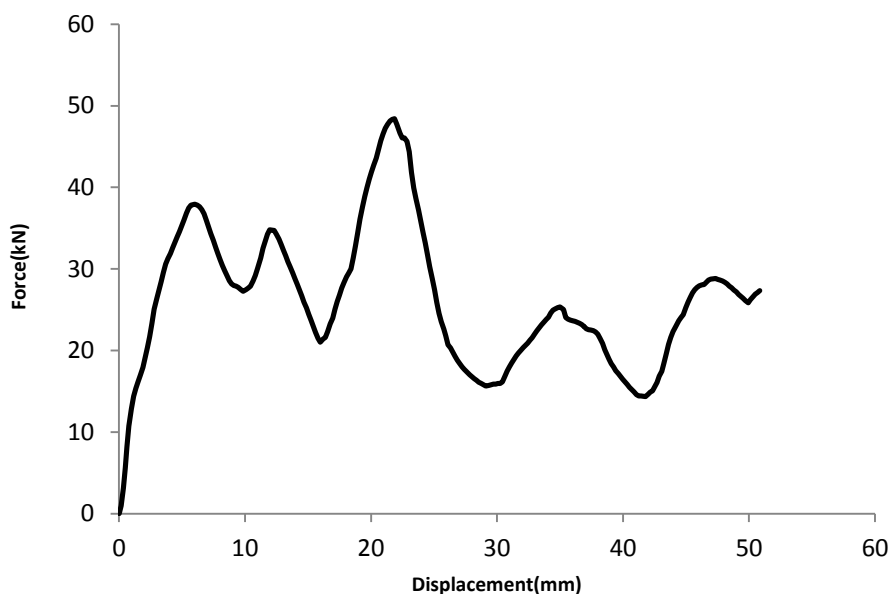
۱۰۰ میلی‌متر

برای بررسی تأثیر همزمان ارتفاع و گشودگی، بر روی دو پوسته‌ی ۱۰۰ میلی‌متری، بر روی اولین پوسته، دو گشودگی متقارن با قطر ۱۵ میلی‌متر و دومین پوسته، بصورت نامتقارن با قطر ۱۵ میلی‌متر، یک گشودگی ایجاد شده است. پوسته‌های مذکور به ترتیب مطابق شکل (۳-۱۲-الف) و شکل (۳-۱۲-ب) می‌باشند.

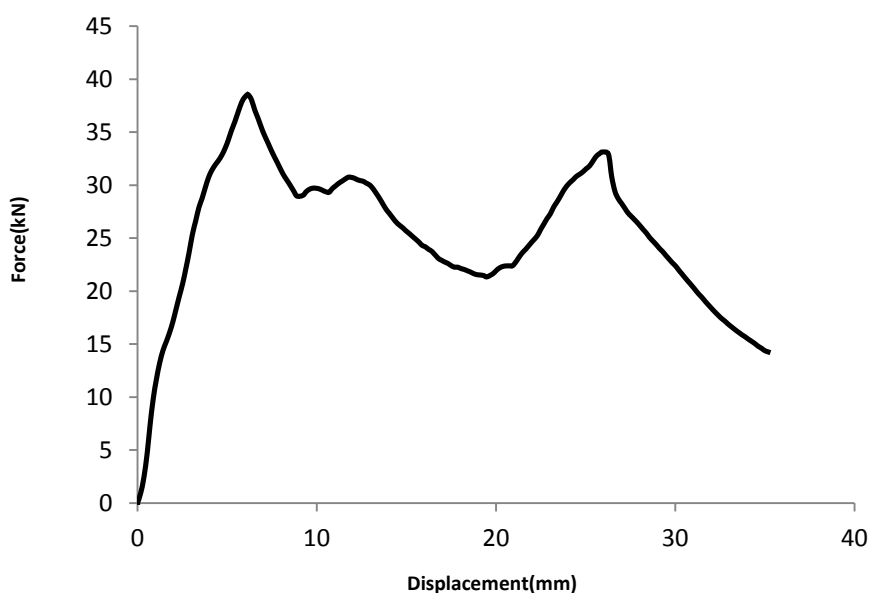


شکل (۲-۱۲): الف- پوسته‌ی ۱۰۰ میلی‌متری با ۱ گشودگی ۱۵ میلی‌متری بصورت نامتقارن ب- پوسته‌ی ۱۰۰ میلی‌متری بصورت نامتقارن ب- پوسته‌ی ۱۰۰ میلی‌متری بصورت متقارن.

نمودار نیرو - جابه‌جایی برای پوسته‌های ۱۰۰ میلی‌متری بصورت متقارن در شکل (۲-۱۳) و بصورت نامتقارن در شکل (۲-۱۴) آمده است.

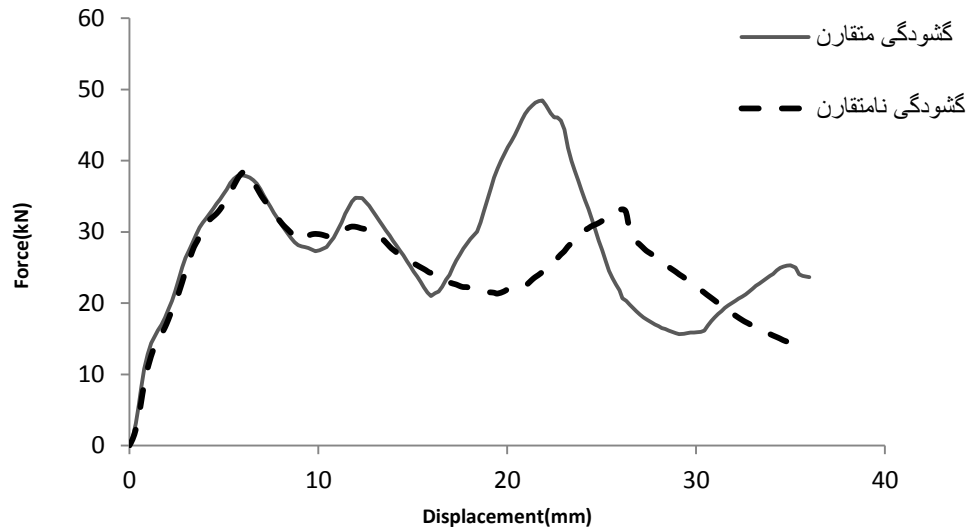


شکل (۲-۱۳): نمودار نیرو-جابجایی برای پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر دارای ۲٪ گشودگی بصورت متقارن



شکل (۲-۱۴): نمودار نیرو-جابجایی برای پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر دارای ۱٪ گشودگی بصورت نامتقارن

مطابق شکل (۲-۱۵) و جدول (۲-۱)، کاملاً اثر عدم تقارن محل گشودگی‌ها مشخص است. مطابق نمودار، مساحت زیر نمودار پوسته‌ی متقارن با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر بیشتر است از مساحت زیر نمودار پوسته‌ی نامتقارن، در نتیجه میزان جذب انرژی در پوسته‌ی متقارن بیشتر است. هر دو نمودار تا جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر، تقریباً دارای رفتار یکسان و دارای حداکثر نیروی اولیه‌ی یکسان هستند. سطح زیر نمودار هر دو پوسته نیز تقریباً یکسان می‌باشد که با در نظر گرفتن نوسانات نمودارها، پوسته‌ی متقارن بازدهی بهتری در جذب انرژی دارد.



شکل (۲-۱۵): ترسیم نمودار پوسته‌ی مخروطی متقارن و نامتقارن با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر
 جدول (۲-۱): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروط ناقص ۱۰۰ میلی‌متری دارای دو و یک
 گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر

نوع گشودگی روی پوسته	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
مقارن	۱۳۳۲	۴۰
نامتقارن	۸۸۸/۵	۴۰

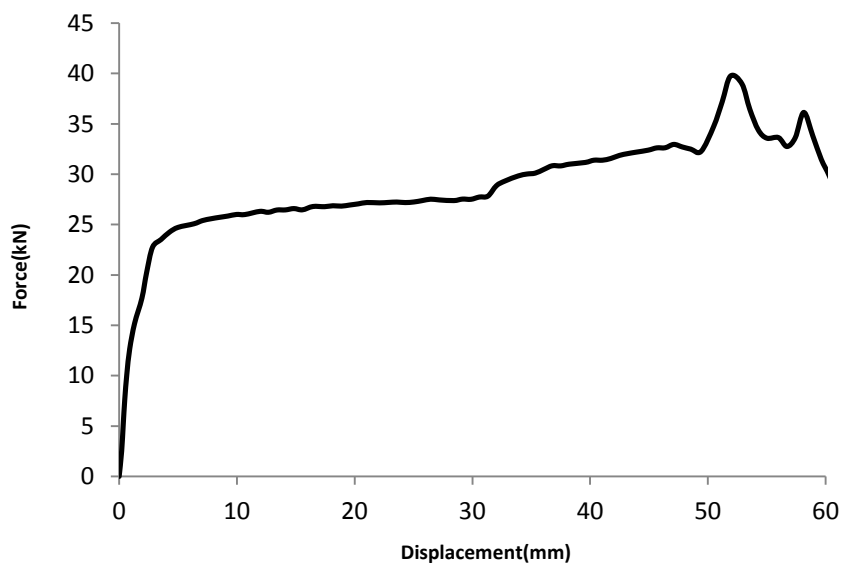
۲-۵-۳- اثر ارتفاع، بر کماتش، بدون ایجاد شروع کننده بر روی پوسته

در اینجا به بررسی پوسته‌های مخروطی بدون در نظر گرفتن شروع کننده پرداخته شده است. ارتفاع هر پوسته‌ی مخروطی ۷۰ و ۱۰۰ میلی‌متر که مطابق شکل (۲-۱۶-الف) و (۲-۱۶-ب)، قابل مشاهده هستند، در نظر گرفته شده است. شرایط بارگذاری و مرزی مطابق با پوسته‌های قبلی و با فرکانس ۰/۰۵، می‌باشند.

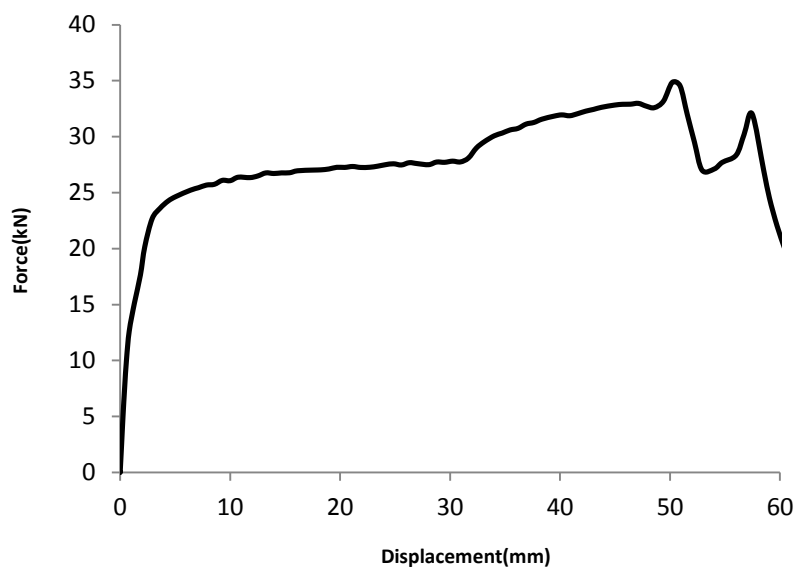


شکل (۲-۱۶): الف- پوسته‌ی مخروطی با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر ب- پوسته‌ی مخروطی ۱۰۰ میلی‌متر

هر پوسته‌ای که تغییر شکل متقارن تری داشته باشد می‌تواند جاذب بهتری برای ضربه باشد [۴۴ و ۴۵]. شکل (۲-۱۷)، نشان‌دهنده‌ی رفتار بار- جابه‌جایی پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و شکل (۲-۱۸)، نشان‌دهنده‌ی رفتار بار- جابه‌جایی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر است. همچنین در جدول (۲-۲)، میزان جذب انرژی و حداکثر نیروی اولیه بیان شده است.



شکل (۲-۱۷): نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری و بصورت شبه استاتیکی

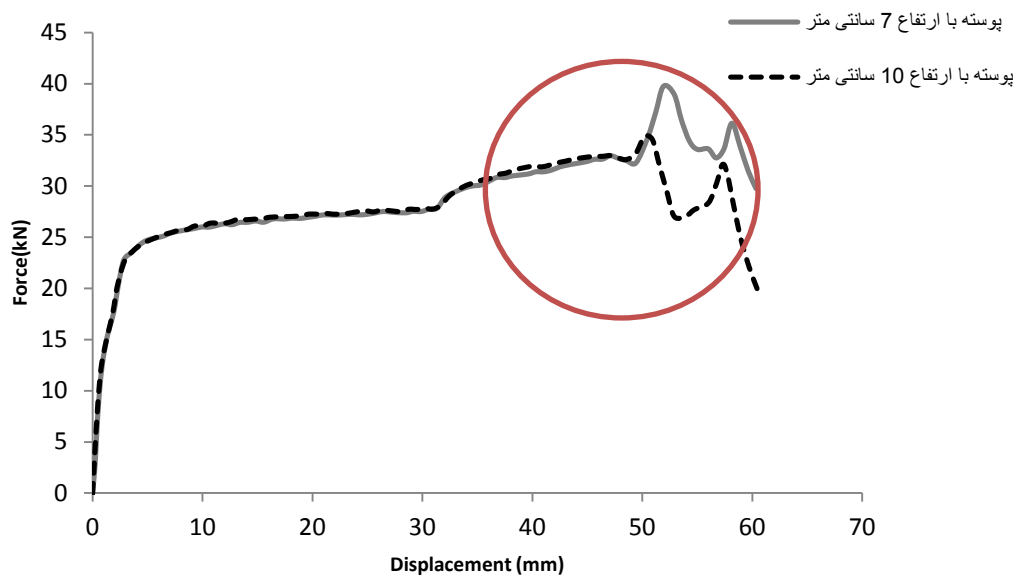


شکل (۲-۱۸): نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری و بصورت شبه استاتیکی

جدول (۲-۲): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروط ناقص ۷۰ و ۱۰۰ میلی‌متری

ارتفاع پوسته‌ی مخروطی	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
۷۰ میلی‌متر	۱۰۸۸	۲۵
۱۰۰ میلی‌متر	۱۰۶۰	۲۵

در شکل (۲-۱۹)، نمودار نیرو - جابه‌جایی هر دو حالت با هم رسم شده‌اند تا مقایسه بهتری بتوان انجام داد.



شکل (۲-۱۹): ترسیم رفتار نیرو- جابه‌جایی پوسته‌ی با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و ۱۰۰ میلی‌متر همزمان در یک نمودار

مطابق شکل (۲-۱۹) و جدول (۲-۲)، هر دو نمودار دارای حداکثر نیروی اولیه‌ی کم و یکسانی هستند و همچنین هر دو نمودار دارای تغییر شیب کمی می‌باشند و بخوبی نیروی وارده‌ی اولیه را جذب و مستهلک می‌کنند. پوسته‌ی مخروطی با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر توان بهتری در تحمل بار وارده و جذب آن برای جلوگیری از صدمه‌ی بیشتر را دارا می‌باشد. می‌توان از تفاوت آن‌ها صرف نظر نمود. هر دو پوسته، دارای حداکثر نیروی اولیه‌ی پایین، حدود ۲۵ کیلو نیوتن و انرژی جذب شده نیرو- جابه‌جایی خوبی هستند که قابلیت آن‌ها در جذب بالای انرژی وارده به پوسته را نشان می‌دهند. پوسته‌ی مخروطی ۷۰ میلی‌متری، از جابه‌جایی ۰/۰۵ به بعد دارای نواساناتی نسبت به پوسته‌ی مخروطی ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد که به علت اختلاف کم قابل صرف نظر کردن است. در شکل (۲-۲۰)، ۶ حالت آزمایش شده از نمونه‌ها نشان داده شده است.



شکل (۲-۲۰): قطعه‌ها با ارتفاع ۷۰ و ۱۰۰ میلی‌متر، دارای گشودگی متقارن و نامتقارن در وسط و بدون گشودگی

۲-۵-۴- تأثیر محل قرارگیری گشودگی‌ها^۱

۲-۵-۴-۱- بررسی محل قرارگیری گشودگی‌ها با قطر ۲۰ میلی‌متر بصورت

مقارن

برای بررسی تأثیر مکان گشودگی‌ها بر روی پوسته‌ها در جذب انرژی، سه مکان به ارتفاع‌های ۰/۳L، ۰/۵L و ۰/۷۵L از ته مخروط در نظر گرفته شده است.^۲ برای اعمال شرایط شبه استاتیکی از سرعت حدود ۳۵ میلی‌متر بر ثانیه با جابه‌جایی $\frac{2}{3}$ طول پوسته استفاده شده است. مطابق زیر در شکل (۲-۲۱)، نحوه‌ی جمع‌شدگی ۴ قطعه آزمایش شده با گشودگی در ارتفاع ۰/۳L، ۰/۵L و ۰/۷۵L بصورت مقارن و نامقارن بصورت تجربی از نمای بالا و روبه‌رو و شکل (۲-۲۲)، نحوه‌ی جمع‌شدگی قطعه‌ی داری گشودگی در ۰/۳ L به قطر ۲۰ میلی‌متر از نمای بالا قابل مشاهده است. این تغییر شکل‌های پلاستیک باعث جذب انرژی وارده شده‌اند.



شکل (۲-۲۱): نحوه‌ی جمع‌شدگی ۴ قطعه آزمایش شده بصورت تجربی از نمای بالا و روبه‌رو

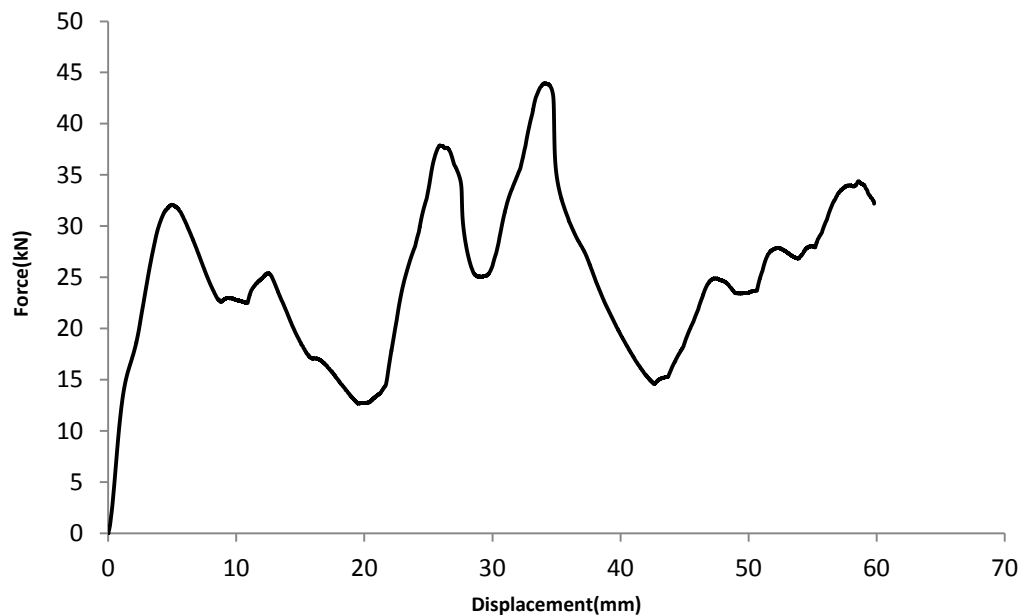
^۱. Notches

^۲. L طول کل پوسته مورد آزمایش است. L از پایین پوسته در نظر گرفته می‌شود.

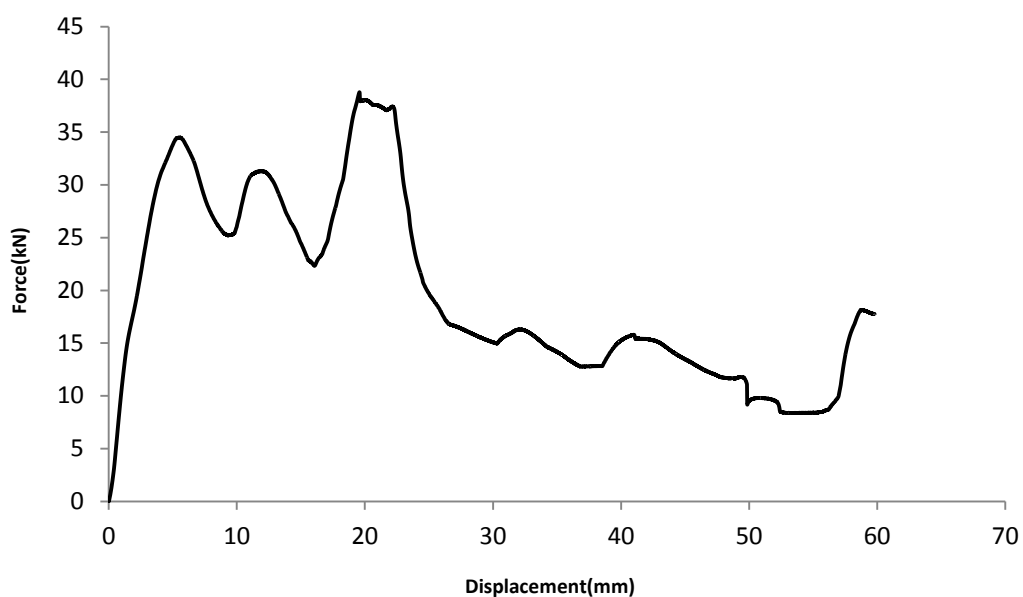


شکل (۲-۲۲): نحوه‌ی جمع‌شدگی قطعه‌ی داری گشودگی در $L/3$ به قطر ۲۰ میلی‌متر از نمای بالا

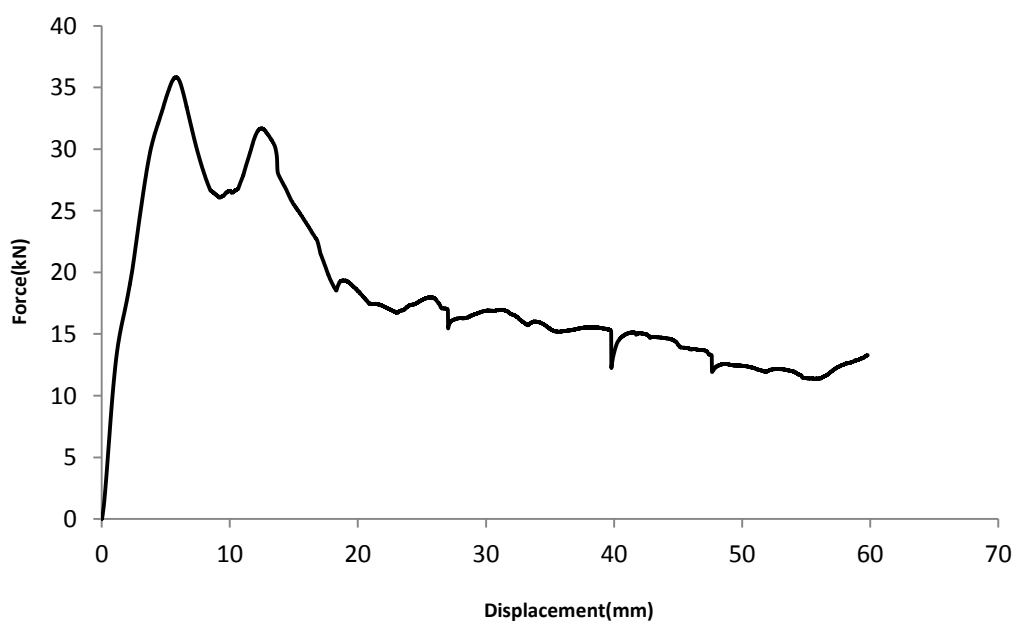
در شکل‌های (۲-۲۳)، (۲-۲۴) و (۲-۲۵)، نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته‌های مخروطی با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر را که به ترتیب دارای گشودگی‌های متقارن در دو طرف پوسته، در ارتفاع‌های $L/3$ ، $L/5$ ، $L/7$ را نشان می‌دهند.



شکل (۲-۲۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی در موقعیت $L/3$ تحت بارگذاری محوری



شکل (۲۴-۲): نمودار نیرو - جابه‌حایی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی به موقعیت $0.5L$ تحت بارگذاری محوری



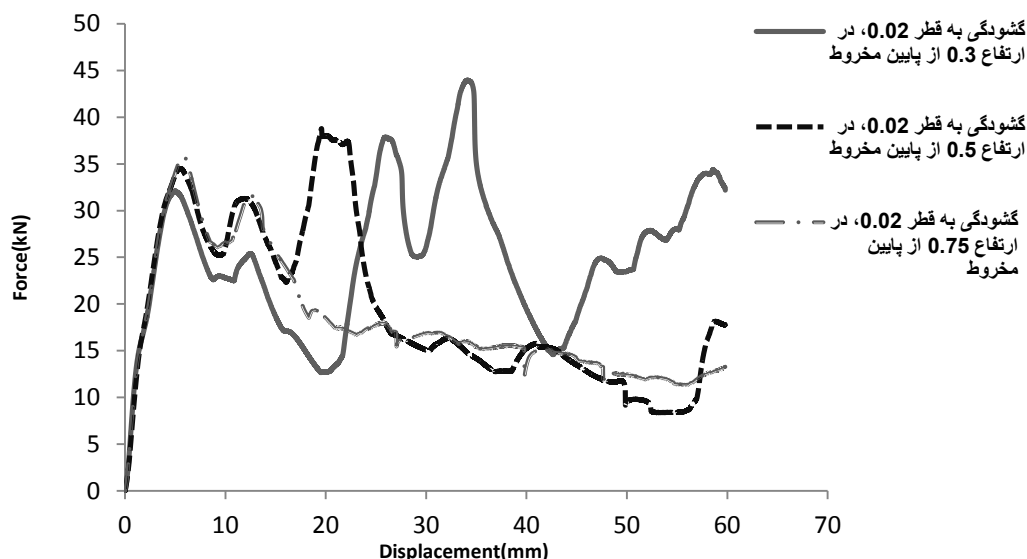
شکل (۲۵-۲): نمودار نیرو - جابه‌حایی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی به موقعیت $0.75L$ تحت بارگذاری محوری

مطابق شکل (۲۶-۲)، که نمودارهای بالا با هم رسم شده‌اند و جدول (۳-۲)، نشان می‌دهند که پوسته‌ی مخروطی با گشودگی به ارتفاع $0.3L$ دارای قابلیت جذب انرژی بهتر نسبت به بقیه می‌باشد. بعد از آن، پوسته‌ی مخروطی با گشودگی به ارتفاع $0.5L$ دارای قابلیت جذب انرژی خوبی است.

همچنین پوسته‌ی مخروطی به ارتفاع $0.75L$ دارای جذب انرژی پایین و حداکثر نیروی اولیه‌ی بالا می‌باشد.

جدول (۲-۳): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته با ارتفاع 100 میلی‌متر و گشودگی به موقعیت $0.3L$ ، $0.5L$ و $0.75L$

پوسته با ارتفاع 10 سانتی‌متر و گشودگی در ...	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
$0.3L$	$1491/3$	32
$0.5L$	$1166/3$	34
$0.75L$	1009	36



شکل (۲-۲۶): نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته‌هایی با ارتفاع 100 میلی‌متر و گشودگی به ارتفاع $0.75L$ و $0.5L$ و $0.3L$ ، تحت بارگذاری محوری و بصورت شبه استاتیکی

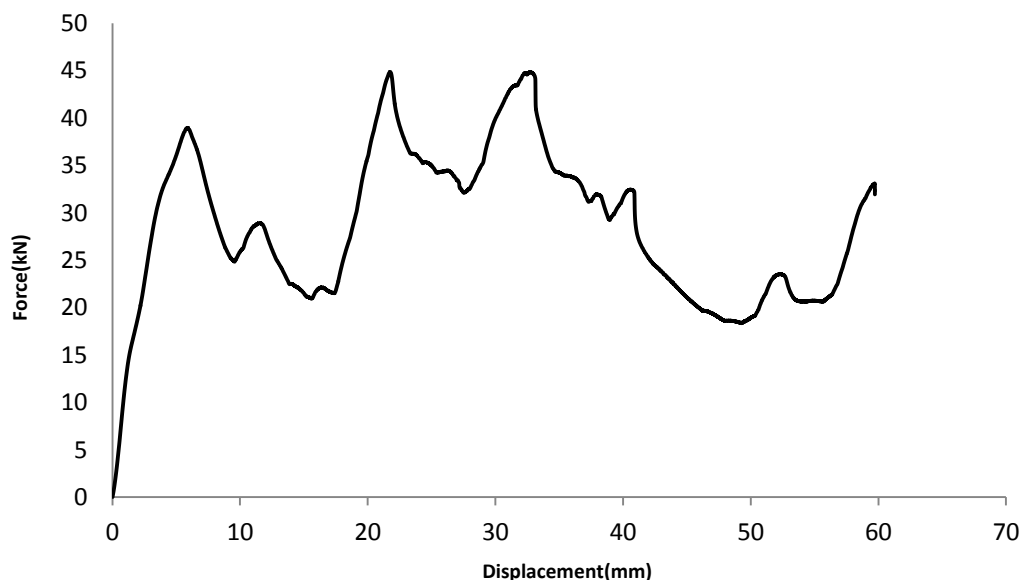
۲-۴-۵-۲- بررسی محل قرارگیری گشودگی‌ها با قطر 10 میلی‌متر و اثر آن بر روی جذب انرژی

برای بررسی بیشتر، قطر گشودگی‌ها را 10 میلی‌متر فرض نموده و در طول $0.3L$ مورد ارزیابی قرار می‌دهیم. شکل (۲-۲۷)، جمع‌شدگی پوسته‌ی مذکور را نشان می‌دهد.



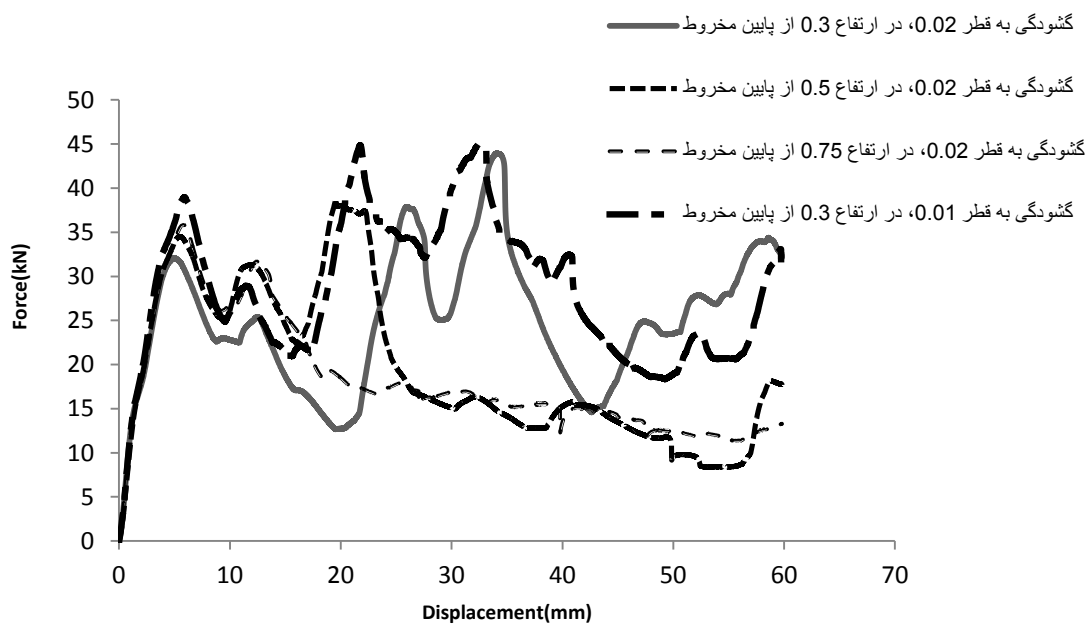
شکل (۲-۲۷): جمع‌شدگی متقارن پوسته‌ی مخروطی با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی در طول ۰/۳L تحت بارگذاری محوری

در شکل (۲-۲۷)، مشخص است که پوسته‌ی مخروطی تحت بارگذاری محوری، دارای جمع‌شدگی متقارنی می‌باشد که نشان می‌دهد برای جذب انرژی مناسب بوده و تا ۹۰ درصد ارتفاع پوسته، کاملاً جمع‌شدگی متقارن می‌باشد. نمودار نیرو-جابجایی پوسته با قطر ۱۰ میلی‌متر در شکل (۲-۲۸)، آمده است.



شکل (۲-۲۸): نمودار نیرو-جابجایی پوسته با قطر ۱۰ میلی‌متر و گشودگی در طول ۰/۳L، تحت بارگذاری محوری و شبه استاتیکی بصورت تجربی

در شکل (۲-۲۹)، هر ۴ حالت قرارگیری گشودگی‌ها در قطرهای ۲۰ و ۱۰ میلی‌متر با هم نشان داده شده‌اند. همچنین در جدول (۲-۴)، انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه‌ی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی به قطر ۲۰ میلی‌متر و موقعیت $L/3$ ، $L/5$ و $L/75$ و پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی به قطر ۱۰ میلی‌متر و موقعیت $L/3$ بیان شده است.



شکل (۲-۲۹): نمودار نیرو-جاب‌جایی، ۴ حالت قرارگیری گشودگی‌ها با هم در یک نمودار تحت بارگذاری محوری و بصورت تجربی

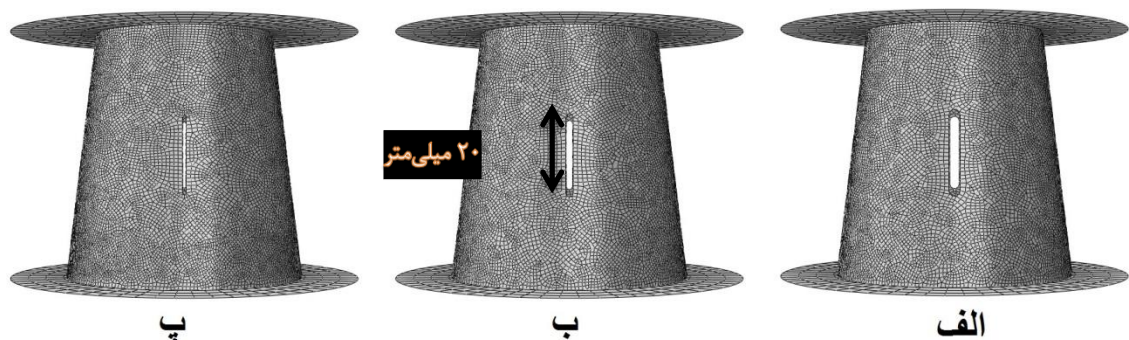
جدول (۲-۴): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه‌ی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی به قطر ۲۰ میلی‌متر و موقعیت $L/3$ ، $L/5$ و $L/75$ و پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر و گشودگی به قطر ۱۰ میلی‌متر و موقعیت $L/3$

پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر دارای	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
گشودگی به ارتفاع $L/3$ وقطر ۲۰ میلی‌متر	۱۴۹۱/۳	۳۲
گشودگی به ارتفاع $L/5$ وقطر ۲۰ میلی‌متر	۱۱۶۶/۳	۳۴
گشودگی به ارتفاع $L/75$ وقطر ۲۰ میلی‌متر	۱۰۰۹	۳۶
گشودگی به ارتفاع $L/3$ وقطر ۱۰ میلی‌متر	۱۷۰۴/۶۵	۴۰

از شکل (۲-۲۹) و جدول (۲-۴)، مشخص است که پوسته‌ی مخروطی با گشودگی ۱۰ میلی‌متر دارای مساحت زیر نمودار نیرو- جابه‌جایی بیشتری است. از نظر محل قرارگیری گشودگی‌ها بر روی پوسته‌ها نیز، گشودگی در فاصله‌ی $0.5L$ دارای بازدهی بالاتری است. می‌توان بیان نمود که هر چهار حالت تا جابه‌جایی ۱۰ میلی‌متر، دارای رفتار تقریباً یکسانی هستند و بیشترین اختلاف در جابه‌جایی ۱۵ میلی‌متر به بعد اتفاق می‌افتد. نمودار نشان می‌دهد که در جذب نیروی اولیه و حداکثر نیروی اولیه چهار نمونه دارای توانایی جذب تقریباً برابری هستند و می‌توانند نیروی اولیه که معیار مهمی محسوب می‌شود را جذب نمایند.

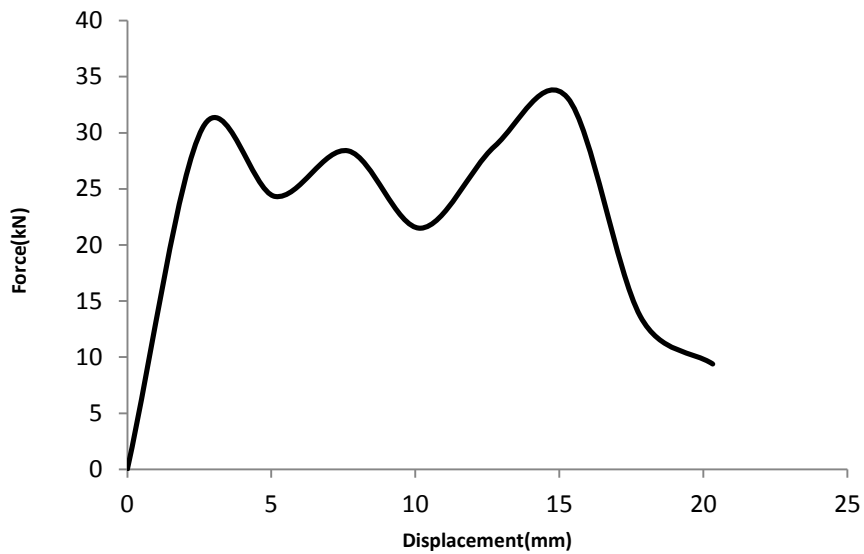
۳-۵-۵- اثر ایجاد شیار بر جذب انرژی پوسته‌های مخروطی

در اینجا به بررسی اندازه‌ی عرض شیار در میزان جذب انرژی پرداخته شده است. بر همین اساس، سه پوسته‌ی مخروطی با عرض شیارهای ۱ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر، را در نظر گرفته و بصورت تجربی آزمایش می‌کنیم. در شکل (۲-۳۰)، هندسه‌ی پوسته‌های دارای شیار نشان داده شده است.

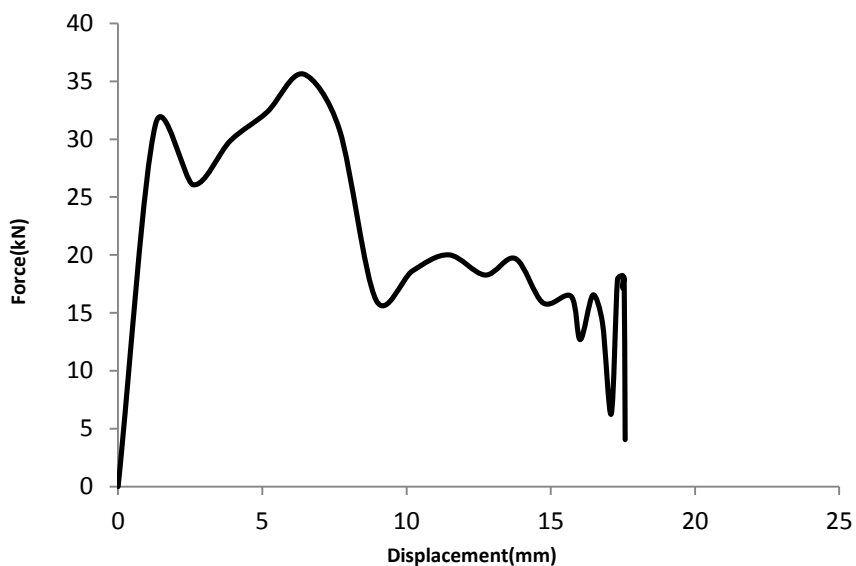


شکل (۲-۳۰-الف): پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۳ میلی‌متر در وسط. شکل (۲-۳۰-ب): پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۲ میلی‌متر در وسط. شکل (۲-۳۰-پ): پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط.

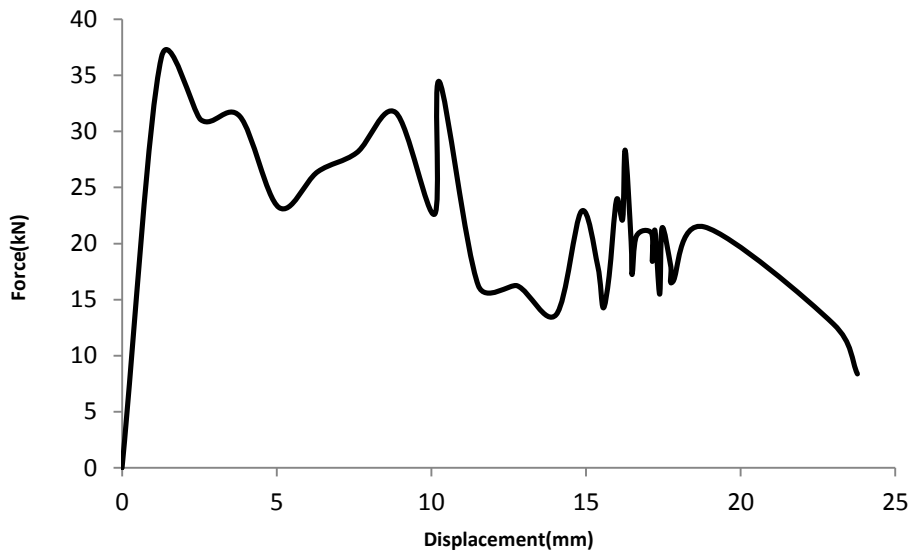
در شکل‌های (۲-۳۱)، (۲-۳۲) و (۲-۳۳)، نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته‌های مخروطی با زاویه‌ی صفر درجه و به ترتیب دارای شیار به عرض ۱ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر، در وسط بصورت متقارن پس از انجام آزمایش نشان داده شده است.



شکل (۳۱-۲): نمودار نیرو-جابجایی پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط با زاویه‌ی صفر درجه، تحت بارگذاری محوری



شکل (۳۲-۲): نمودار نیرو-جابجایی پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۲ میلی‌متر در وسط با زاویه‌ی صفر درجه، تحت بارگذاری محوری



شکل (۲-۳۳): نمودار نیرو-جابجایی پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۳ میلی‌متر در وسط با زاویه‌ی صفر درجه، تحت بارگذاری محوری

در شکل (۲-۳۱)، شکل (۲-۳۲) و شکل (۲-۳۳) و جدول (۲-۵)، مشخص است که پوسته‌ی مخروطی با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط با زاویه‌ی صفر درجه، دارای حداکثر نیروی اولیه‌ی کمتری بوده و در جذب انرژی، نیز نسبت به پوسته‌ی مخروطی با شیار به عرض ۲ و ۳ میلی‌متر در وسط با زاویه‌ی صفر درجه دارای جذب انرژی بیشتری می‌باشد، همچنین، پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۳ میلی‌متر در وسط با زاویه‌ی صفر درجه، دارای نوسانات شدید و پی‌درپی بوده و دارای میزان جذب انرژی پایینی می‌باشد که نشان می‌دهد ایجاد شیار بیش از عرض ۲ میلی‌متر در وسط ارتفاع پوسته، پوسته را ضعیف و توانایی جذب انرژی را کاهش می‌دهد.

جدول (۲-۵): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌های مخروطی با شیار به عرض ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر در وسط با زاویه‌ی صفر درجه، تحت بارگذاری محوری

حداکثر نیروی اولیه (kN)	انرژی جذب شده (J)	پوسته دارای شیار با زاویه‌ی صفر و عرض شیار
۳۱	۴۷۰	۱ میلی‌متر
۳۲	۴۵۰	۲ میلی‌متر
۳۸	۴۰۲	۳ میلی‌متر

۲-۵-۶- اثر زاویه‌ی شیار بر جذب انرژی پوسته‌ی مخروطی

در اینجا سعی بر آن است تا اثر زاویه‌ی شیار روی بر پوسته، تاثیر آن در میزان جذب انرژی، مقدار جمع‌شدگی متقارن محوری و ضربه‌ی وارده توسط پوسته بررسی گردد. در شکل

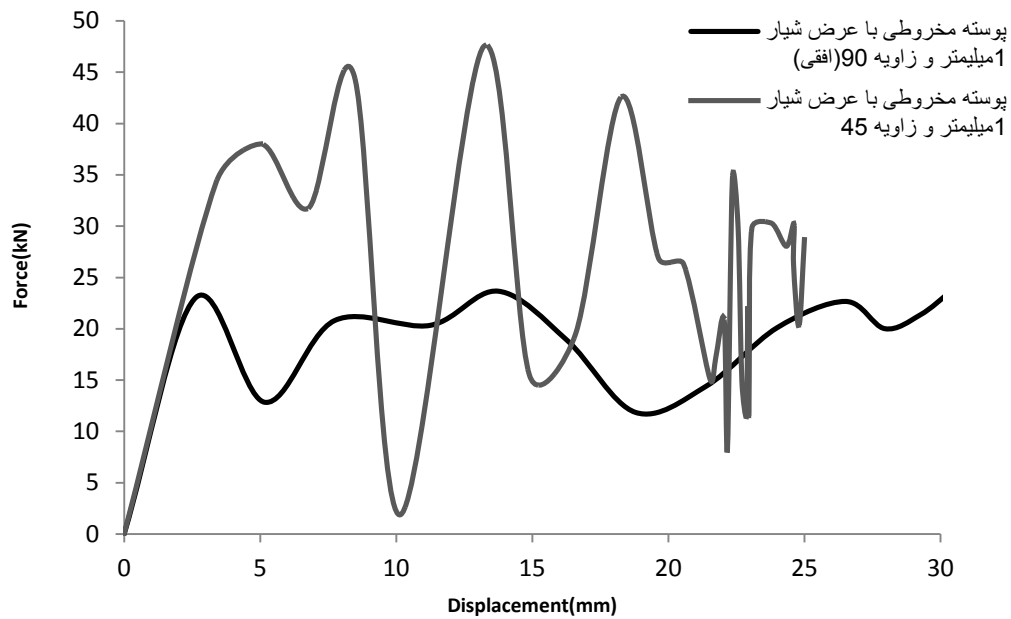
(۳۴-۲) ، پوسته‌های مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط با زاویه‌های به ترتیب صفر (عمودی)، ۴۵ و ۹۰ (افقی) درجه نشان داده شده است.



شکل (۳۴-۲): پوسته‌های مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط با زاویه‌های به ترتیب صفر (عمودی)، ۴۵ و ۹۰ (افقی) درجه

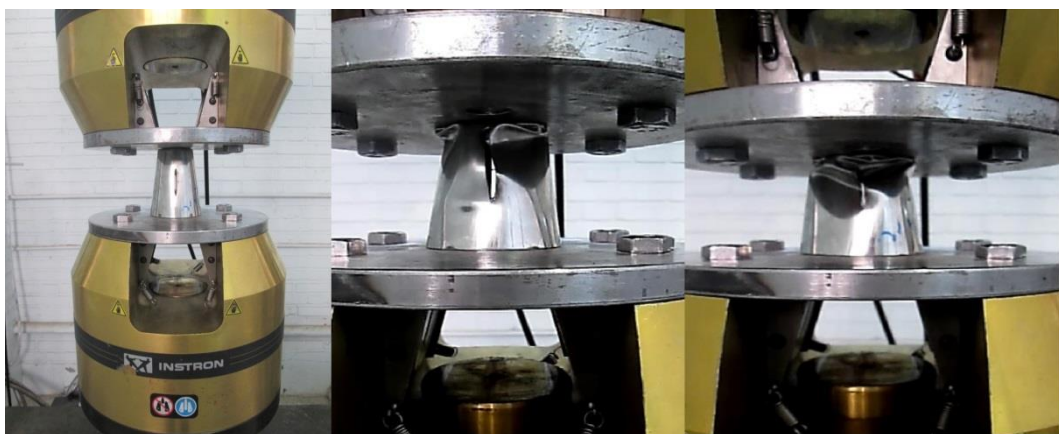
شرایط بارگذاری مانند نمونه‌های قبل می‌باشد. سرعت ۳۵ میلی‌متر بر ثانیه، و شرایط بارگذاری بصورت استاتیکی می‌باشد. پس از اعمال بار بر روی پوسته‌ها، نتیجه‌های زیر بصورت تجربی بدست می‌آید. در شکل (۳۴-۲) ، نمودار نیرو- جابه‌جایی پوسته‌های مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط با زاویه‌های ۴۵ و ۹۰ درجه نشان داده شده است.

در شکل (۳۵-۲)، مشخص است که پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط با زاویه‌ی ۹۰ درجه دارای حداکثر نیروی اولیه‌ی بسیار کمتر از پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط با زاویه‌های ۴۵ می‌باشد، همچنین میزان جذب انرژی پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط با زاویه‌های ۹۰ درجه از ۴۵ درجه بیشتر و دارای نوسان کمتری است. شیار با زاویه‌ی ۴۵ درجه، باعث ضعیف شدن پوسته شده و باعث شده است که پوسته دارای جمع‌شدگی نامتقارن گردد و نیروی وارده را به سرنشینان منتقل نماید.



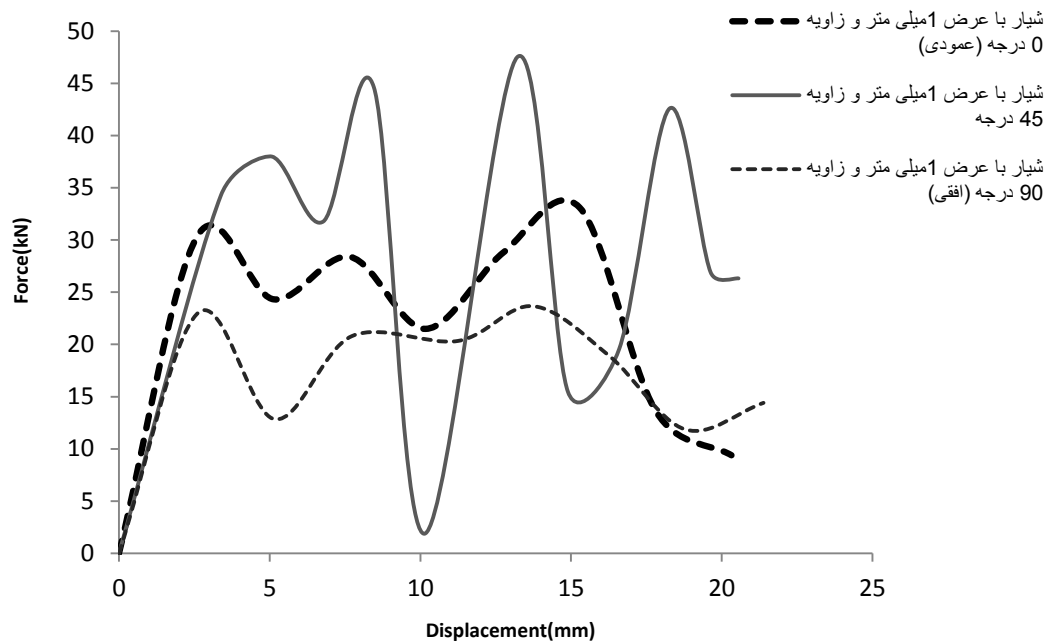
شکل (۲-۳۵): نمودار نیرو-جابجایی پوسته‌های مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلیمتر در وسط با زاویه‌های ۴۵ درجه و ۹۰ درجه (افقی)

در شکل (۲-۳۶)، نحوه‌ی قرارگیری پوسته‌ی مخروطی ناقص با شیار به عرض ۳ میلیمتر در وسط با زاویه‌ی صفر درجه در دستگاه آزمایش، نشان داده شده است.



شکل (۲-۳۶): پوسته‌ی مخروطی با شیار به عرض ۳ میلیمتر در وسط با زاویه‌ی ۰ درجه تحت بار محوری از نمای روبه‌رو تحت بارگذاری تحت آزمایش

در شکل (۲-۳۷)، به بررسی ۳ حالت وجود شروع کننده‌ی شیار با زاویه‌های مختلف بر روی پوسته پرداخته شده است.



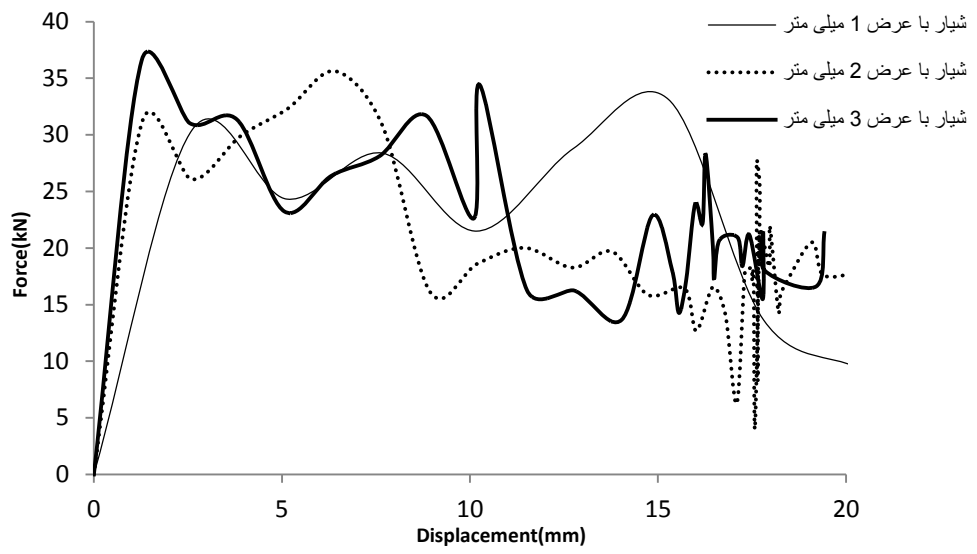
شکل (۲-۳۷): رفتار نیرو- جابه‌جایی ۳ نوع وجود شیار با زاویه‌های مختلف ۰، ۴۵ و ۹۰ بر روی پوسته‌های مخروطی

جدول (۲-۶): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌های مخروطی ناقص با شیار به عرض ۱ میلی‌متر در وسط با زاویه‌های صفر درجه (عمودی)، ۴۵ درجه و ۹۰ درجه (افقی)

پوسته‌های مخروطی با شیار به عرض ۱ میلی‌متر و زاویه‌ی	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
صفر درجه (عمودی)	۴۶۹/۲۸	۳۲
۴۵ درجه	۵۶۴/۴۷	۴۰
۹۰ درجه (افقی)	۶۴۹	۲۰

مشخص است که پوسته با شیار به عرض ۱ میلی‌متر و زاویه‌ی ۹۰ درجه دارای مساحت زیر نمودار نیرو- جابه‌جایی و مقدار اوج نیروی اولیه‌ی بهتری نسبت به بقیه می‌باشد. زیرا پوسته با شیار به عرض ۱ میلی‌متر و زاویه‌ی ۴۵ درجه دارای مساحت زیر نمودار نیرو- جابه‌جایی بیشتر نسبت به پوسته‌های آزمایش شده دارد و همچنین مقدار حداکثر نیروی اولیه‌ی آن نسبت به بقیه کمتر می‌باشد و دارای نوسانات کم در طول نمودار نیرو- جابه‌جایی می‌باشد. پوسته‌ی مخروطی دارای شیار با زاویه‌ی صفر درجه (عمودی) دارای نوسان نبوده و مقدار حداکثر نیروی اولیه‌ی آن نیز نسبت به پوسته‌ی مخروطی دارای شیار با زاویه‌ی ۴۵ درجه کم بوده، اما میزان جذب انرژی آن کم می‌باشد.

در شکل (۲-۳۸)، به بررسی ۳ حالت وجود شروع کننده شیار با زاویه‌های یکسان و با اندازه عرض متفاوت، بر روی پوسته، پرداخته شده است.



شکل (۲-۳۸): رفتار نیرو-جاب‌جایی ۳ حالت وجود شروع کننده شیار با زاویه‌های یکسان و با اندازه عرض متفاوت ۱ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر

فصل سوم

تحلیل عددی و مقایسه

نتایج عددی با تجربی

۳-۱-۱ آشنایی با نرم‌افزار آباکوس

۳-۱-۱-۱ مقدمه [۴۷]

نرم‌افزار آباکوس (ABAQUS) از جمله نرم‌افزارهای قدرتمند اجزای محدود در بازار است. آباکوس قابلیت حل مسایل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده‌ترین مدل‌سازی غیرخطی را دارا می‌باشد. این نرم‌افزار دارای مجموعه المانهای بسیار گسترده‌ای می‌باشد که هر نوع هندسه‌ای را می‌توان توسط این المان‌ها مدل کرد. همچنین دارای مدل‌ها و رفتارهای بسیار زیادی است که در مدل‌سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن مسلح، فومهای فلزی و نیز شکننده و همچنین مصالحی ژئوتکنیکی نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می‌سازد. نظر به اینکه آباکوس یک ابزار مدل‌سازی عمومی و گسترده می‌باشد. استفاده از آن تنها محدود به تحلیل مسائل مکانیک جامدات (یعنی مسئله تنش - کرنش) نمی‌شود. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان مسایل مختلفی نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل حرارتی اجزاء الکتریکی، اکوستیک، تراوش و پیزوالکتریک را مورد مطالعه قرار داد.

آباکوس با وجود اینکه مجموعه قابلیت‌های بسیار گسترده‌ای را در استفاده از نرم‌افزار در اختیار کاربر قرار می‌دهد، کار نسبتاً ساده‌ای می‌باشد. پیچیده‌ترین مسایل را می‌توان به آسانی مدل کرد. به عنوان مثال مسایل شامل بیش از یک جزء را می‌توان با ایجاد مدل هندسی هر جزء و سپس نسبت داده رفتار ماده مربوطه به هر جزء و سپس مونتاژ اجزاء مختلف مدل کرد. در اغلب مدل‌سازی‌ها حتی مدل‌های با درجه غیرخطی بالا، کاربر می‌بایست تنها داده‌های مهندسی نظیر هندسه مسأله، رفتار ماده مربوط به آن، شرایط مرزی و بارگذاری و آن مسأله را تعیین کند. آباکوس در یک تحلیل غیرخطی، به طور اتوماتیک میزان نموبار و همگرایی را انتخاب و همچنین در طول تحلیل مقادیر آنها را جهت دستیابی به یک جواب صحیح تعدیل می‌کند. در نتیجه کاربر به ندرت می‌بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مسأله را تعیین کند.

۳-۱-۲-۱ بخش‌های آباکوس

نرم‌افزار آباکوس شامل ۴ بخش است:

Abaqus/CAE که شامل محیطی برای طراحی و مدل‌سازی (پیش‌پردازش) و نمایش گرافیکی نتایج حاصل از تحلیل است.

Abaqus/CFD که یک نرم‌افزار تحلیل دینامیکی سیالات است و از نسخه ۶/۰ به بعد به این مجموعه نرم‌افزار و اضافه شد.

آباکوس / استاندارد که یک تحلیل گر کلی بر مبنای روش اجزای محدود می‌باشد از رویکرد انتگرال گیری ضمنی استفاده می‌کند.

Abaqus/EXPLICIT که یک تحلیل گر خاص اجزای محدود می باشد و از رویکرد صریح برای انتگرال گیری استفاده می کند و برای حل سیستم های غیرخطی شامل مسائل تماس و در حالت بارگذاری گذرا کاربرد دارد.

همچنین این نرم افزار از زبان برنامه نویسی منبع باز پایتون برای برنامه نویسی در داخل نرم افزار پشتیبانی می کند. وجود امکان اسکریپت نویسی در داخل نرم افزار، قابلیت های مدل سازی آن را دو چندان می کند.

۳-۱-۳- مبانی نرم افزار آباکوس

یک تحلیل کامل در برنامه آباکوس معمولاً از سه مرحله تشکیل شده است:

- مرحله پیش پردازش
- مرحله پردازش
- مرحله پس پردازش

انواع پردازش در آباکوس به سه مرحله مطابق شکل زیر به وسیله تعدادی فایل با یکدیگر ارتباط دارند:

پیش پردازش (ABAQUS/CAE)

در این مرحله باید مدل مسأله را ساخته و یک فایل ورودی و آباکوس ایجاد شود. مدل را معمولاً می توان به صورت گرافیکی با استفاده از ABAQUS/CAE و یا سایر پیش پردازنده ها ایجاد کرد و یا می توان فایل ورودی و آباکوس را با استفاده از یک ویرایشگر متن مثل Notepad ساخت.

پردازش

پردازش که معمولاً به صورت یک روند در پس زمینه اجرا می شود. مرحله ای است که در آن آباکوس استاندارد و یا صریح مسأله عددی را که در مدل تعریف شده حل می کند. مثال هایی از خروجی تحلیل تنش عبارت است از تغییر مکانها و تنشهایی که در فایل های باینری ذخیره می شود و برای مرحله پس از پردازش مورد استفاده قرار می گیرد. بسته به پیچیدگی مسأله ای که باید تحلیل شود و قدرت رایانه ای که تحلیل را انجام می دهد. زمان تحلیل می تواند بین چند ثانیه تا چند روز یا چند ماه طول بکشد.

مرحله پس پردازش (ABAQUS/CAE)

ارزیابی نتایج را می توان بعد از اتمام مرحله پردازش انجام داد. ارزیابی معمولاً با استفاده از مدول بصری یا سایر پس پردازنده ها انجام می شود. مدول بصری داده های فایل خروجی باینری را می خواند و

گزینه‌ها و متفاوتی مانند کانتورهای رنگی، انیمیشن، فرم تغییرشکل یافته و با نمایش داده‌ها به صورت نمودار برای نمایش نتایج دارد.

۳-۱-۴- کنترل مش‌ریزی تطبیقی^۱ [۶۹]

در تغییرشکل‌های زیاد مانند تغییرشکل وزن در قالب و یا برخورد گلوله با صفحه‌ی صلب و... المان‌ها تغییرشکل‌های شدیدی می‌کنند و این تغییر در شکل آن‌ها گاه به قدری می‌شود که باعث اعوجاج^۲ می‌شود. برای اعمال مش‌ریزی بهتر و جواب دقیق‌تر، قابلیت‌های خاصی در نرم‌افزار آباکوس^۳ ایجاد شده است. از آن جمله می‌توان به مش‌ریزی تطبیقی^۴ اشاره نمود. بعضی از این تغییرات تخصصی می‌باشد و تغییر در آن‌ها تغییرات زیادی را در تحلیل ایجاد می‌کند که نداشتن اطلاع کافی از آن‌ها و تغییر آن‌ها نه تنها جواب‌ها را دقیق‌تر نمی‌کند باعث بروز مشکلات نیز خواهد شد. روش ALE یکی از بهترین این روش‌هاست. ضعف این روش در افزایش زمان حل، گاه تا دو یا چند برابر می‌باشد. همچنین این روش در سرعت‌های پایین جواب بهتری می‌دهد.

۳-۱-۵- اندازه‌ی المان‌ها و نوع المان‌ها

در تحلیل‌های المان محدود توسط نرم‌افزار، فاکتورهای گوناگون دارای اهمیت می‌باشند که بر روی زمان و دقت جواب مسأله تاثیر می‌گذارند. در اینجا قصد بر این است که به فاکتوری اشاره شود که اثر بسزایی در زمان و دقت تحلیل دارد. برای بدست آوردن اندازه‌ی بهینه المان‌ها و نوع آن‌ها، آزمایش‌های عددی متعددی صورت می‌پذیرد. تا در نهایت اندازه‌ی المان‌ها، $0/001$ متر یا 1 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. نوع المان‌ها نیز از نوع Quad یا Quad-dominated انتخاب شده است.

۳-۱-۶- Solid یا Shell

در نرم‌افزار و در هنگام مدل کردن پوسته، باید بین Shell و Solid یکی را انتخاب کنیم. چیزی که مشخص است، پوسته‌ای بودن جسم در حالت واقعی است. می‌توان سازه را از اول در مدول Part بصورت Shell انتخاب و ضخامت را برای آن تعریف نمود یا از همان اول بصورت Solid تعریف نموده و با دادن مقدار اکستروود^۵ در مدول Part، بطور طبیعی با در نظر گرفتن نسبت $1/2$ یا $1/4$ حالت پوسته‌ای بودن را اعمال نمود. در این پایان‌نامه از همان اول نمونه بصورت Shell، مدل شده است.

¹ . Haurglass Control
² . Distorsion
³ . Abaqus
⁴ . ALE
⁵ . Extrude

۳-۱-۷- نوع بارگذاری

نوع بارگذاری در مبحث برخورد چه در بحث تجربی و چه در عددی حائز اهمیت است. دو نوع بارگذاری بطور کلی در مورد برخورد بیان می‌گردد.

۱- دینامیک ۲- استاتیک

موارد زیر می‌توانند در انتخاب یکی از این دو نوع بارگذاری به ما یاری رسانند:

۱- نوع برخورد، شتابدار یا بدون شتاب

۲- توانایی دستگاه آزمایش

پس از بررسی مقالات گذشته و بررسی‌های عددی و تجربی و با توجه به شرایط ذکر شده در بالا، برای تحلیل مورد مطالعه، حالت استاتیک در نظر گرفته شده است. بر این اساس، در دستگاه آزمایش، فک متحرک^۱ دارای سرعتی ثابت (بدون شتاب) در نظر گرفته شده است.

در نرم‌افزار آباکوس، دو نوع تحلیل‌گر Abaqus داریم:

۱- Abaqus/Standard ۲- Abaqus/Explicit

در این پایان‌نامه از روش، Abaqus/Explicit استفاده شده است.

۳-۱-۸- متقارن محوری و نامتقارن محوری [۴۸]

هنگام برخورد یک صفحه‌ی صلب با یک پوسته، جسم شروع به جمع شدن می‌کند. اگر پوسته دارای سطح مقطع غیرمتقارن یا گشودگی یا... باشد نوع جمع‌شدگی^۲ تغییر می‌کند.

در بررسی که توسط اندرو صورت گرفته است. مقدار نیروی میانگین در حال متقارن محوری تقریباً ۱/۳ برابر بزرگتر است از حالت غیرمتقارن محوری، که این خود نشان از تأثیر آن در جذب انرژی و میزان کاهش انرژی وارده به سیستم را دارد.

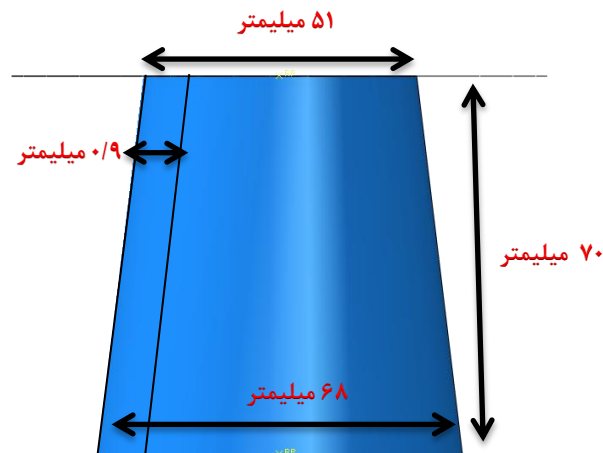
۳-۲- مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی

در این بخش، نتایج عددی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار آباکوس با نتایج تجربی آزمایش شده توسط دستگاه اینسترون روی پوسته‌های مخروطی ناقص با شروع‌کننده‌ها، سرعت‌ها (۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر بر ثانیه) و ضخامت‌ها (۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر) و ارتفاع‌های متفاوت (۷۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ میلی‌متر) مقایسه و بحث شده است. پوسته‌های مخروطی آزمایش شده، از جنس فولاد ضدزنگ، SS304 می‌باشند. ابتدا نتایج عددی بیان شده است که روش تجربی برای آن‌ها صورت گرفته است و پس از تأیید نتایج، تحلیل‌هایی بیان خواهد شد که صرفاً بصورت عددی انجام گرفته‌اند و در آخر

^۱ . Actuator

^۲ . چین‌خوردگی

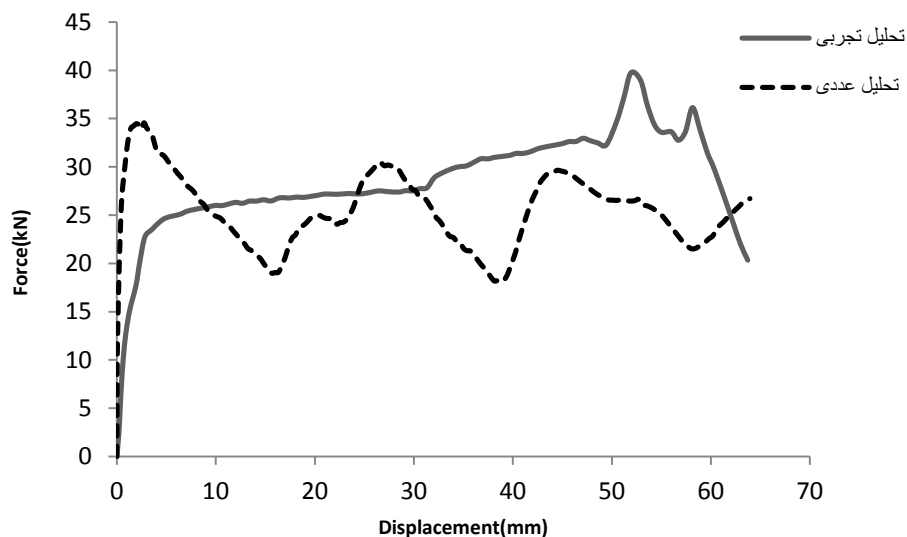
نتیجه گیری شده است. ضریب پواسون $0/3$ فرض شده است. ضریب اصطکاک $0/25$ ، در نظر گرفته شده است. در شکل (۱-۳)، هندسه ی قطعه نشان داده شده است.



شکل (۱-۳): هندسه ی نمونه ی مورد آزمایش به ارتفاع ۷۰ میلی متر

۳-۲-۱- تحلیل عددی بررسی میزان جذب انرژی بر مخروط ناقص ۷۰ میلی متری

در شکل (۲-۳)، مخروط ناقص به ارتفاع ۷۰ میلی متر مشاهده می گردد. در فصل روش تجربی این مخروطها مورد آنالیز قرار گرفته اند و در این فصل باهم مقایسه می گردند.

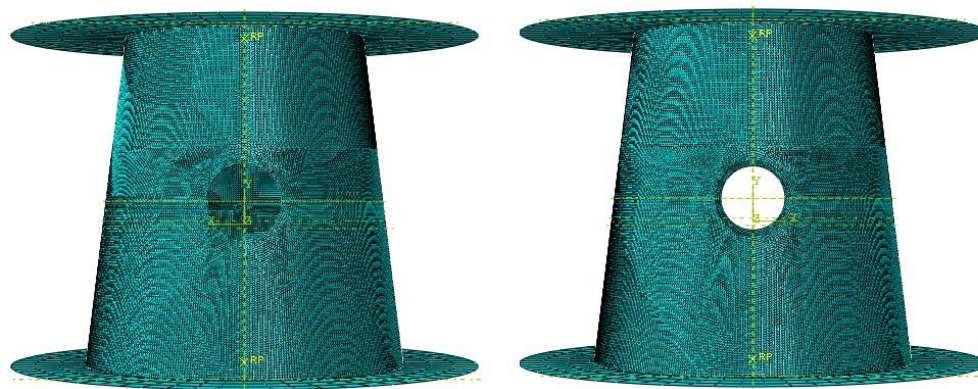


شکل (۲-۳): نمودار نیرو-جابجایی پوسته ی مخروطی ناقص به ارتفاع ۷۰ میلی متر بصورت عددی و تحلیلی

۳-۲-۲- تحلیل عددی بررسی اثر گشودگی متقارن و نامتقارن در وسط

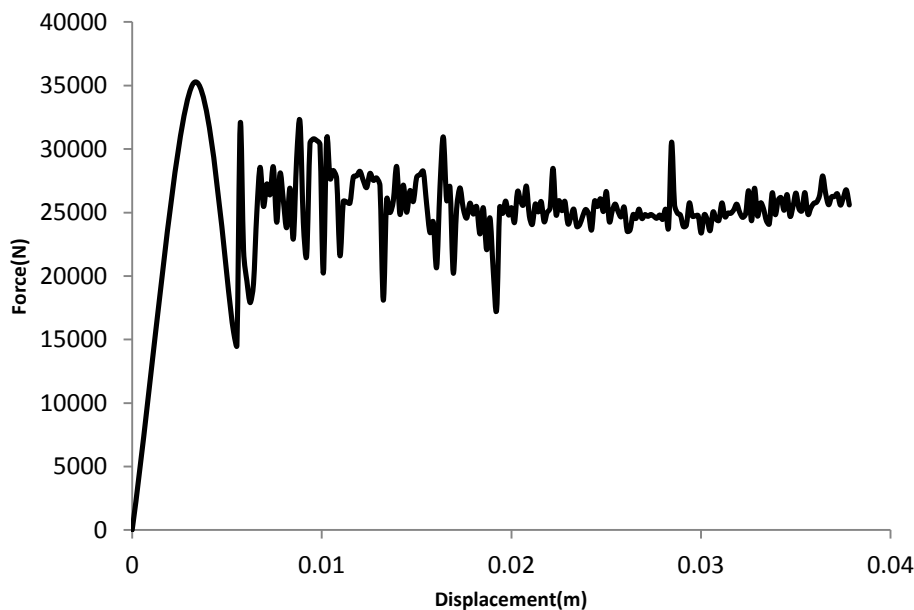
برروی مخروط ناقص ۷۰ میلی‌متری

در شکل (۳-۳)، دو مخروط ناقص به ترتیب متقارن و نامتقارن مشاهده می‌گردد. در فصل روش تجربی این مخروطها مورد آنالیز قرار گرفته‌اند و در این فصل باهم مقایسه می‌گردند.

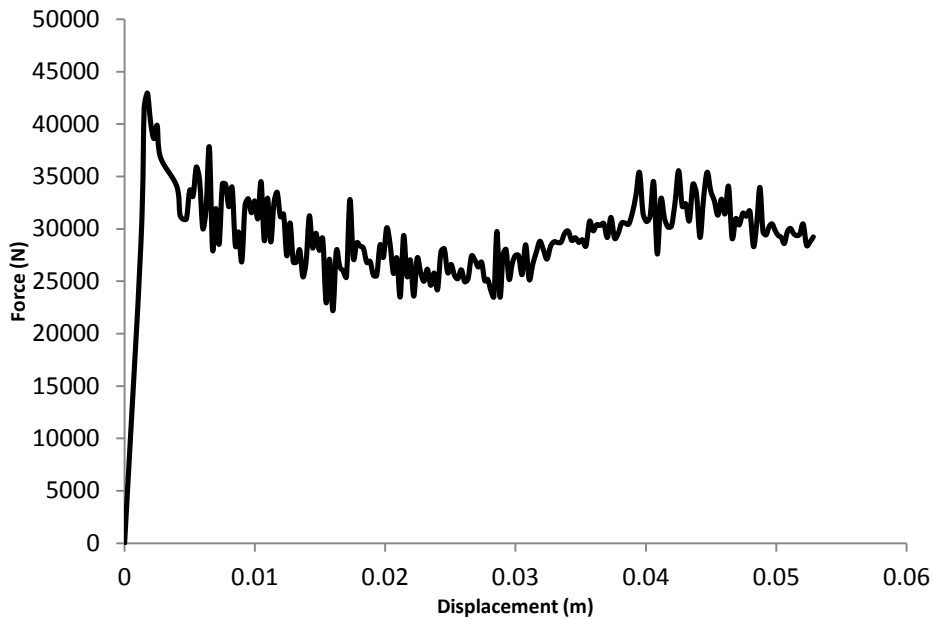


شکل (۳-۳): پوسته‌ی مخروطی ناقص به ارتفاع ۷۰ میلی‌متر دارای یک و دو گشودگی

در این فصل، به بیان تحلیل عددی صورت گرفته توسط نرم‌افزار آباکوس پرداخته شده است. پس از انجام آزمایش عددی، نمودارهای نیرو - جابه‌جایی که مقیاس مورد نظر برای بررسی تأثیر شروع‌کننده‌ها می‌باشد، در زیر ترسیم شده است. شکل (۳-۴) و (۳-۵)، نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته متقارن و نامتقارن را نشان می‌دهد.

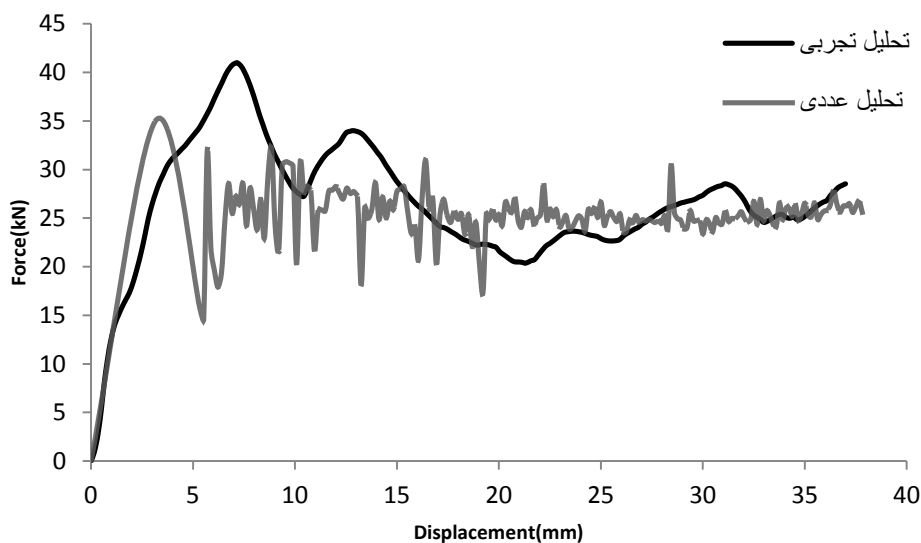


شکل (۳-۴): نمودار نیرو - جابه‌جایی مخروط دارای دو گشودگی متقارن درمیانه مخروط با ارتفاع ۷۰ میلی‌متری بصورت عددی



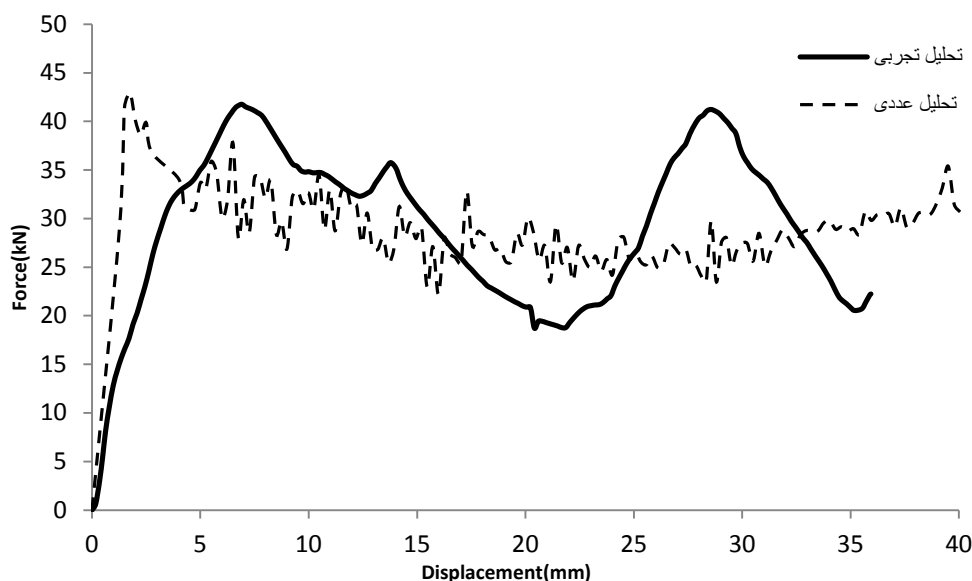
شکل (۳-۵): نمودار نیرو - جابه‌جایی مخروط دارای یک گشودگی درمیانه مخروط با ارتفاع ۷۰ میلی‌متری بصورت عددی

برای مقایسه‌ی بهتر، نمودار روش تجربی و عددی با هم رسم شده است. شکل (۳-۶)، تحلیل عددی و تجربی مخروط ناقص دارای گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر در وسط بصورت متقارن را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۶): تحلیل عددی و تجربی مخروط ناقص ۷۰ میلی‌متری دارای گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر در وسط بصورت متقارن تحت بارگذاری محوری

شکل (۳-۷)، تحلیل عددی و تجربی مخروط ناقص دارای یک گشودگی ۱۵ میلی‌متر در وسط (بصورت نامتقارن) را نشان می‌دهد.



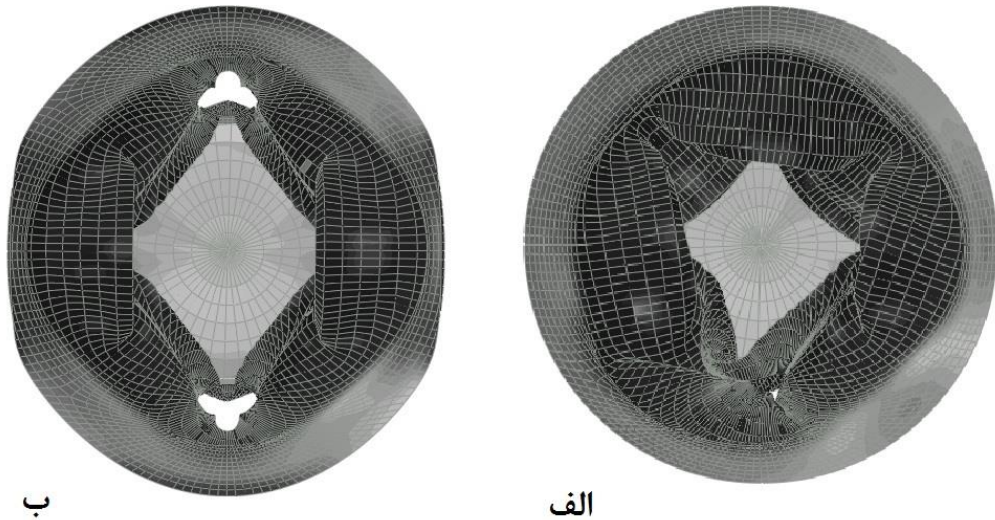
شکل (۳-۷): تحلیل عددی و تجربی مخروط ناقص دارای یک گشودگی ۱۵ میلی‌متر در وسط تحت بارگذاری محوری جدول (۳-۱): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروط ناقص ۷۰ میلی‌متری دارای دو گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر

نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۹۸۱/۲	۴۰
عددی	۹۳۵/۳	۳۵

جدول (۳-۲): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروط ناقص ۷۰ میلی‌متری دارای یک گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر

نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۱۰۴۸/۵	۴۲
عددی	۱۰۵۲/۱	۴۳

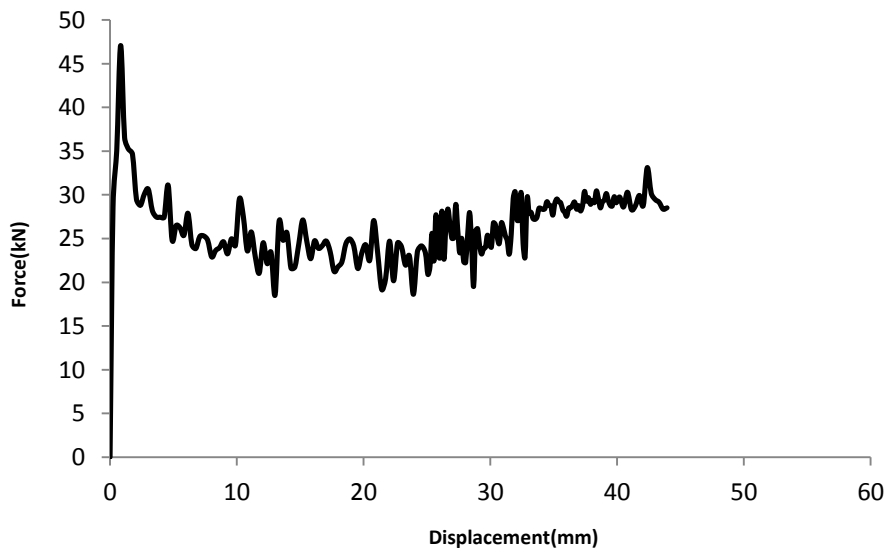
با مقایسه نمودارهای بالا، جدول (۳-۱) و جدول (۳-۲)، مشاهده می‌گردد که تحلیل عددی و تجربی دارای انطباق خوبی هستند. بررسی روش تجربی در ۲ حالت یک و دو گشودگی نشان می‌دهد که پوسته‌ی متقارن و نامتقارن، ظرفیت تحمل جذب انرژی خوبی دارند و همچنین پوسته‌ی متقارن برای حداکثر نیروی اولیه‌ی کمتری نسبت به پوسته‌ی نامتقارن می‌باشد. نوع جمع‌شدگی در شکل (۳-۸ الف) و شکل (۳-۸ ب)، به ترتیب برای پوسته با یک گشودگی و دو گشودگی نشان داده شده است.



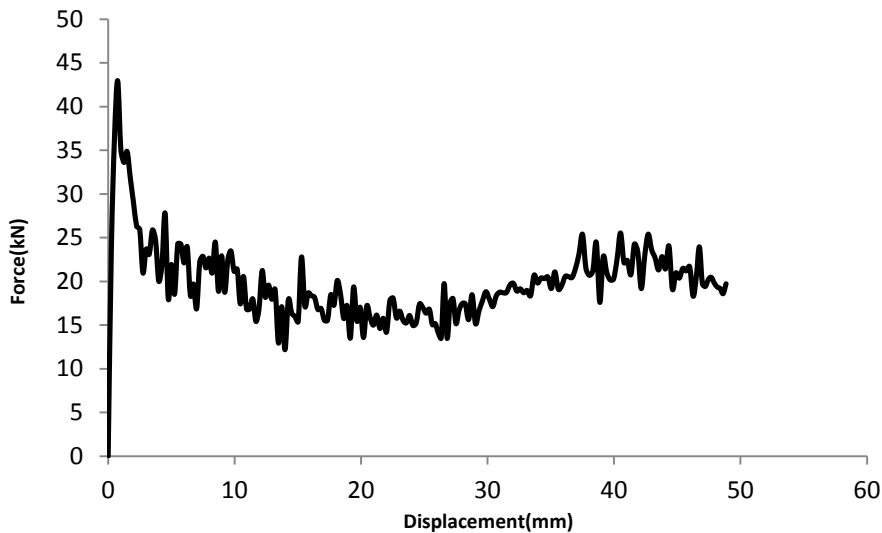
شکل (۸-۳): الف- نحوه جمع‌شدگی پوسته با ۱ گشودگی بصورت نامتقارن تحت بارگذاری محوری بصورت تحلیل عددی. ب- نحوه جمع‌شدگی پوسته با ۲ گشودگی بصورت متقارن تحت بارگذاری محوری بصورت تحلیل عددی

۳-۲-۳- تحلیل عددی بررسی اثر گشودگی متقارن و نامتقارن در جذب انرژی بر روی مخروط ناقص به ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر

نتایج عددی تحت بارگذاری محوری با نتایج تجربی مقایسه شده است. مطابق زیر در شکل (۹-۳) و شکل (۱۰-۳)، تحلیل عددی بترتیب ۲ گشودگی متقارن و یک گشودگی نامتقارن نشان داده شده است.

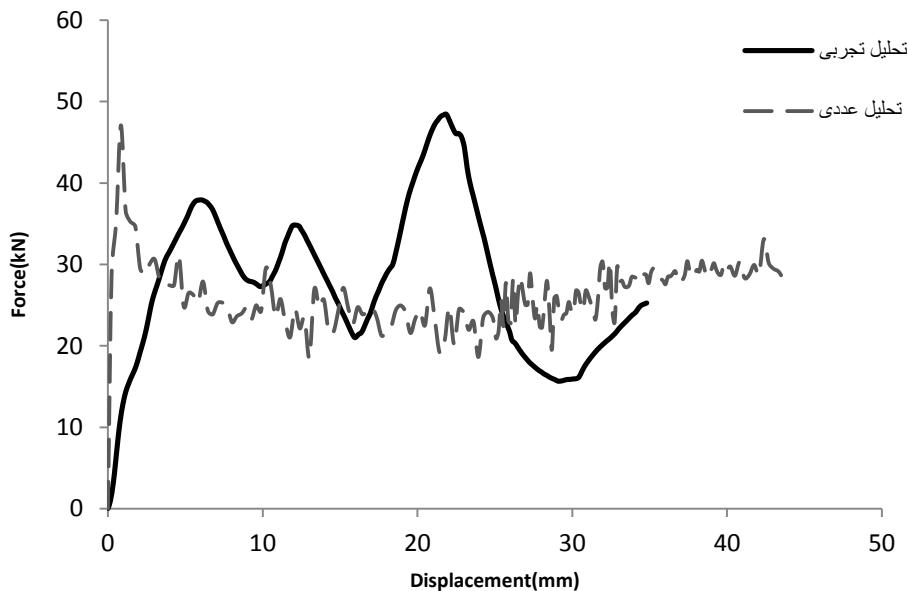


شکل (۹-۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیل عددی پوسته‌ی مخروطی ۱۰۰ میلی‌متری دارای ۲ گشودگی بصورت متقارن در وسط ارتفاع پوسته

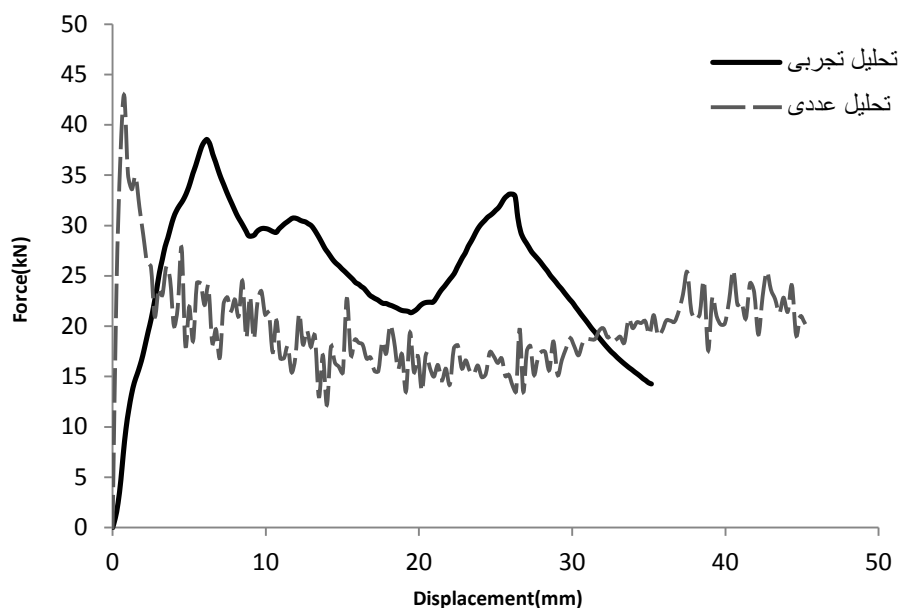


شکل (۳-۱۰): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی پوسته‌ی مخروطی ۱۰۰ میلی‌متری دارای ۱ گشودگی بصورت نامتقارن در وسط ارتفاع پوسته

شکل‌های (۳-۹) و (۳-۱۰)، نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته‌ها با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر به ترتیب دارای دو و یک گشودگی و شکل‌های (۳-۱۱) و (۳-۱۲)، مقایسه‌ی بین تحلیل عددی و تجربی مخروط ناقص، به ترتیب دارای دو و یک گشودگی را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۱): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی و تجربی پوسته‌ی مخروطی دارای دو گشودگی تحت بارگذاری محوری بر روی هم



شکل (۳-۱۲): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی و تجربی پوسته‌ی مخروطی دارای یک گشودگی تحت بارگذاری محوری بر روی هم

در جدول (۳-۳) و جدول (۳-۴)، مساحت زیر نمودار و حداکثر نیروی اولیه‌ی به‌ترتیب پوسته‌ی مخروطی دارای دو گشودگی و پوسته‌ی مخروطی دارای یک گشودگی را نشان می‌دهد.

جدول (۳-۳): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروط ناقص ۱۰۰ میلی‌متری دارای دو گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر

نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۹۶۹/۲	۴۰
عددی	۱۰۵۸	۴۵

جدول (۳-۴): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروط ناقص ۱۰۰ میلی‌متری دارای یک گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر

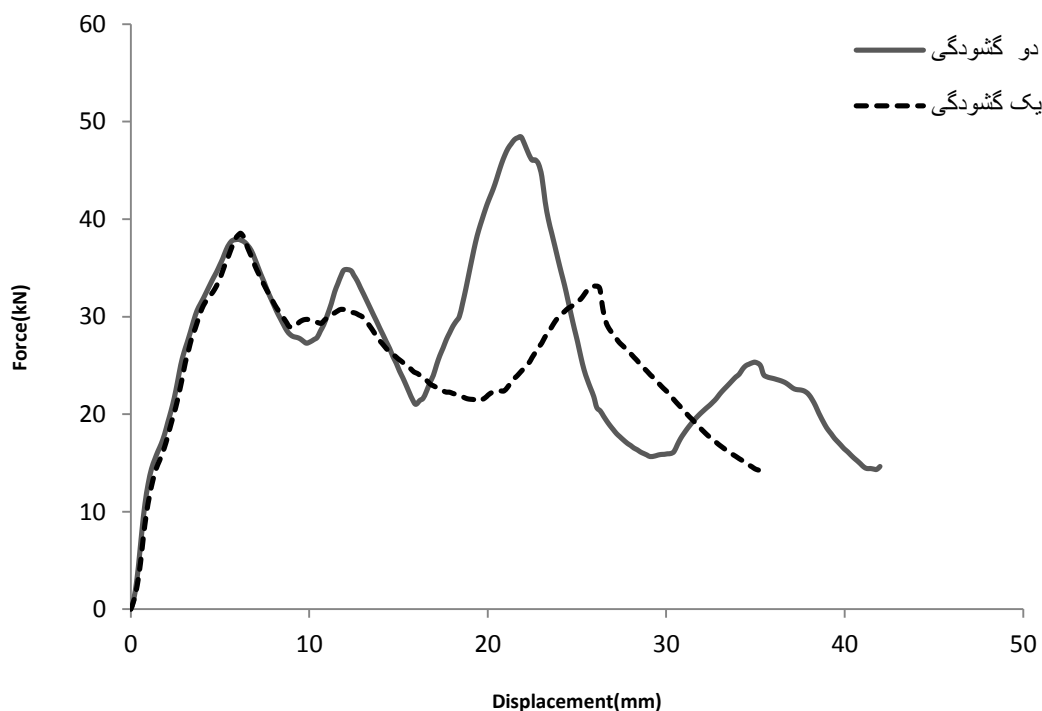
نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۸۸۸/۵	۴۰
عددی	۹۱۰/۷	۴۴

نتایج عددی و تجربی، در هر دو حالت انطباق خوبی را با هم نشان می‌دهند. نتایج عددی و تجربی، هم‌پوشانی خوبی یاهم دارند. در شکل (۳-۱۳)، به مقایسه‌ی تحلیل‌های تجربی، در حالت مخروط ۱۰۰ میلی‌متری با یک گشودگی و مخروط ناقص با دو گشودگی پرداخته

شده است. در جدول (۳-۵)، میزان جذب انرژی و حداکثر نیروی اولیه‌ی پوسته‌ی مخروطی با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر دارای دو و یک گشودگی بیان شده است.

جدول (۳-۵): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه‌ی پوسته‌ی مخروط ناقص ۱۰۰ میلی‌متری دارای دو و یک گشودگی به قطر ۱۵ میلی‌متر بصورت تجربی

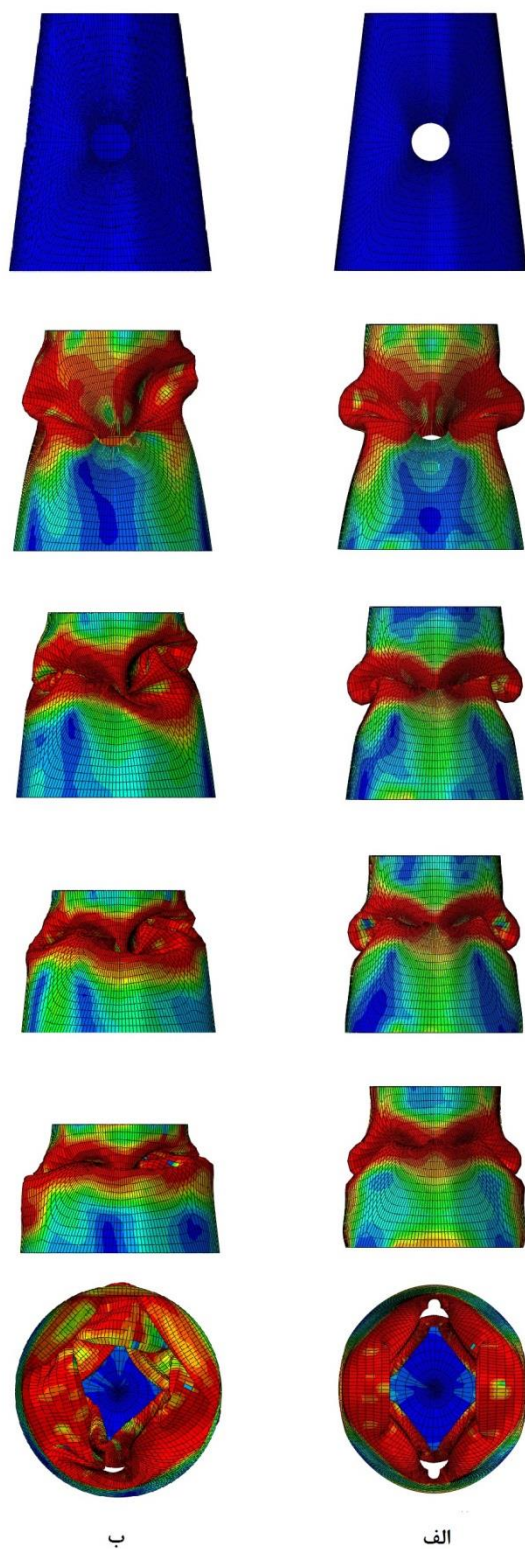
نوع گشودگی پوسته	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
پوسته دارای دو گشودگی	۹۶۹/۲	۴۰
پوسته دارای یک گشودگی	۸۸۸/۵	۴۰



شکل (۳-۱۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی روش تجربی مخروط ناقص با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر دارای یک و دو گشودگی تحت بارگذاری محوری بر روی هم

کاملاً مشخص است که پوسته‌ها دارای حداکثر نیروی اولیه‌ی تقریباً یکسانی هستند، اما پوسته‌ی دارای دو گشودگی متقارن، دارای مساحت زیر نمودار بیشتری نسبت به پوسته‌ی دارای یک گشودگی می‌باشد. پس پوسته دارای دو گشودگی در وسط که تغییرشکل پلاستیک متقارن‌تری دارد، دارای بازدهی بهتری می‌باشد.

در شکل (۳-۱۴-الف)، نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی دارای دو گشودگی تحت بارگذاری محوری و در شکل (۳-۱۴-ب)، نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی دارای یک گشودگی تحت بارگذاری محوری، نشان داده شده است.

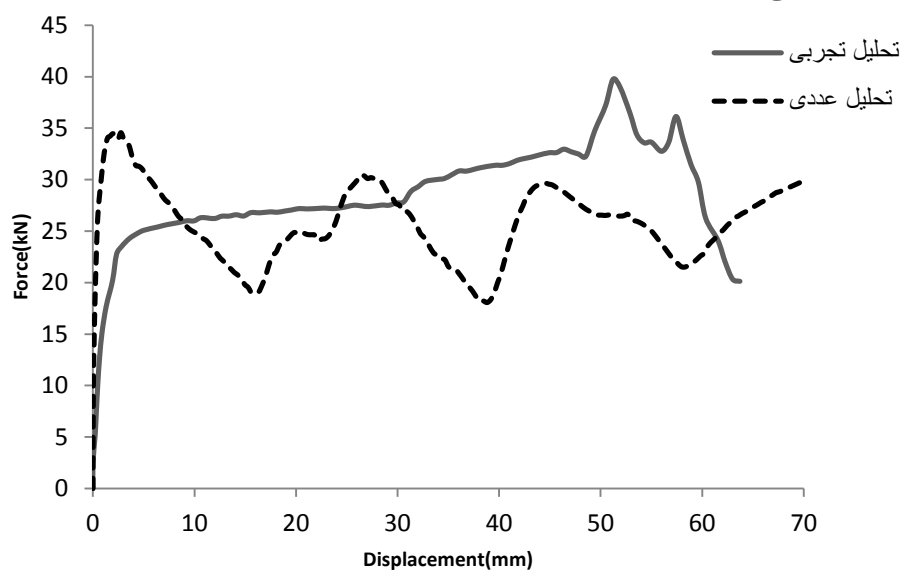


شکل (۳-۱۴-الف): نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی دارای دو گشودگی تحت بارگذاری محوری، شکل (۳-۱۴-ب):
 نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی دارای یک گشودگی تحت بارگذاری محوری

۳-۲-۴- تحلیل عددی اثر ارتفاع در میزان جذب انرژی بر روی پوسته‌های

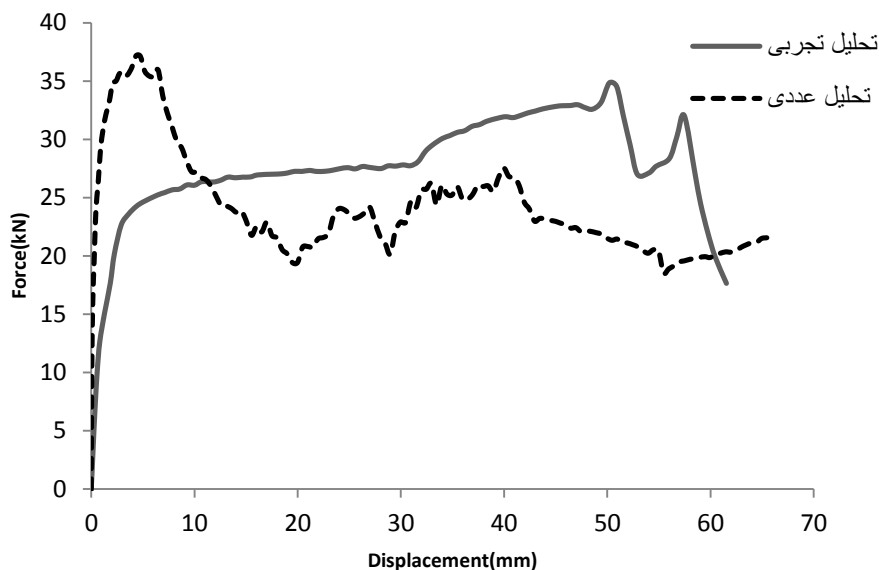
مخروطی

برای بررسی تأثیر ارتفاع در جذب انرژی، سه ارتفاع در نظر گرفته شده است. ارتفاع پوسته‌ها برابر ۷۰ میلی‌متر، ۱۰۰ میلی‌متر و ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. در آزمایش تجربی دو ارتفاع ۷۰ میلی‌متر و ۱۰۰ میلی‌متر بررسی شده است. با مقایسه نتایج آن‌ها و در صورت انطباق نتایج، طول ۱۵۰ میلی‌متر نیز تحلیل خواهد شد. شکل (۳-۱۵)، نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی و تجربی پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۵): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی و تجربی پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری

شکل (۳-۱۶)، نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی و تجربی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۱۶): مقایسه نمودارهای نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی و تجربی پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری

جدول (۳-۶): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته با ارتفاع ۷۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری

نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۱۷۴۰	۳۴
عددی	۱۶۴۷/۸	۲۶

جدول (۳-۷): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری

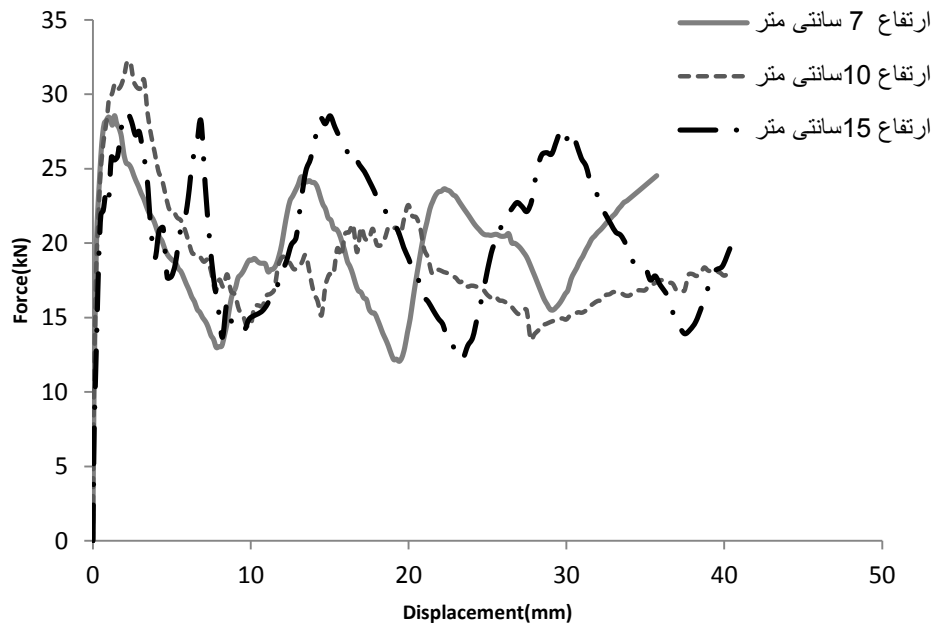
نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۱۷۰۹	۳۵
عددی	۱۶۸۹/۴	۲۶

جدول (۳-۸): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته با ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری

نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
عددی	۱۴۴۹	۲۹

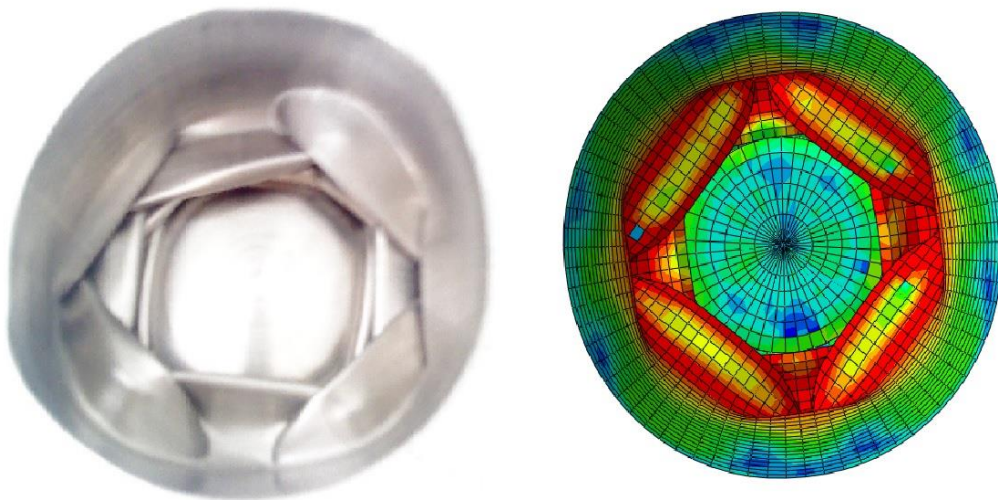
در شکل (۳-۱۵) و شکل (۳-۱۶) و مطابق جدول (۳-۶)، جدول (۳-۷)، انطباق بین تحلیل عددی و تجربی با درصد خطای پایینی برقرار است. همچنین در جدول (۳-۸)، مساحت زیر نمودار و حداکثر نیروی اولیه پوسته با ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری نشان داده شده است. مشخصات در

شکل (۳-۱۷)، بررسی نتایج تحلیل عددی طول‌های ۷۰ میلی‌متر، ۱۰۰ میلی‌متر و ۱۵۰ میلی‌متر پرداخته شده است.



شکل (۳-۱۷): مقایسه نمودارهای نیرو - جابه‌جایی پوسته با طول‌های ۷۰ میلی‌متر، ۱۰۰ میلی‌متر و ۱۵۰ میلی‌متر بصورت تحلیل عددی

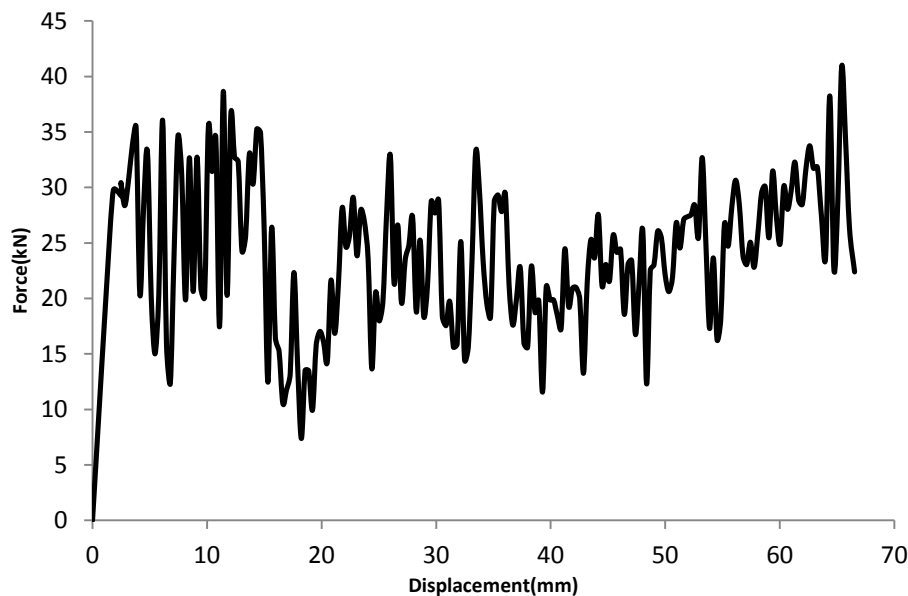
مشخص است که پوسته‌ی مخروطی با طول ۱۵۰ میلی‌متر دارای مساحت زیر نمودار کمتر نسبت به پوسته‌های مخروطی با طول ۷۰ و ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد. پوسته‌ی مخروطی با طول ۱۰۰ میلی‌متر دارای حداکثر نیروی اولیه‌ی برابر با پوسته‌ی مخروطی با طول ۷۰ میلی‌متر است، اما مساحت زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته‌ی مخروطی با طول ۷۰ میلی‌متر بیشتر از مساحت زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته‌ی مخروطی با طول ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد پس میزان جذب انرژی آن نیز بیشتر است. بهترین طول، ۷۰ میلی‌متر است که دارای مقدار حداکثر نیروی اولیه‌ی برابر و مساحت سطح زیر نمودار بهتری است. در شکل (۳-۱۸)، نحوه‌ی جمع‌شدگی با طول ۱۰۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری نشان داده شده است.



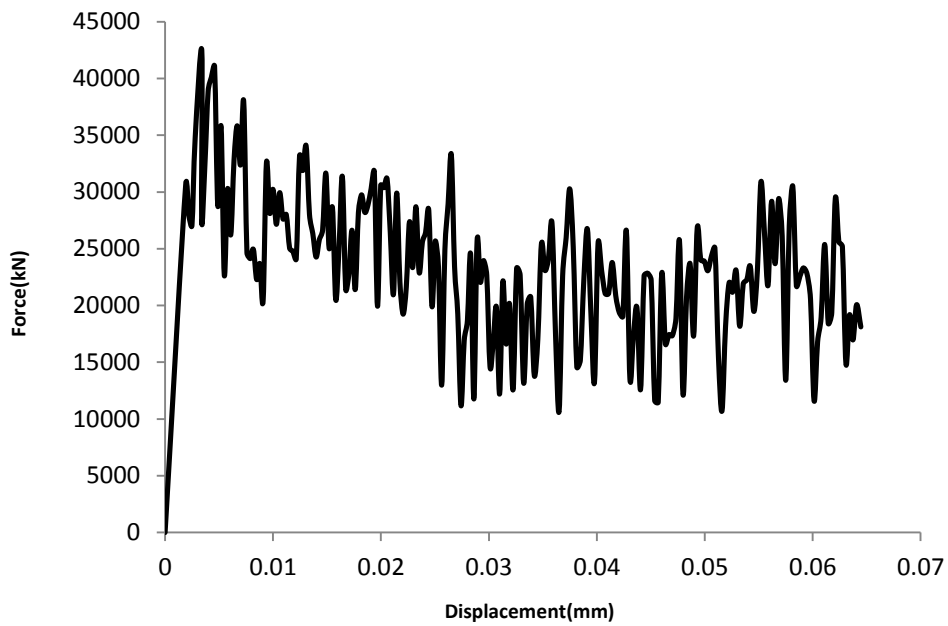
شکل (۳-۱۸): نحوه‌ی جمع‌شدگی با طول ۱۰۰ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری

۳-۲-۵- تحلیل عددی وجود یک گشودگی ۲۰ میلی‌متری در سه ارتفاع مختلف

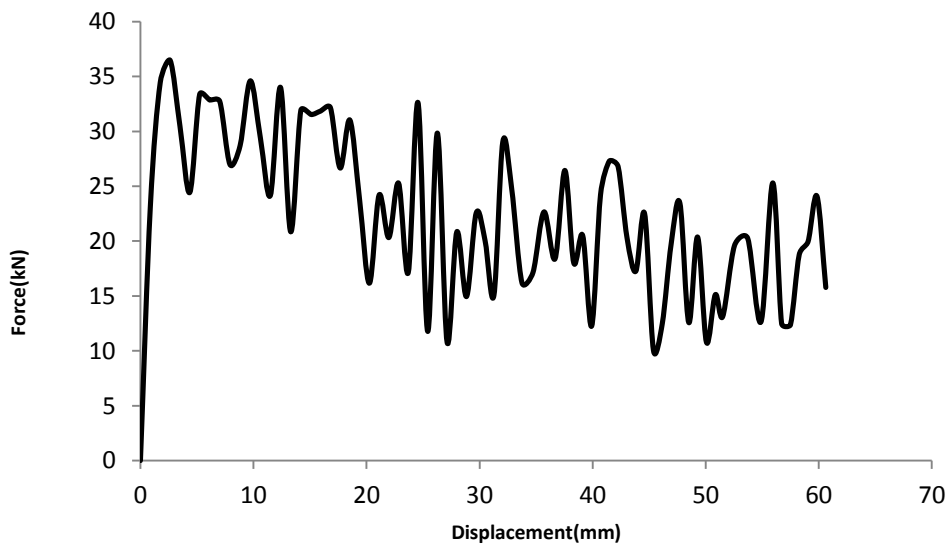
در فصل روش تجربی، به بررسی این پوسته‌ها پرداخته شده است. تحلیل عددی صورت گرفته بر روی پوسته‌های ۲۰ میلی‌متری در سه ارتفاع مطابق نمودارهای زیر است:
 شکل‌های (۳-۱۹)، (۳-۲۰) و (۳-۲۱)، تحلیل عددی پوسته‌های با ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر دارای گشودگی به ترتیب با قطر ۲۰ میلی‌متری در ارتفاع $0.3L$ ، قطر ۲۰ میلی‌متری در ارتفاع $0.5L$ و پوسته‌ی ۱۰ سانتی‌متری و گشودگی با قطر ۲۰ میلی‌متری در ارتفاع $0.75L$.



شکل (۳-۱۹): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیل عددی پوسته‌ی ۱۰۰ میلی‌متری دارای گشودگی با قطر ۲۰ میلی‌متری در ارتفاع $0.3L$ تحت بارگذاری محوری

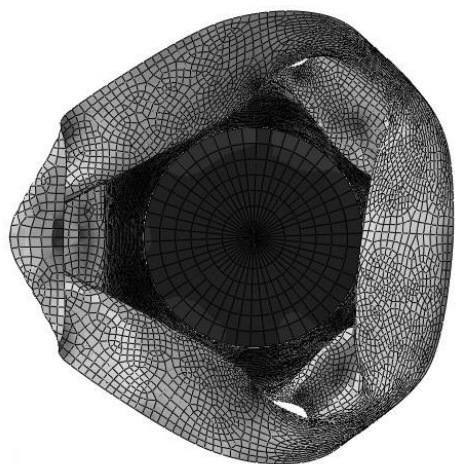


شکل (۳-۲۰): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی پوسته‌ی ۱۰۰ میلی‌متری دارای گشودگی با قطر ۲۰ میلی‌متری در ارتفاع $0.5L$ تحت بارگذاری محوری

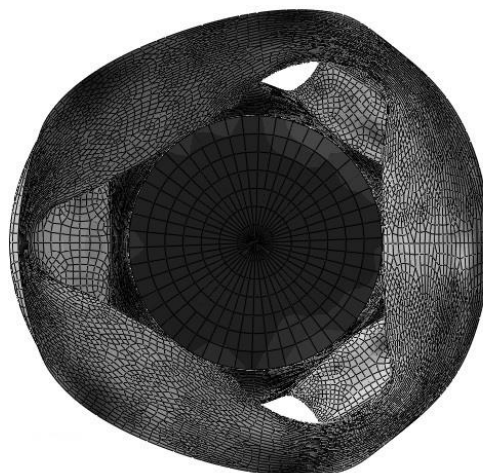


شکل (۳-۲۱): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی پوسته‌ی ۱۰۰ میلی‌متری دارای گشودگی با قطر ۲۰ میلی‌متری در ارتفاع $0.75L$ تحت بارگذاری محوری

در شکل (۳-۲۲-الف) و شکل (۳-۲۲-ب)، نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته با گشودگی به ترتیب در ارتفاع‌های $0.3L$ ، $0.5L$ نشان داده شده است.



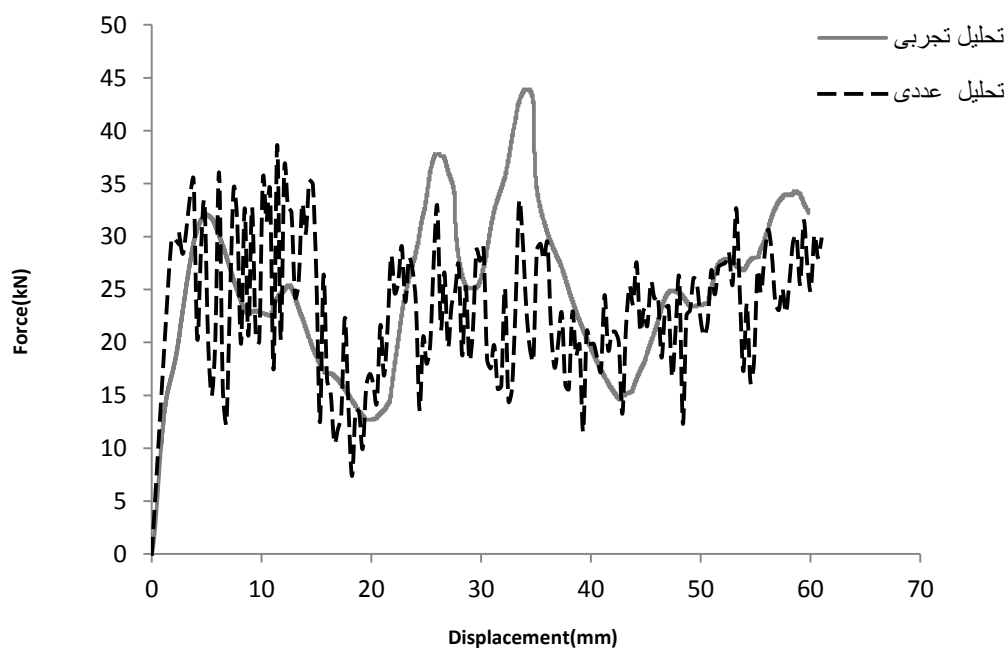
ب



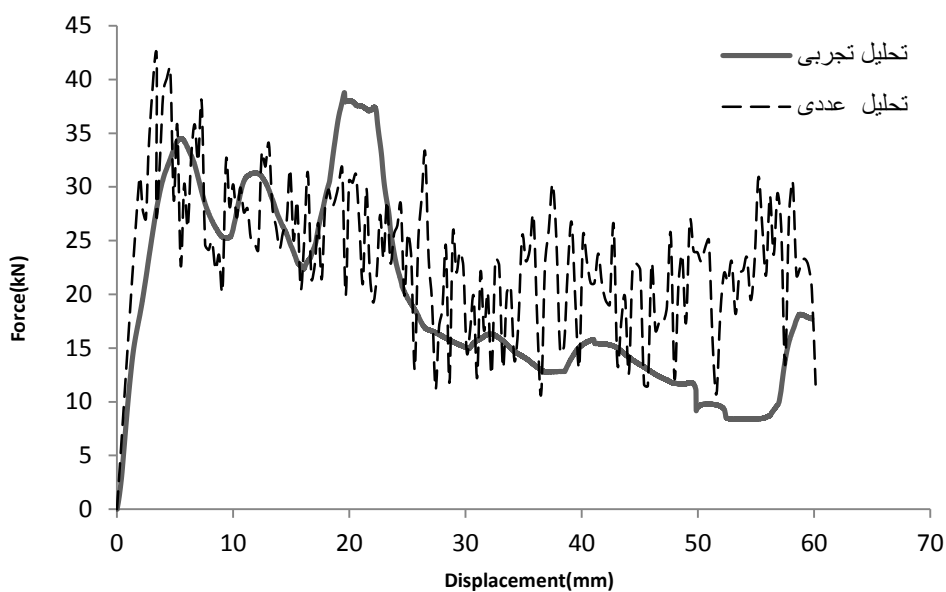
الف

شکل (۳-۲۲): الف- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع $0.3L$ - ب- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع $0.5L$

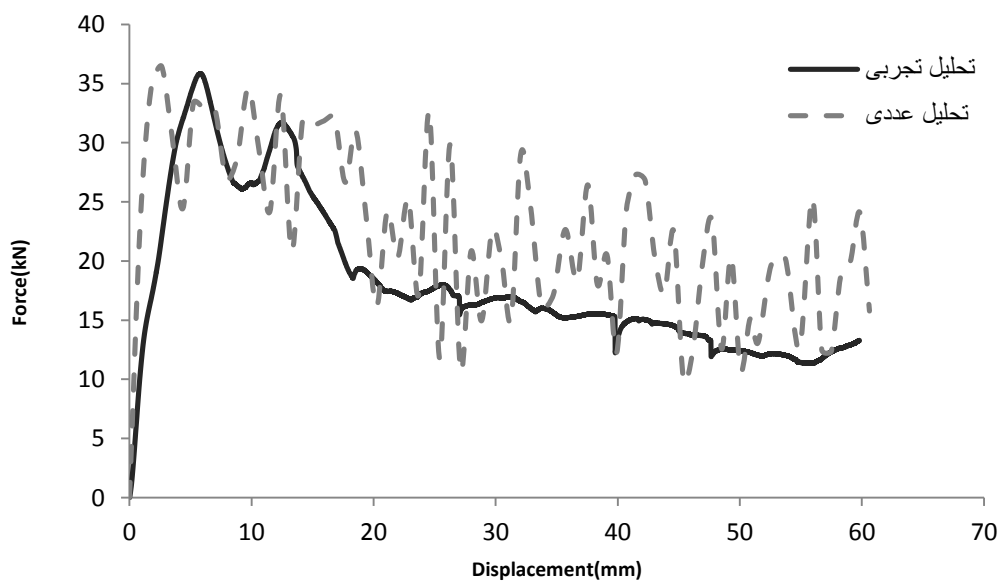
در شکل‌های (۳-۲۳)، (۳-۲۴) و (۳-۲۵)، به مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی پرداخته شده است و به ترتیب نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیل عددی و تجربی پوسته‌های دارای گشودگی در ارتفاع‌های $0.3L$ ، $0.5L$ و $0.75L$ را نشان می‌دهند.



شکل (۳-۲۳): مقایسه‌ی نموداری نیرو - جابه‌جایی تحلیل عددی و تجربی پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع $0.3L$ تحت بارگذاری محوری



شکل (۳-۲۴): مقایسه‌ی نموداری نیرو - جابه‌جایی تحلیل عددی و تجربی پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع $0.5L$ تحت بارگذاری محوری



شکل (۳-۲۵): مقایسه‌ی نموداری نیرو - جابه‌جایی تحلیل عددی و تجربی پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع $0.75L$ تحت بارگذاری محوری

جدول (۳-۹): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه دارای گشودگی در ارتفاع $0.3L$ تحت بارگذاری محوری

نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۱۴۹۱/۱	۳۲
عددی	۱۴۱۴/۶	۳۵

جدول (۳-۱۰): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع $0.5L$ تحت بارگذاری

محوری

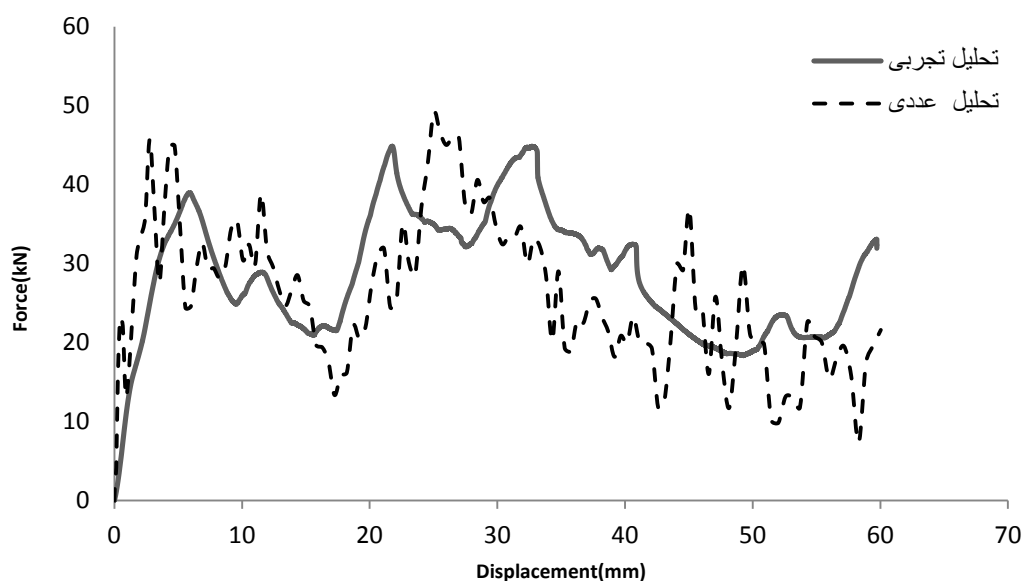
نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۱۱۶۶/۳	۳۴
عددی	۱۴۱۰	۴۰

جدول (۳-۱۱): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع $0.75L$ تحت بارگذاری

محوری

نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۱۰۹۲/۲۷	۳۶
عددی	۱۳۴۹	۳۶

مطابق جداول (۳-۹) تا (۳-۱۱)، تطابق خوب بین تحلیل عددی و تجربی نشان می‌دهد که تحلیل‌هایی که انجامشان بصورت تجربی دارای هزینه و زمان بالایی است با نرم‌افزار آباکوس می‌توان با خطای کم مدل نمود. در زیر، شکل (۳-۲۶)، به بررسی تحلیل عددی و تجربی پوسته‌ی دارای ارتفاع 100 میلی‌متر و دارای گشودگی 10 میلی‌متر در ارتفاع $0.3L$ پرداخته شده است.



شکل (۳-۲۶): مقایسه‌ی نموداری نیرو - جابه‌جایی تحلیل عددی و تجربی پوسته‌ی دارای ارتفاع 100 میلی‌متر و دارای گشودگی 10 میلی‌متر در ارتفاع $0.3L$

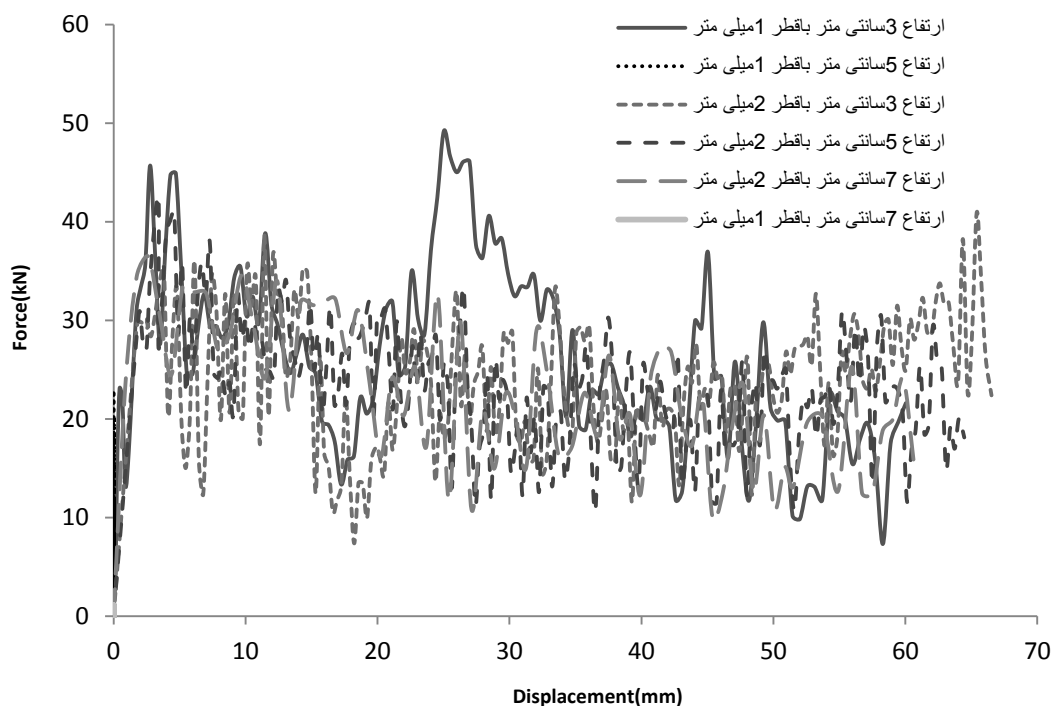
جدول (۳-۱۲): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی دارای گشودگی در ارتفاع $0.3L$ و قطر 10 میلی‌متر تحت بارگذاری محوری

نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۱۷۰۳	۴۰
عددی	۱۵۶۳	۴۲

تطابق نسبتاً خوبی بین تحلیل عددی و تجربی وجود دارد. برای بررسی بر روی تأثیر این نوع گشودگی و اثر محل قرار گرفتن آن‌ها بر روی پوسته، توسط نرم‌افزار، پوسته‌های دارای دو گشودگی به قطر 10 میلی‌متر و در ارتفاع $0.5L$ و $0.75L$ نیز بررسی شده‌اند.

در شکل (۳-۲۷)، به بررسی تحلیل عددی بر روی پوسته‌های دارای دو گشودگی به قطر 20 میلی‌متر و 10 میلی‌متر در سه ارتفاع پرداخته شده است.

بین پوسته‌های مخروطی دارای گشودگی در 0.3 ، 0.5 و 0.7 ارتفاع پوسته، پوسته‌های مخروطی دارای گشودگی در 0.3 ارتفاع پوسته، دارای جذب انرژی بیشتر و حداکثر نیروی اولیه مناسب می‌باشد. پوسته‌های مخروطی دارای گشودگی در 0.5 ارتفاع پوسته نیز دارای جذب خوبی می‌باشد که مقدار آن از پوسته‌های مخروطی دارای گشودگی در 0.3 ارتفاع پوسته کمتر بوده و حداکثر نیروی اولیه آن‌ها تقریباً برابر است.

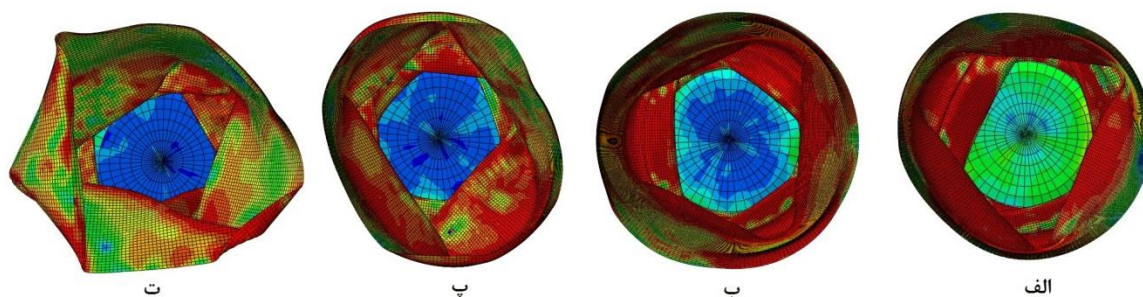


شکل (۳-۲۷): مقایسه نمودارهای نیرو - جابه‌جایی تحلیل عددی بر روی پوسته‌های دارای دو گشودگی به قطر 20 میلی‌متر و 10 میلی‌متر در سه ارتفاع

۳-۲-۶- تحلیل عددی اثر ضخامت بر روی پوسته‌ی مخروطی ناقص در

جذب انرژی

در بررسی‌های قبل، بیان شد که نتایج عددی و تجربی دارای انطباق خوبی هستند. پوسته‌های استفاده شده و موجود، دارای ضخامت یکسان هستند و برای بررسی ضخامت‌های گوناگون، می‌توان از نرم‌افزار آباکوس استفاده نمود. در این مطالعه، چهار ضخامت ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. شرایط تحلیل را یکسان و شرایط مرزی را همانند تحلیل‌های قبل در نظر می‌گیریم. در شکل (۳-۲۸-الف) تا (۳-۲۸-پ)، نتایج تحلیل‌های عددی برای ضخامت‌های ۰/۵، ۱، ۱/۵ و ۲ میلی‌متر، به ترتیب با ضخامت‌های ۰/۵ میلی‌متر، ۱ میلی‌متر، ۱/۵ میلی‌متر و ۲ میلی‌متر نشان داده شده است.

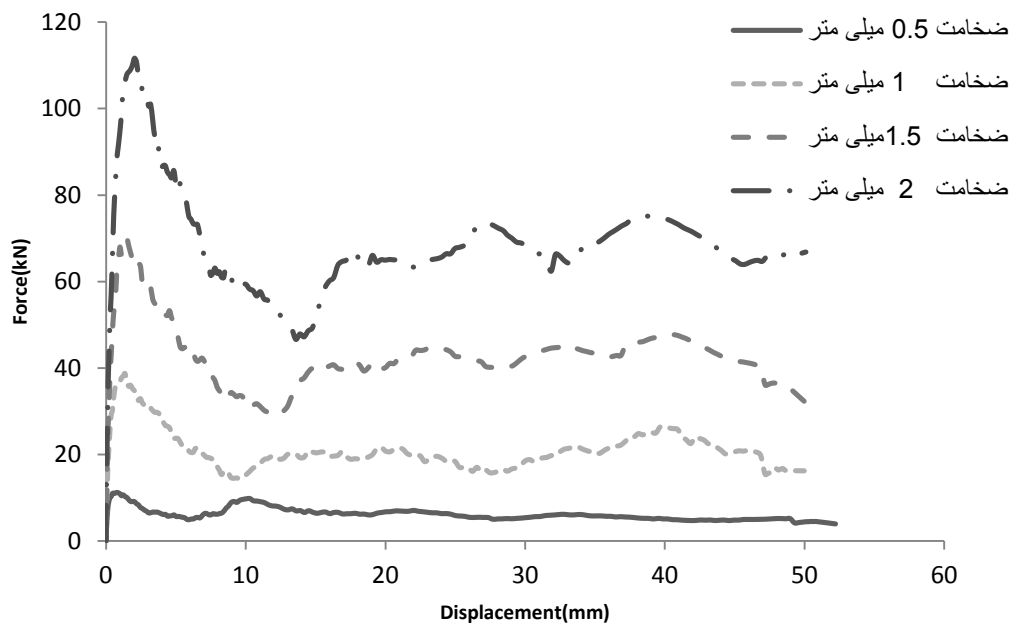


(۳-۲۸): الف- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته با ضخامت ۲ میلی‌متر. ب- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر. پ- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته با ضخامت ۱ میلی‌متر. ت- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر

در اشکال (۳-۲۸-الف)، تا (۳-۲۸-ت)، مشخص است که پوسته‌ی مخروطی با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر سرعت تغییر شکل پلاستیک داده و ظرفیت تحمل نیروی وارده را ندارد. شکل (۳-۲۹)، نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی صورت گرفته بر روی پوسته‌ها با ضخامت‌های متفاوت را نشان می‌دهد. در شکل (۳-۲۹) و جدول (۳-۱۳)، نشان داده شده است که پوسته‌ی مخروطی جدارنازک با ضخامت ۲ میلی‌متر دارای توان بالاتری نسبت به بقیه پوسته‌ها در جذب انرژی می‌باشد. اما باید توجه داشت که نیروی قله‌ی اولیه^۱ برای ضخامت ۲ میلی‌متر مقدار بالایی است و ضربه‌ی بالایی را منتقل می‌کند. بهترین ضخامت بین ۱ و ۱/۵ میلی‌متر است. که پوسته‌ی مخروطی با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر

^۱ . Initial peak force

دارای حداکثر نیروی اولیه‌ای در حدود ۲ برابر حداکثر نیروی اولیه‌ی پوسته‌ی مخروطی با ضخامت ۱ میلی‌متر می‌باشد. پس ضخامت حدود ۱ میلی‌متر، مناسب است. در پوسته‌های مخروطی با افزایش ضخامت از ۰/۵ به ۲ میلی‌متر، مساحت زیر نمودار نیرو- جابه‌جایی افزایش یافته اما به همان اندازه نیز حداکثر نیروی اولیه افزایش می‌یابد. افزایش مساحت زیر نمودار نیرو- جابه‌جایی نشان‌دهنده‌ی افزایش میزان جذب انرژی می‌باشد اما حداکثر نیروی اولیه برای پوسته‌های مخروطی با ضخامت ۲ میلی‌متر تقریباً ۳ برابر پوسته‌های مخروطی با ضخامت ۱ میلی‌متر و تقریباً ۲ برابر پوسته‌های مخروطی با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد. ضخامت ۰/۵ میلی‌متر نیز دارای جذب انرژی پایینی بوده و ظرفیت تحمل بار وارده را ندارد. بهترین ضخامت برای جذب انرژی، بین ۱ و ۱/۵ میلی‌متر می‌باشد.



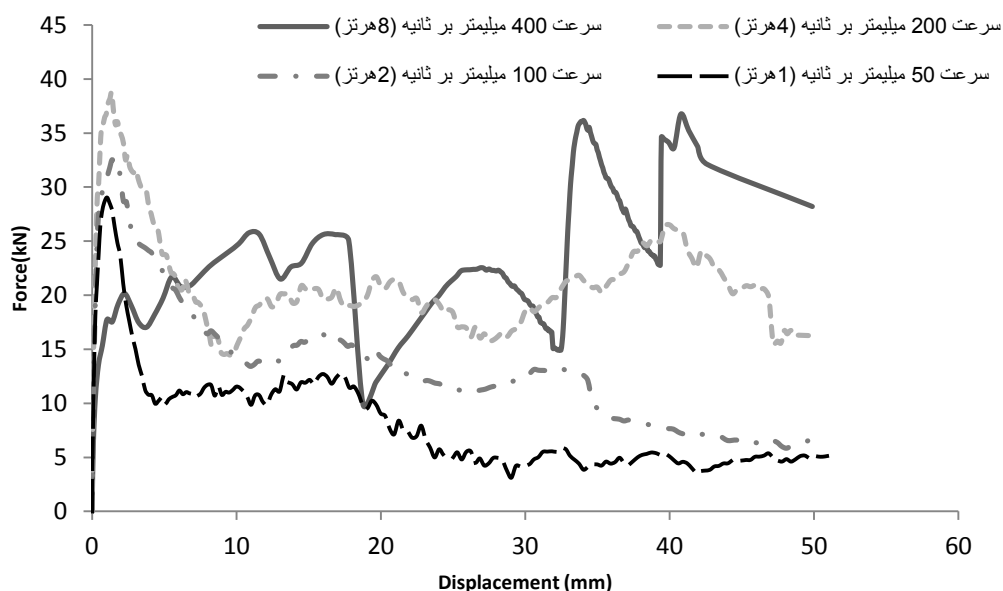
شکل (۳-۲۹): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیل عددی صورت گرفته بر روی پوسته‌ها با ضخامت‌های ۰,۵، ۱، ۱,۵ و ۲ میلی‌متر

جدول (۳-۱۳): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌های مخروطی با ضخامت‌های ۰,۵، ۱، ۱,۵ و ۲ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری

ضخامت‌ها	۰/۵	۱	۱/۵	۲
انرژی جذب شده (J)	۳۲۱/۶۲	۱۰۴۷	۲۱۲۴/۵۹	۳۴۳۱/۲۵
حداکثر نیروی اولیه (kN)	۱۰	۴۰	۷۰	۱۱۰

۷-۲-۳- بررسی تحلیلی عددی پوسته‌های دارای ضخامت یکسان ۱ میلی‌متر، تحت اثر بارگذاری محوری با سرعت‌های تغییر شکل متفاوت

تحلیل عددی بر روی پوسته‌های مخروطی ناقص، با سرعت‌های ۲۵۰ میلی‌متر بر ثانیه، ۲۵۰۰ میلی‌متر بر ثانیه، ۵۰۰۰ میلی‌متر بر ثانیه و ۱۰۰۰۰ میلی‌متر بر ثانیه انجام شده است. برای بررسی تحلیلی عددی و اثر سرعت در جذب انرژی، نمودار نیرو - جابه‌جایی که نیرو بر حسب کیلو نیوتن و جابه‌جایی بر حسب میلی‌متر است بیان شده است. شکل (۳-۳۰)، نشان‌دهنده نمودار نیرو - جابه‌جایی پوسته‌ی مخروطی ناقص تحت بارگذاری محوری در سرعت‌های متفاوت است.



شکل (۳-۳۰): نمودار نیرو - جابه‌جایی تحلیلی عددی پوسته‌های مخروطی ناقص در سرعت‌های متفاوت تحت بارگذاری محوری بصورت استاتیکی

جدول (۳-۱۴): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه‌ی پوسته‌های بر اثر سرعت‌های تغییر شکل به ترتیب، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متر بر ثانیه

سرعت (میلی‌متر بر ثانیه)	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۴۰۰
مساحت زیر نمودار (J)	۴۶۰/۹۵	۷۰۵/۹۱	۱۰۴۶/۸۲	۱۱۸۵/۱۱
حداکثر نیروی اولیه (kN)	۳۲	۲۸	۳۸	۲۰

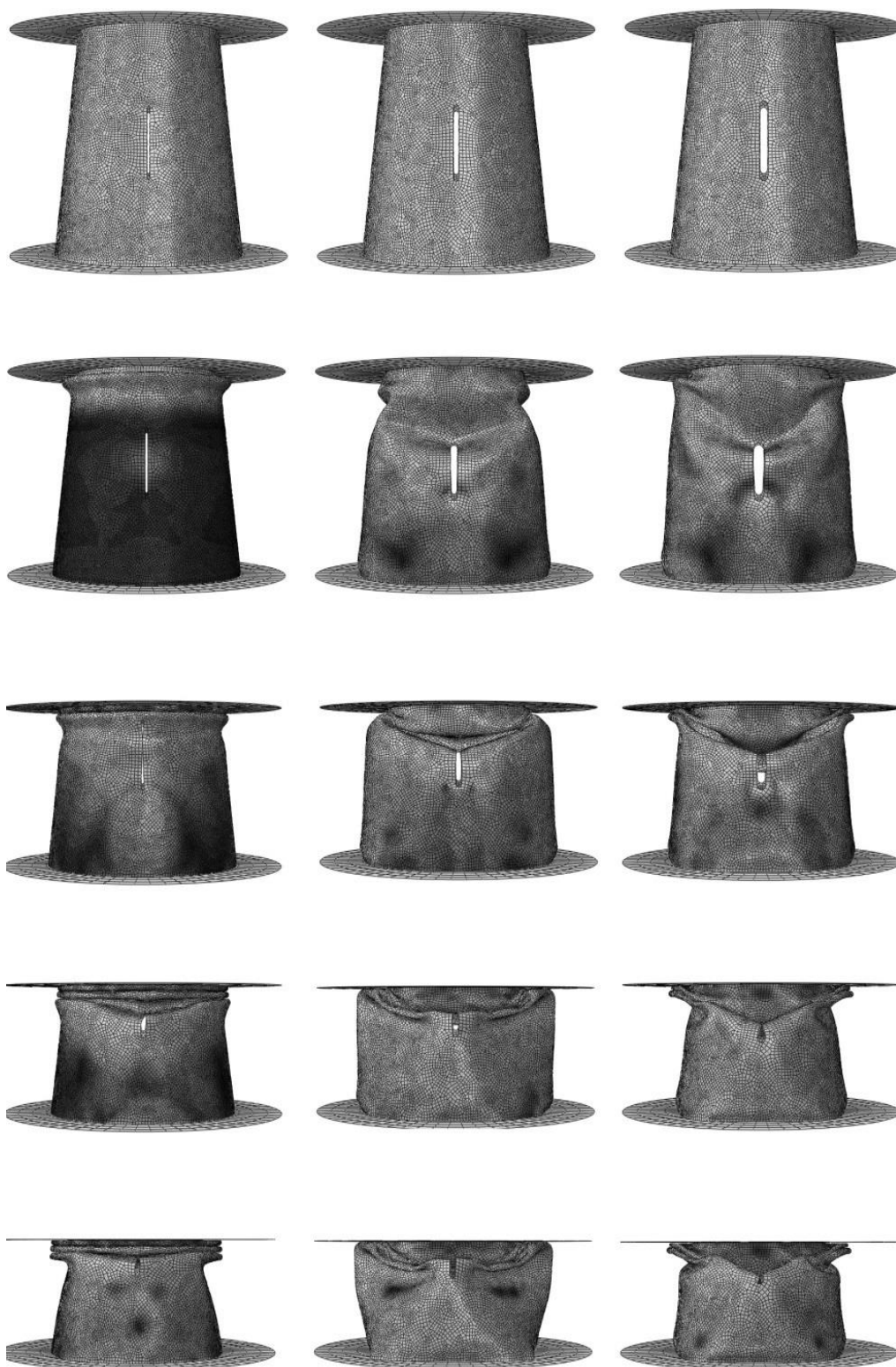
در شکل (۳-۳۰) و جدول (۳-۱۴)، نشان داده شده است که در سرعت‌های ۱۰۰ و ۲۰۰ میلی-متر بر ثانیه، پوسته ضربات شدیدتری را منتقل می‌کند و در سرعت ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه دارای جذب انرژی بسیار پایین می‌باشد، اما سرعت ۴۰۰ میلی‌متر بر ثانیه دارای میزان جذب انرژی بالاتر و حداکثر نیروی پایین‌تری است و بهینه‌ترین حالت محسوب می‌گردد. در سرعت ۴۰۰ میلی‌متر بر ثانیه پوسته دارای نوساناتی می‌باشد که به علت جذب انرژی بالا و حداکثر نیروی اولیه‌ی پایین قابل صرف‌نظر کردن است.

۳-۲-۸- تحلیل عددی اثر اندازه‌ی عرض شیار بر روی پوسته‌ی مخروطی

ناقص و اثر آن در جذب انرژی

مطابق شکل‌های (۳-۳۱ الف)، (۳-۳۱ ب) و (۳-۳۱ ج)، به ترتیب پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار به عرض‌های، به ترتیب ۳ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و ۱ میلی‌متر، مورد آزمایش قرار گرفته است.

پس از انجام آزمایش‌های عددی و تجربی، نمودارهای خروجی نیرو- جابه‌جایی رسم شده و میزان جذب انرژی پوسته‌ها ناشی از شروع کننده‌ها بررسی شده است. شکل (۳-۳۲)، به مقایسه‌ی نمودارهای حاصل از تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر پرداخته است. شکل (۳-۳۳)، به مقایسه‌ی نمودارهای حاصل از تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۲ میلی‌متر پرداخته است. شکل (۳-۳۴)، به مقایسه‌ی نمودارهای حاصل از تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۳ میلی‌متر پرداخته است.

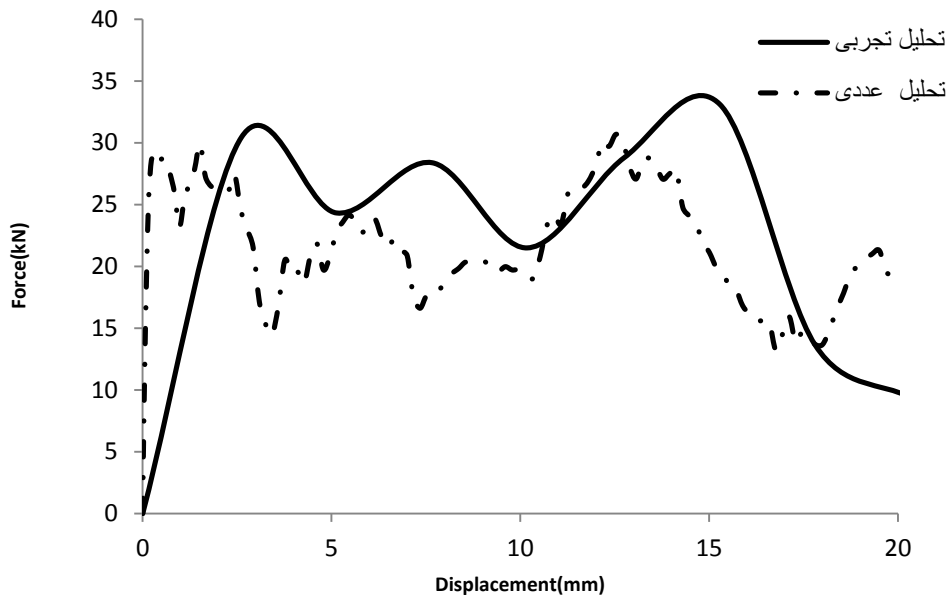


ج

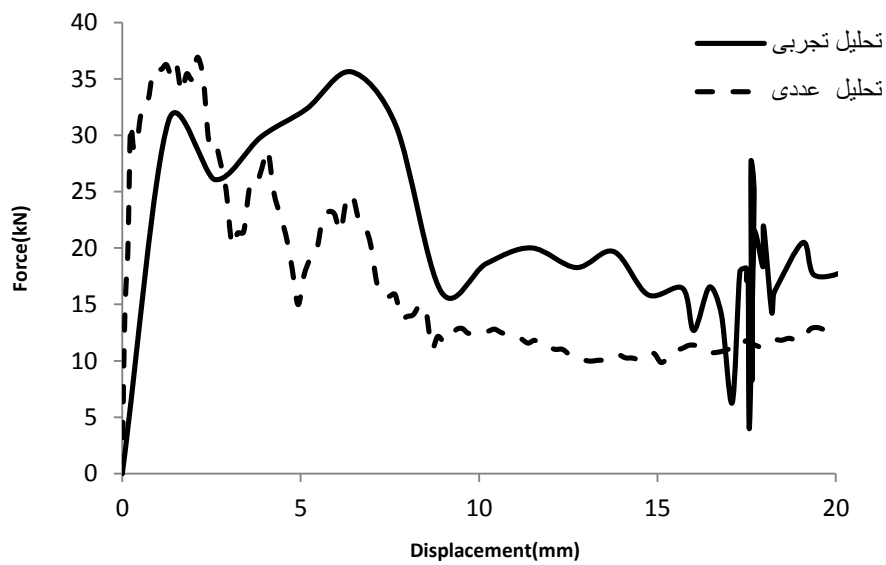
ب

الف

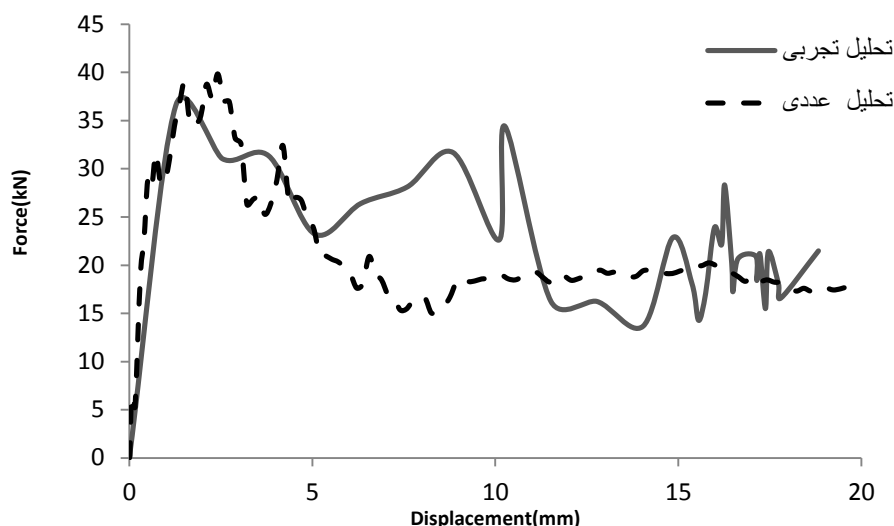
شکل (۳-۳۱): الف- پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار به عرض ۳ میلی‌متر، ب- پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار به عرض ۲ میلی‌متر، ج- پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار به عرض ۱ میلی‌متر



شکل (۳-۳۲)، نمودار نیرو - جابه‌جایی مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر



شکل (۳-۳۳): نمودار نیرو - جابه‌جایی مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۲ میلی‌متر



شکل (۳-۳۴): نمودار نیرو - جابه‌جایی مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۳ میلی‌متر

در جداول (۳-۱۵)، (۳-۱۶) و (۳-۱۷)، نشان داده شده است که نتایج عددی و تجربی دارای تطابق نسبتاً خوبی هستند.

جدول (۳-۱۵): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری

نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۴۶۹/۲۸	۳۲
عددی	۴۵۰/۵	۳۰

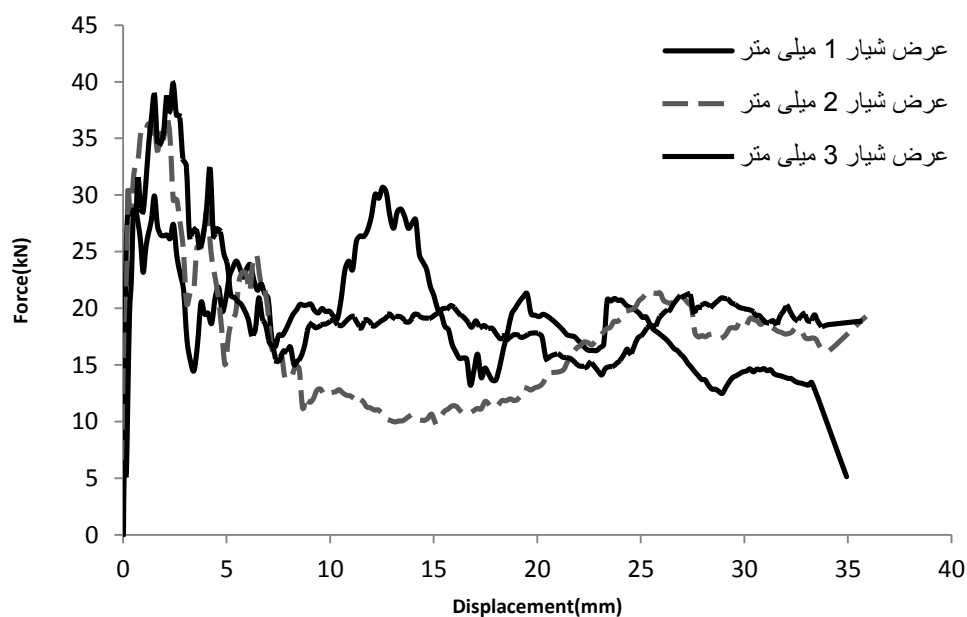
جدول (۳-۱۶): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۲ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری

نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۴۴۴	۳۰
عددی	۳۵۵	۳۸

جدول (۳-۱۷): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۳ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری

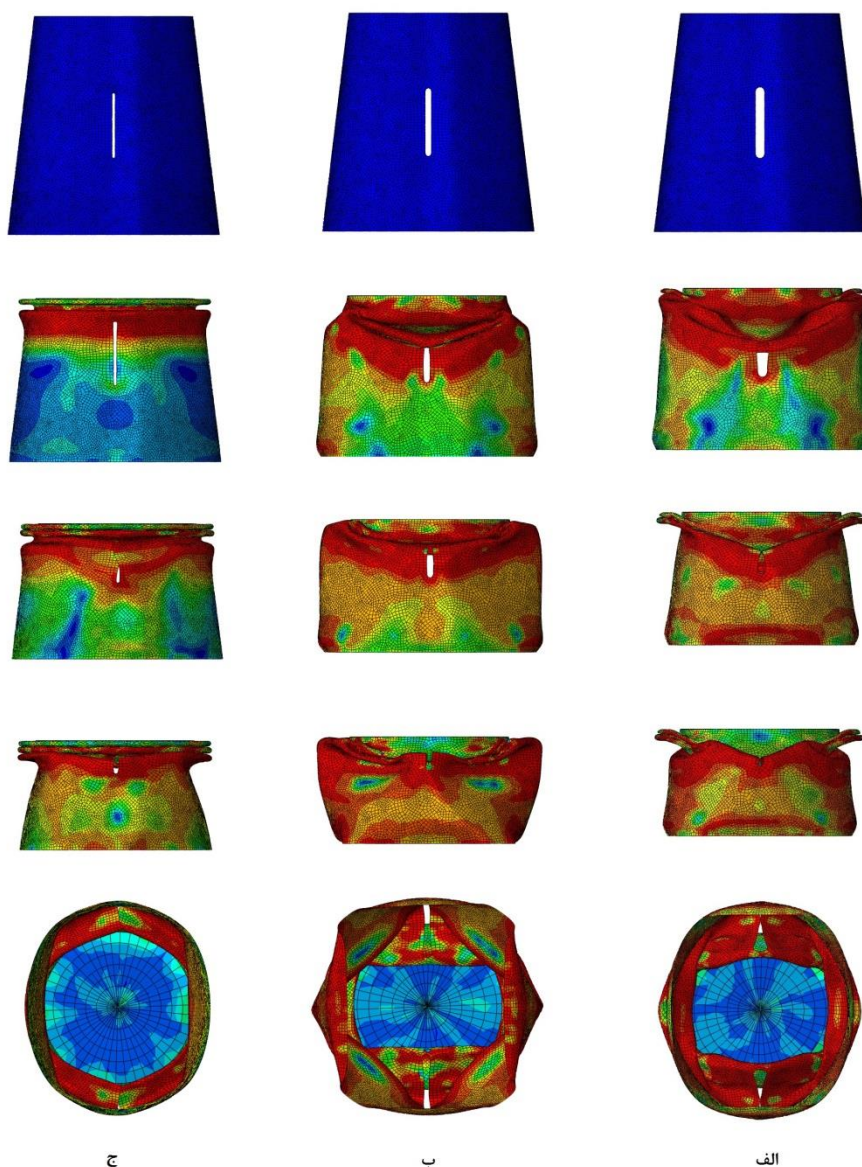
نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۴۴۰	۳۸
عددی	۴۲۶/۲۵	۳۸

شکل (۳-۳۵)، به مقایسه‌ی تحلیل عددی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر پرداخته است.



شکل (۳-۳۵): نمودار نیرو - جابه‌جایی مقایسه‌ی تحلیل عددی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر

از شکل (۳-۳۵) و جداول (۳-۱۵)، (۳-۱۶) و (۳-۱۷)، مشخص است که شیار با زاویه‌ی صفر درجه و عرض‌های شیار ۳ میلی‌متر، دارای ضربه‌ی بسیار بالایی است و همچنین دارای توانایی بالاتری نیز در جذب انرژی نمی‌باشد. مشخص است که شیار با عرض ۱ میلی‌متر دارای بالاترین جذب انرژی و کمترین حداکثر نیروی اولیه می‌باشد. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که شیارهای دارای ضخامت ۲ میلی‌متر و ۳ میلی‌متر دارای میزان جذب انرژی کم و مقدار قلّه‌ی اولیه‌ی بالایی هستند و بهترین ضخامت که مقدار جذب انرژی را نیز بالا می‌برد ضخامت ۱ میلی‌متر است. نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته دارای شیارهای متقارن در وسط بصورت زیر است. شکل‌های (۳-۳۶-الف)، (۳-۳۶-ب)، و (۳-۳۶-ج)، پوسته‌ی مخروطی ناقص به ترتیب دارای شیار به ضخامت ۳ میلی‌متر، ۲ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر را نشان می‌دهند.

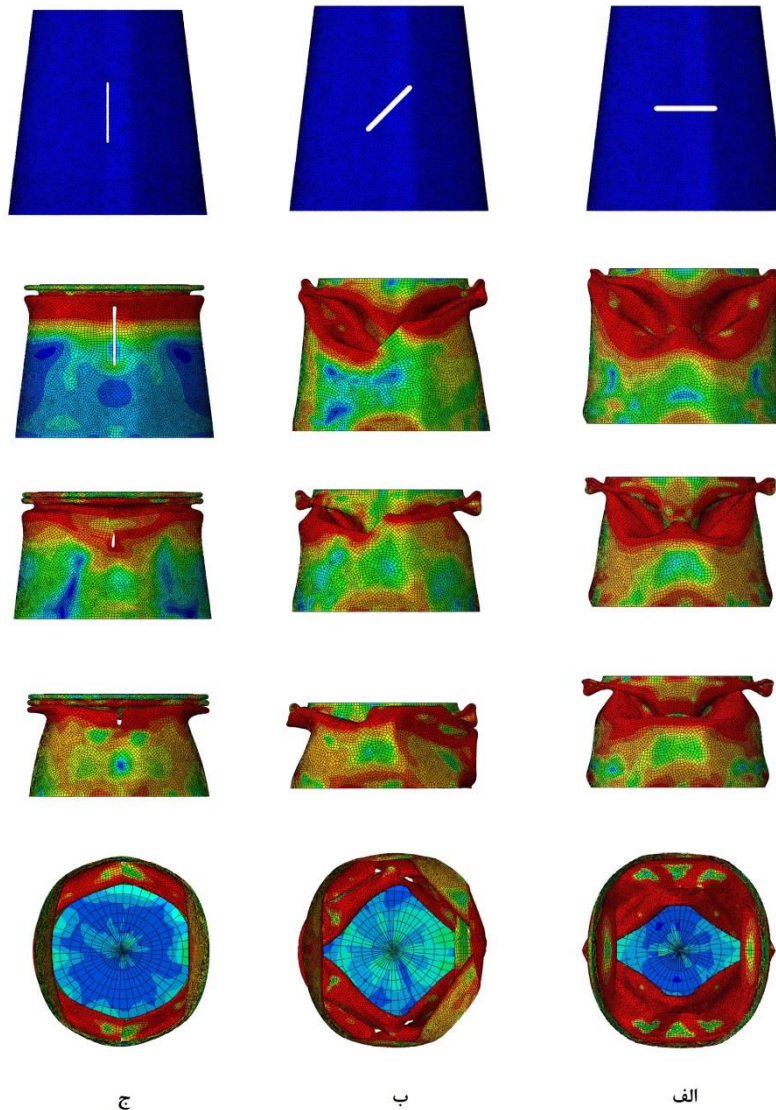


شکل (۳-۳۶): الف- پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار به عرض ۳ میلی‌متر، ب- پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار به عرض ۲ میلی‌متر، ج- پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار به عرض ۱ میلی‌متر

۳-۲-۹- تحلیل عددی اثر زاویه‌ی شیار بر روی میزان جذب انرژی

پس از بررسی ضخامت شیار، مشخص شد بهترین ضخامت برای شیار متقارن ۱ میلی‌متر است. زاویه‌ی شیار می‌تواند فاکتور مهمی در کم یا زیاد شدن جذب انرژی توسط پوسته باشد. برای بررسی آن ضخامت شیار را ۱ میلی‌متر در نظر گرفته و پوسته دارای شیار با سه زاویه شیار، ۰ درجه، ۴۵ درجه و ۹۰ درجه، با آباکوس تحلیل شده است. در شکل‌های زیر نحوه‌ی قرارگیری شیار با زاویه‌های

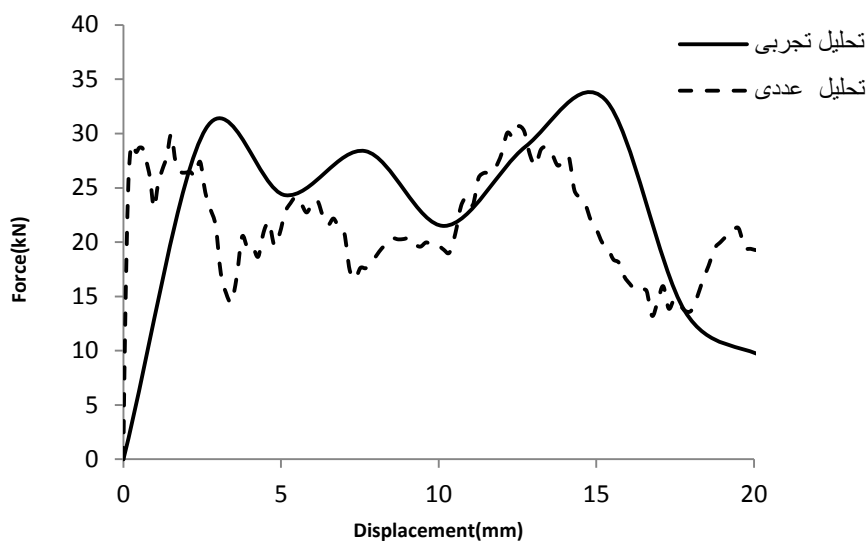
مختلف مشخص شده است. در شکل‌های (۳-۳۷-الف)، (۳-۳۷-ب) و (۳-۳۷-ج)، پوسته‌های جدارنازک به ترتیب با زاویه‌های شیارهای صفر درجه، ۴۵ درجه و ۹۰ درجه نشان داده شده است.



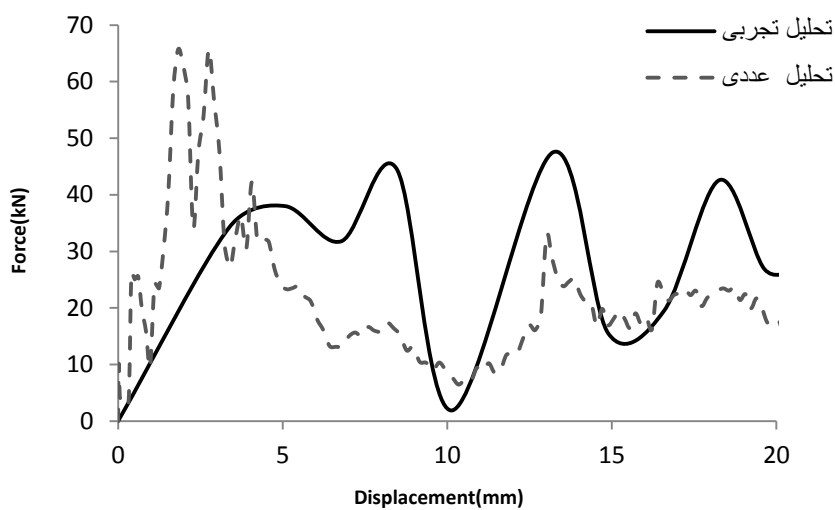
شکل (۳-۳۷): الف- پوسته‌ی جدارنازک با زاویه‌ی شیار ۰ درجه (عمودی)، ب- پوسته‌ی جدارنازک با زاویه‌ی شیار ۴۵ درجه، ج- پوسته‌ی جدارنازک با زاویه‌ی شیار ۹۰ درجه (افقی)

پس از انجام تحلیل‌های عددی و تجربی، نمودارهای خروجی نیرو-جابجایی رسم شده و میزان توانایی جذب انرژی پوسته‌ها ناشی از شروع کننده‌ها بررسی شده است. شکل‌های (۳-۳۸)، شکل (۳-۳۹) و (۳-۴۰)، نمودارهای نیرو-جابجایی تحلیل عددی و تجربی به ترتیب برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر، پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی ۴۵ درجه و

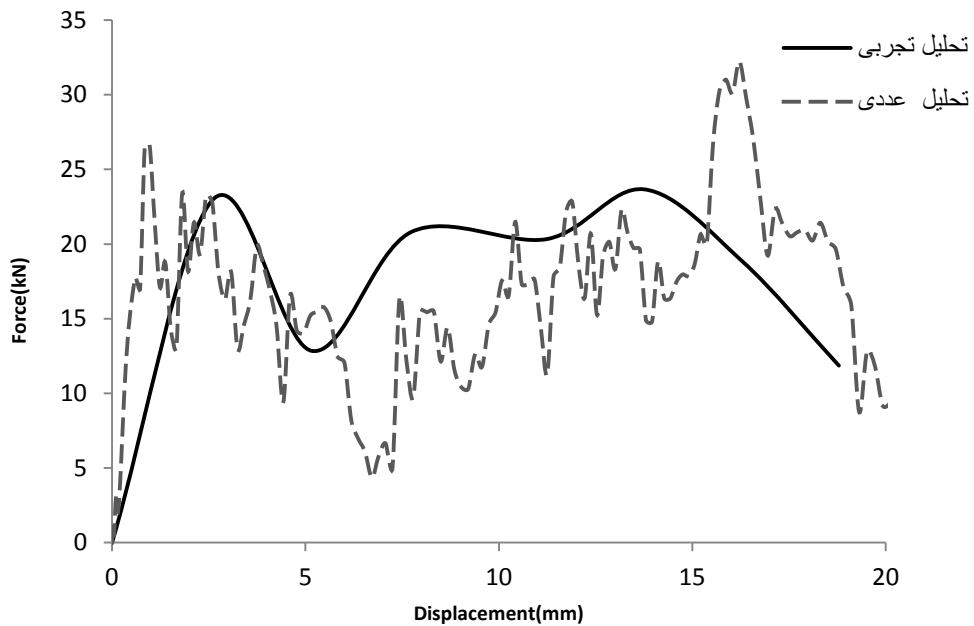
عرض شیار ۱ میلیمتر، پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی ۹۰ درجه و عرض شیار ۱ میلیمتر را نشان می‌دهند.



شکل (۳-۳۸): نمودار نیرو - جابه‌جایی مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۱ میلیمتر



شکل (۳-۳۹): نمودار نیرو - جابه‌جایی مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی ۴۵ درجه و عرض شیار ۱ میلیمتر



شکل (۳-۴۰): نمودار نیرو - جابه‌جایی مقایسه‌ی تحلیل عددی و تجربی برای پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی ۹۰ درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر

جدول (۳-۱۸): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی صفر درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر

نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۴۶۹/۲۸	۳۲
عددی	۴۵۰/۵	۳۰

جدول (۳-۱۹): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی ۴۵ درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر

نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۵۶۴/۴۷	۶۵
عددی	۴۵۱/۲۵	۴۰

جدول (۳-۲۰): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌ی مخروطی ناقص دارای شیار در دو طرف پوسته در وسط با زاویه‌ی ۹۰ درجه و عرض شیار ۱ میلی‌متر

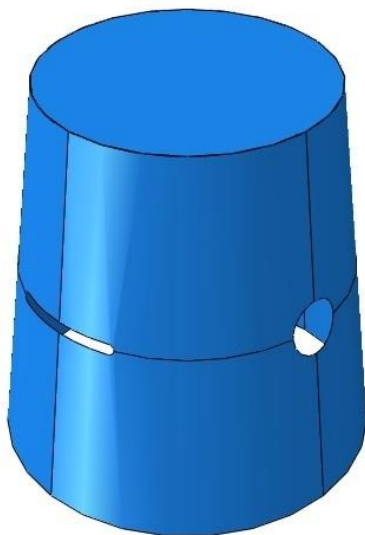
نوع تحلیل	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
تجربی	۳۳۸/۹۰	۲۴
عددی	۳۴۸/۵	۲۶

بر اساس شکل (۳۸-۳)، شکل (۳۹-۳) و شکل (۴۰-۳) و جداول (۱۸-۳)، (۱۹-۳) و (۲۰-۳)، کاملاً مشخص است که شیار دارای زاویه‌ی ۴۵ درجه، بدترین حالت ممکن را دارا می‌باشد زیرا علاوه بر داشتن حداکثر نیروی اولیه‌ی بسیار بالا، توانایی جذب نیرو را نیز ندارد. اما شیارهای صفر و ۹۰ درجه شرایط بهتری را دارند. مساحت زیر نمودار شیار با زاویه‌ی صفر درجه بیشتر بوده و دارای نوسانات کمتر و حداکثر نیروی اولیه‌ی کمی نیز می‌باشد.

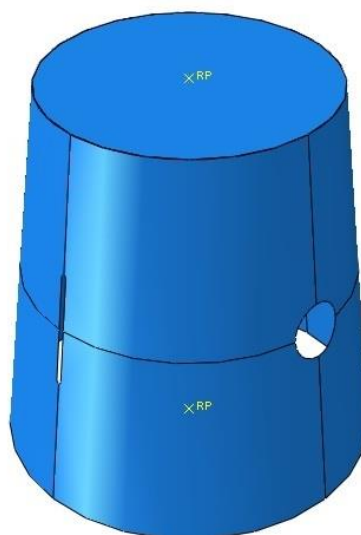
۳-۲-۱۰- بررسی تحلیل عددی پوسته‌ی مخروطی جدارنازک با وجود

گشودگی و شیار

در اینجا قصد بر این است که بهترین حالت جذب انرژی برای پوسته بیان گردد. بر این اساس دو نوع گشودگی متفاوت که هر کدام به تنهایی دارای قابلیت جذب انرژی خوبی بوده‌اند را با هم بر روی یک پوسته اعمال و شرایط آن‌ها با هم مقایسه می‌شود. در شکل‌های (۳-۴۱-الف)، (۳-۴۱-ب)، به ترتیب پوسته‌ی مخروطی جدارنازک دارای یک گشودگی به قطر ۱۰ میلی‌متر و شیار به عرض ۱ میلی‌متر با زاویه‌ی صفر درجه و پوسته‌ی مخروطی جدارنازک دارای یک گشودگی به قطر ۱۰ میلی‌متر و شیار به عرض ۱ میلی‌متر با زاویه‌ی ۹۰ درجه نشان داده شده است. شکل (۳-۴۲)، نتیجه‌ی تحلیل صورت گرفته بر روی این دو نوع پوسته را نشان می‌دهد.

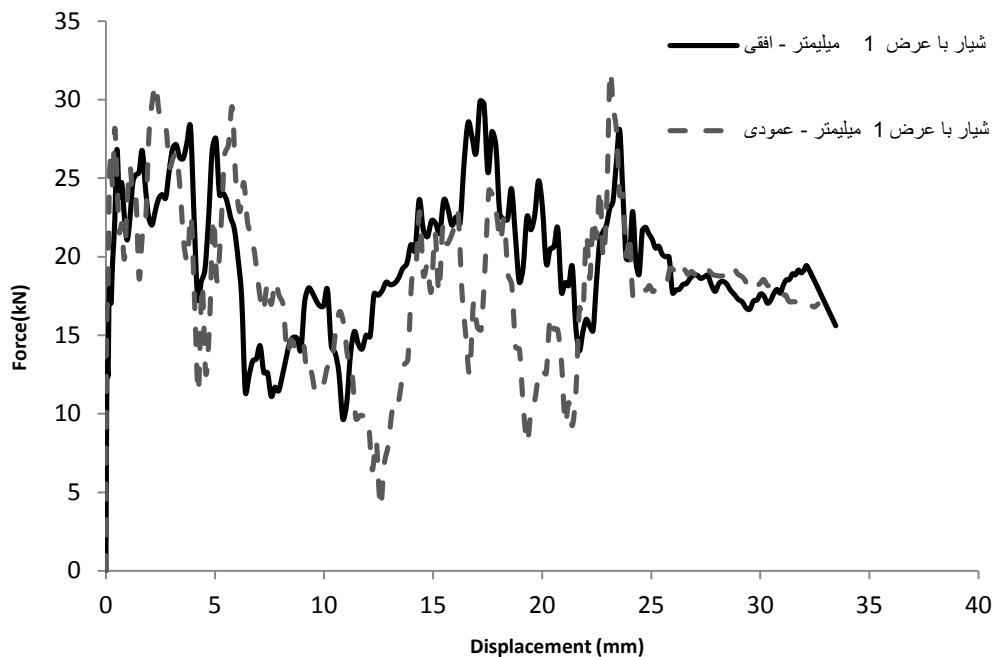


ب



الف

شکل (۳-۴۱): الف- پوسته‌ی مخروطی دارای یک گشودگی به قطر ۱۰ میلی‌متر و شیار به عرض ۱ میلی‌متر با زاویه‌ی صفر درجه، ب- پوسته‌ی مخروطی دارای یک گشودگی به قطر ۱۰ میلی‌متر و شیار به عرض ۱ میلی‌متر با زاویه‌ی ۹۰ درجه



شکل (۳-۴۲): نمودار نیرو - جابه‌جایی، تحلیل عددی پوسته‌های جدارنازک دارای قطر گشودگی یکسان ۱۰ میلی‌متر و شیار به عرض ۱ میلی‌متر و زاویه‌ی ۰ و ۹۰ بر اساس نمودار نیرو- جابه‌جایی شکل (۳-۴۲) و جدول (۳-۲۱)، پوسته دارای شیار به ضخامت ۱ میلی‌متر و با زاویه‌ی ۹۰ درجه دارای میزان جذب انرژی بهتر و مساحت زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی بیشتری است.

جدول (۳-۲۱): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه پوسته‌های جدارنازک دارای قطر گشودگی یکسان ۱۰ میلی‌متر و شیار به عرض ۱ میلی‌متر و زاویه‌ی ۰ و ۹۰

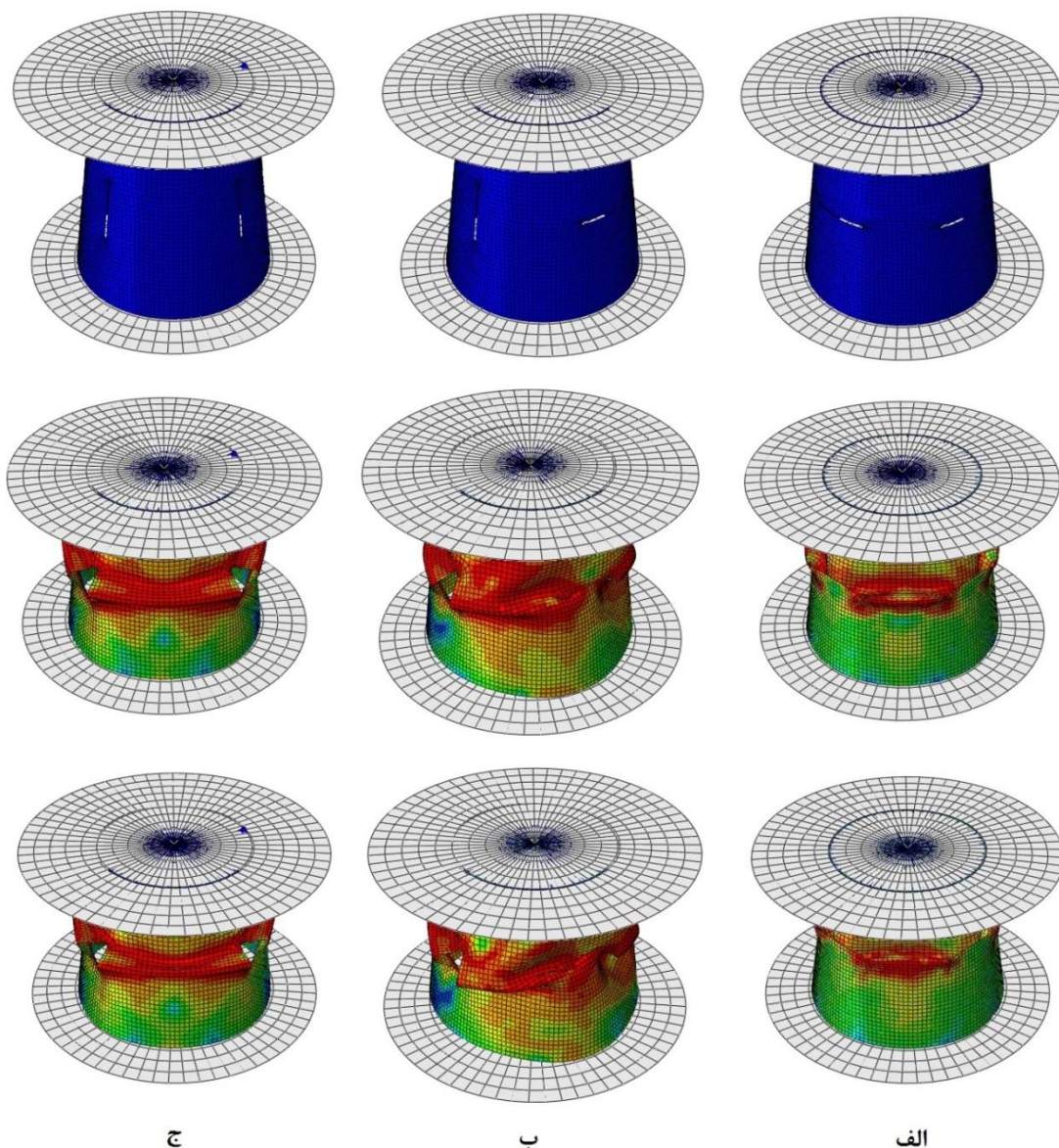
زاویه‌ی شیار	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
۰ درجه (عمودی)	۵۸۶/۱۶	۲۷
۹۰ درجه (افقی)	۶۵۸/۸۴	۲۸

پوسته‌های مخروطی دارای شیار در وسط پوسته با عرض شیار ۱ میلی‌متر و زاویه‌ی شیار ۹۰ درجه (افقی) و گشودگی با قطر ۱۰ میلی‌متر دارای میزان جذب انرژی بیشتر از پوسته‌های مخروطی دارای شیار در وسط پوسته با عرض شیار ۱ میلی‌متر و زاویه‌ی شیار صفر درجه (عمودی) و گشودگی با قطر ۱۰ میلی‌متر می‌باشد. در پوسته‌های مخروطی دارای شیار در وسط پوسته با عرض شیار ۱ میلی‌متر و زاویه‌ی شیار ۹۰ درجه (افقی) و گشودگی با قطر ۱۰ میلی‌متر، حداکثر نیروی اولیه کاهش می‌یابد.

۳-۲-۱۱- تحلیل عددی، اثر زاویه‌ی شیارها بصورت دو به دو و متقارن

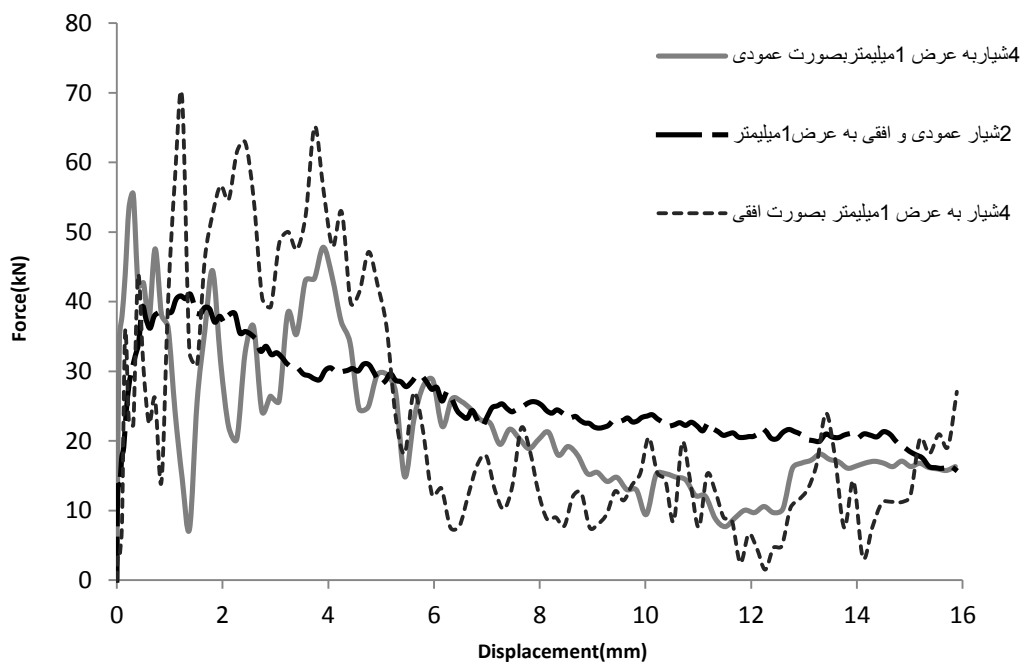
برروی جذب انرژی

قصد بر آن است تا تاثیر شیارهای متقارن در چهار طرف پوسته، و اثر آن‌ها در میزان جذب انرژی بررسی شود و بهترین حالت در جذب انرژی و کاهش حداکثر نیروی اولیه بیان گردد. بر این اساس، سه نوع تحلیل صورت گرفته است. شکل‌های (۳-۴۳-الف)، (۳-۴۳-ب) و (۳-۴۳-ج)، به ترتیب پوسته‌ی مخروطی دارای ۴ شیار متقارن با زاویه‌ی صفر درجه، پوسته‌ی مخروطی دارای ۲ شیار متقارن با زاویه‌ی ۹۰ درجه و ۲ شیار متقارن با زاویه‌ی ۹۰ درجه و پوسته‌ی مخروطی دارای ۲ شیار متقارن با زاویه‌ی صفر درجه و ۲ شیار متقارن با زاویه‌ی ۹۰ درجه را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴۳): الف- پوسته‌ی مخروطی دارای ۴ شیار متقارن با زاویه‌ی صفر درجه، ب- پوسته‌ی مخروطی دارای ۲ شیار متقارن با زاویه‌ی صفر درجه و ۲ شیار متقارن با زاویه‌ی ۹۰ درجه، ج- پوسته‌ی مخروطی دارای ۲ شیار متقارن با زاویه‌ی صفر درجه و ۲ شیار متقارن با زاویه‌ی ۹۰ درجه

شکل (۳-۴۴)، به مقایسه‌ی نمودار این سه پوسته پرداخته و نشان می‌دهد که پوسته دارای چهار شیار به ضخامت ۱ میلی‌متر و زاویه‌ی صفر درجه دارای جذب انرژی بالاتر و نیروی اولیه‌ی منتقل شده‌ی کمتری است.

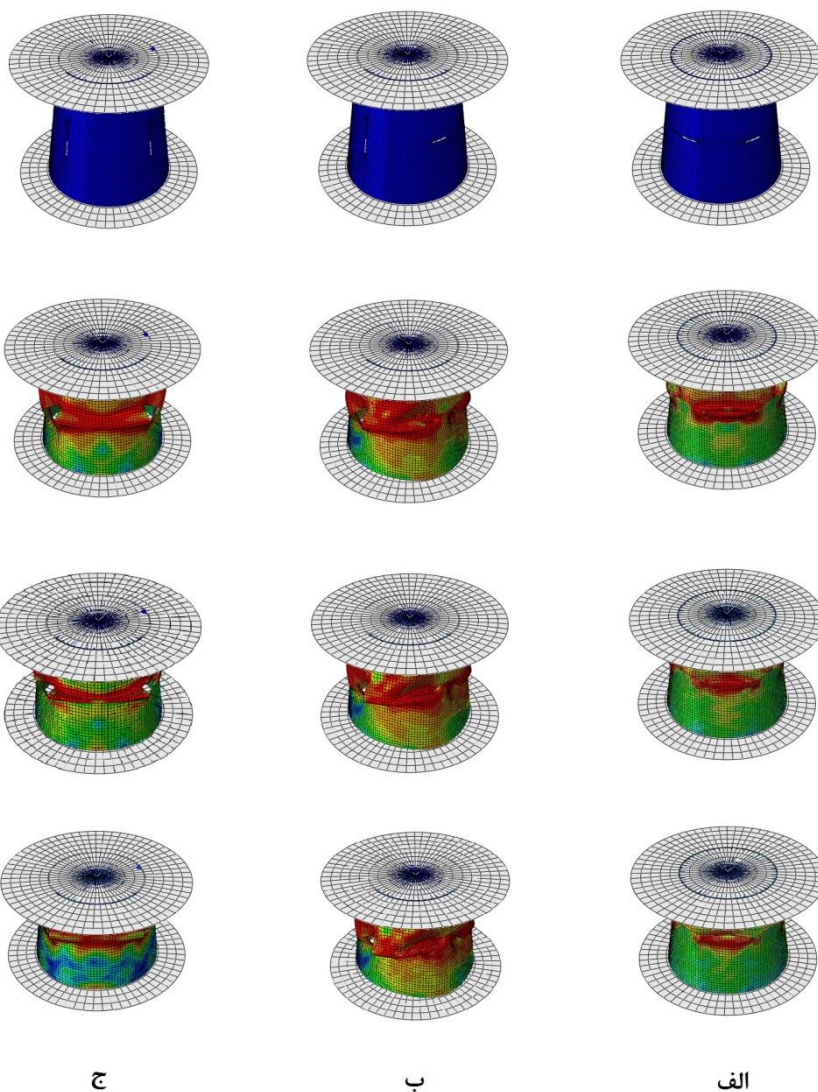


شکل (۳-۴۴): مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی، پوسته‌های مخروطی جدارنازک با زاویه شیارهای بصورت دو به دو و متقارن

شکل (۳-۴۵-الف) و شکل (۳-۴۵-ب) و شکل (۳-۴۵-ج)، به ترتیب نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌های جدار نازک، دارای شیار به ترتیب با زاویه‌های افقی، عمودی، افقی و عمودی (۰ و ۹۰ درجه) را نشان می‌دهد. جدول (۳-۲۲)، مساحت زیر نمودار و حداکثر نیروی اولیه جمع‌شدگی پوسته‌های جدار نازک، دارای شیار به ترتیب با زاویه‌های افقی، عمودی، افقی و عمودی (۰ و ۹۰ درجه) را نشان می‌دهد. براساس نمودار نیرو- جابه‌جایی شکل (۳-۴۴) و جدول (۳-۲۲)، مشخص می‌شود که پوسته‌ی مخروطی دارای ۴ شیار عمودی دارای بیشترین جذب انرژی نسبت به دو حالت دیگر بوده و همچنین دارای حداکثر نیروی مناسبی می‌باشد. پوسته‌ی مخروطی جدارنازک با ۴ شیار افقی دارای جذب انرژی پایین و حداکثر نیروی اولیه‌ی بالایی است. همچنین دارای نوسانات بسیار شدید بوده و نیروی بالایی را به سرنشینان وارد می‌کند.

جدول (۳-۲۲): انرژی جذب شده و حداکثر نیروی اولیه جمع‌شدگی پوسته‌های جدار نازک، دارای شیار به ترتیب با زاویه‌های افقی، عمودی، افقی و عمودی (۰ و ۹۰ درجه)

زاویه‌های اولیه	انرژی جذب شده (J)	حداکثر نیروی اولیه (kN)
زاویه‌های عمودی	۷۴۴/۵۲	۵۵
زاویه‌های افقی و عمودی	۴۲۸/۲۷	۴۰
زاویه‌های افقی	۴۳۷/۷۵	۴۵



شکل (۳-۴۵): الف- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی جدار نازک دارای شیار به ترتیب با زاویه‌های افقی، ب- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی جدار نازک دارای شیار به ترتیب با زاویه‌های عمودی، ج- نحوه‌ی جمع‌شدگی پوسته‌ی جدار نازک دارای شیار به ترتیب با زاویه‌های افقی- عمودی

فصل چهارم
نتیجه‌گیری
و پیشنهادها

۴-۱- نتایج

پس از انجام تحقیق بر روی پوسته‌های جدار نازک مخروطی از جنس فولاد ضد زنگ SS304 و انجام تحلیل‌های عددی و تجربی بر روی تأثیر شروع‌کننده‌ها بر رفتار نیرو-جابجایی، پارامترهای سرعت، ضخامت پوسته و غیره، نتایج زیر حاصل گردیده است:

۱. همواره بکار بردن شروع‌کننده‌ها، دلیل بر افزایش بازدهی جذب انرژی نخواهد بود و گاه با تضعیف بیش از حد قابلیت جذب انرژی آن‌ها کاهش می‌یابد.
۲. بکار بردن ترک و شیار باعث کاهش نیروی قله‌ی اولیه‌ی بار و افزایش جذب انرژی خواهد شد. اما شیار با عرض بالاتر از ۲ میلی‌متر از میزان جذب انرژی وارده می‌کاهد.
۳. بکار بردن گشودگی دایروی^۱ باعث افزایش میزان جذب انرژی می‌گردد. بهترین قطر برای گشودگی‌ها ۱۰ میلی‌متر است.
۴. بهتر است، شروع‌کننده‌ها، طوری در جسم قرار گیرند که باعث جمع‌شدگی متقارن گردد. تغییر شکل منظم (متقارن) باعث افزایش جذب انرژی می‌گردد.
۵. قسمت پایین پوسته‌ها، تا حد امکان نباید به صفحه‌ی زیرین خود ثابت گردند. به عبارتی نباید درجات آزادی گره‌ها^۲ محدود گردد. زیرا محدود کردن گره‌ها باعث افزایش حداکثر نیروی اولیه می‌گردد.
۶. طبق بررسی‌های صورت گرفته، بهترین ضریب اصطکاک حدود ۰/۳ تا ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. [۵۲]
۷. یکی از مزایای این نمونه‌ها، حجم کم آن‌هاست. اما از نظر توانایی تحمل نیروهای وارده و تغییرشکل پلاستیک، طبق مطالعه‌های صورت گرفته در این پایان‌نامه، بهترین ارتفاع حدود، ۷ سانتی‌متر تا ۱۰ سانتی‌متر است. ارتفاع زیاد، باعث عامل ناخواسته‌ی کمانش پوسته خواهد شد.
۸. ضخامت عاملی مهم در نوع جمع‌شدگی و درصد کاهش نیروی وارده است. لزوماً افزایش ضخامت، توانایی قطعه را برای جذب، بالا نمی‌برد. اولاً ضخامت بیشتر، جسم را از حالت جدار نازک به جدار ضخیم تبدیل می‌کند. ثانیاً نیروی اولیه‌ی ضربه را بیشتر منتقل می‌کند که به عبارتی باعث تخریب می‌شود. پس از بررسی‌های صورت گرفته بصورت عددی بهترین ضخامت حدود ۰/۹ تا ۱ میلی‌متر می‌باشد.
۹. مشخص است که پوسته‌ی مخروطی از جنس فولاد با شیار با زاویه‌ی ۹۰ درجه دارای میزان انرژی جذب شده‌ی بیشتری نسبت به پوسته‌ی مخروطی با شیار به زاویه‌ی صفر و ۴۵ درجه می‌باشد.

^۱ . Circular notch

^۲ . Nodes

۱۰. عاملی که مسلماً جایگاه خاصی دارد. مکان قرارگیری گشودگی‌ها، ترک‌ها، شیارها و... می‌باشد. طبق بررسی‌های صورت گرفته، بهترین مکان برای گشودگی‌ها وسط پوسته می‌باشد.
۱۱. در تحلیل‌های عددی، عوامل بسیاری وجود دارند که اثر بسزایی بر روی جواب‌های مسأله دارند. اولین عامل، اندازه‌ی مش‌ریزی می‌باشد. که پس از بررسی‌های صورت گرفته، مقدار آن حدود $3/5$ میلی‌متر در نظر گرفته شد.
۱۲. استفاده از گشودگی‌ها، ترک‌ها و شیارها و... نمی‌تواند به صرف بالا بردن میزان جذب انرژی به تنهایی، استفاده از آن‌ها بطور همزمان نیز، لزوماً میزان جذب انرژی را افزایش دهد. استفاده از گشودگی با قطر 10 میلی‌متر و شیار با ضخامت یک میلی‌متر در وسط، بطور هم‌مطمئن میزان جذب انرژی را کاهش می‌دهند.
۱۳. استفاده هم‌زمان شیار، بطور متقارن در چهارگوشه وسط پوسته، باعث افزایش جذب انرژی توسط پوسته مخروطی می‌گردد. بهترین زاویه‌ی شیار برای این شیارها، زاویه‌ی صفر درجه است.
۱۴. صفحه‌ی بالایی پوسته، تأثیر زیادی در پایدار ماندن پوسته و کاهش حداکثر نیروی اولیه‌ی آن دارد. پس از بررسی‌های صورت گرفته و بصورت عددی در این مطالعه، مشخص گردید صفحه‌ی بالایی پوسته، میزان جذب انرژی را افزایش می‌دهد، پایداری و تغییرشکل پلاستیک را افزایش و نوسانات را کاهش می‌دهد [۶۴].
۱۵. محل اتصال محیط صفحه‌ی بالایی با پوسته مخروطی در حالت عددی و تجربی کمی متفاوت است. یکی از عوامل اختلاف بین جواب عددی و تجربی به میزان کم، همین نکته است. نوع پخ زدن یا گردشگی^۱ در نمونه تجربی و عددی، کمی تفاوت دارد. این تغییرشکل خاص ناشی از عملیات ساخت بوده که مقاومت قطعه را در آن ناحیه افزایش می‌دهد [۵۱].

^۱ . Fillet or Chamfer

۴-۲- پیشنهادها

در این پایان نامه سعی شده است کارهای گذشتگان بررسی، نواقص آن‌ها رفع و بطور کلی طرحی بیان شود تا سازندگان بهترین عوامل و حالت‌ها را برای اعمال بر روی قطعه بشناسند و از مزایا و معایب آن اطلاع حاصل نمایند.

موارد زیر را می‌توان مهمترین کارهایی دانست که شاید هرچه بیشتر به کاهش لطمه‌های ناشی از انرژی‌های اعمالی ناخواسته بیانجامد و هزینه‌ها را کاهش دهد:

۱- استفاده از فوم‌ها در پوسته‌ها، میزان جذب انرژی را افزایش می‌دهد. استفاده از فوم‌ها و

بررسی تأثیر شکل هندسی، جنس و میزان چسبندگی بین فوم و پوسته.

۲- استفاده از مواد پیشرفته‌ی الکترو لوجیکال^۱ و مگنتور لوجیکال^۲ برای افزایش جاذب بودن و همچنین کنترل میزان جذب و تغییر شکل الاستیک و پلاستیک.

۳- استفاده از چند پوسته‌ها بطور همزمان، برای افزایش کارایی پوسته‌ها بررسی جذب انرژی توسط پوسته‌های سری یا موازی و اثر آن بر روی افزایش جذب انرژی در هر دو حالت.

۴- استفاده از کامپوزیت‌ها که می‌توانند برای کاربردی خاص طراحی شوند. بررسی تأثیر زاویه‌ی فیبرها در میزان جذب انرژی و بررسی کامپوزیت‌ها در امکان تغییر شکل پلاستیک پایدار بدون شکست^۳.

۵- بررسی شرایط مرزی، در سر و ته پوسته و اثر آن بر روی میزان اوج نیروی اولیه مانند ثابت بودن یا نبودن ته پوسته و یا بسته بودن آن.

۶- استفاده از وسیله‌ای الاستیک، داخل پوسته مانند فنر و تحلیل آن، در جذب انرژی در حالت الاستیک و پلاستیک تأثیر گذارند. در ابتدا سعی می‌گردد، قطعه در حالت الاستیک باقیمانده و جذب انرژی کامل صورت گیرد. برای این مهم، می‌توان انواع فنر، نوع قرارگیری، نوع اتصال، سختی، ضخامت، فنر مورد تحلیل قرار گیرد.

۷- بررسی عامل دما بر روی جذب کننده و اثر آن در جذب بهتر انرژی. افزایش دما، تغییر شکل پلاستیک را سریعتر و ماده را نرم‌تر می‌کند. تغییر شرایط محیط و افزایش دما در مناطق مختلف می‌تواند در کارایی پوسته‌ها تأثیر بگذارد. بررسی این عامل، نقش مهمی در طراحی پوسته‌ها برای مناطق مختلف دارد.

۸- در تحلیل صورت گرفته در این مطالعه و اکثر مطالعه‌های صورت گرفته نوع تحلیل چه به صورت عددی و چه تحلیلی، بصورت استاتیک در نظر گرفته شده است. در واقعیت نوع برخورد بصورت آنی و ضربه‌ای است. بررسی نوع بارگذاری ضربه‌ای و بررسی نتیجه‌ی آن با نتایج این مطالعه.

^۱ . Electro heological

^۲ . Magnetor heological

^۳ . Fracture

منابع

- [1]. Alexander JM. "An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading". *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics* 1960;13(1):10–5.
- [2]. Amdahl J, Soreide TH. "Energy absorption in axially compressed cylindrical shells with special reference to bulbous bows in collision". *Norw Marit Res* 1981;4:2–11.
- [3]. Andronicous A, Walker AC. "A plastic collapse mechanism for cylinders under uniaxial end compression". *J Constr Steel Res* 1981;1:23–34.
- [4]. Abramowicz W, Jones N. "Dynamic axial crushing of circular tubes". *Int J. Impact Eng* 1984;2:263–81
- [5]. Abramowicz W, Jones N. "Dynamic progressive buckling of circular and Square tubes". *Int J Impact Eng* 1986;4:243–70.
- [6]. Wierzbicki T, Abramowicz W. "On the crushing mechanics of thin-walled Structures". *Journal of Applied Mechanics* 1983;50:727–34.
- [7]. Postlethwaite HE, Mills B. "Use of collapseible structural elements as impact isolators with special reference to automotive applications". *J Strain Anal* 1970;5:58–73.
- [8]. Ramsey H. "Plastic buckling of conical shells under axial compression". *Int J. Mech Sci* 1977;19:257–72.
- [9]. Mamalis AG, Johnson W. "The Quasi-static crumpling of thin walled circular cylinders and frusta under axial compression". *Int J. Mech. Sci.* 1983;25:713–32.
- [10]. Mamalis AG, Manolakos DE, Saigal S, Viegelaan GL, Johnson W. "Extensible plastic collapse of thin-wall frusta as energy absorbers". *Int J. Mech Sci* 1986;28:219–29.
- [11]. Mamalis AG, Manolakos DE, Viegelaan GL, Vaxevanidis NM, Johnson W. "On inextensional axial collapse of thin PVC conical shells". *Int J Mech Sci* 1986;28:323–35.
- [12]. Mamalis AG, Manolakos DE, Viegelaan GL, Johnson W. "The modelling of the progressive extensible plastic collapse of thin-wall shells". *Int J Mech Sci* 1988;30:249–63.
- [13]. Gupta NK, Easwara Prasad GL, Gupta SK. "Plastic collapse of metallic conical frusta of large semi-apical angles". *Int J Crashworthiness* 1997;2:349– 66.
- [14]. Guillow SR, Lu G, Grzebieta RH. "Quasi-static axial compression of thin-walled circular aluminium tubes". *International Journal of Mechanical Sciences* 2001;43(9):2103–23.
- [15]. Reid SR, Reddy TY. "Effect of strain hardening on the lateral compression of tubes between rigid plates". *International Journal of Solids and Structures* 1978;14:213–25.
- [16]. Reddy TY, Reid SR. "Lateral compression of tubes and tube-systems with side constraints". *International Journal of Mechanical Sciences* 1979;21(3):187–99.
- [17]. DeRuntz JA, Hodge PG. 'Crushing of a tube between rigid plates'. *Journal of Applied Mechanics* 1963;30:391–8.
- [18]. Reyes A, Hopperstad OS, Hanssen AG, Langseth M. "Modeling of material failure in foam-based components". In: *Proceedings of the fifth international symposium on impact engineering. International Journal of Impact Engineering* 2004;30(7):805–34.
- [19]. Zarei HR, Kroger M. "Optimization of the foam-filled aluminum tubes for crush box application". *Thin-Walled Structures* 2008;46(2):214–21.
- [20]. Zarei HR, Kroger M. "Crashworthiness optimization of empty and filled

- aluminum crash boxes”. *International Journal of Crashworthiness* 2007; 12(3): 255–64.
- [21]. Hou SJ, Li Q, Long SY, Yang XJ, Li W. “Crashworthiness design for foam filled thin wallstructures”. *Materials & Design* 2009; 30(6):2024–32.
- [22]. Nariman-Zadeh N, Darvizeh A, Jamali A. “Pareto optimization of energy absorption of square aluminium columns using multi-objective genetic algorithms”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture* 2006;220(2):213–224.
- [23]. Eddins T.O., 1965. “Space craft soft landing system”. U.S. patent 3181821.
- [24]. Nemat-Nasser S, Choi JY, Isaacs JB, Lischer DW. “Experimental observation Of high-rate buckling of thin cylindrical shape-memory shells”. *Proc SPIE* 2005; 5761:347–54.
- [25]. Nemat-Nasser S, Choi JY, Isaacs JB, Lischer DW. “Quasi-static and dynamic buckling of thin cylindrical shape-memory shells”. *J Appl Mech.* 2006; 73: 825–33.
- [26]. Amini MR, Nemat-Nasser S. “Dynamic buckling and recovery of thin cylindrical shape memory shells”. *Proc SPIE* 2005;5761:450–3.
- [27]. Mamalis AG, Johnson W, Viegelaht GL. “The crumpling of steel thin-walled tubes and frusta under axial compression at elevated strain rates: some experimental results”. *Int J Mech Sci* 1984;26:537–48.
- [28]. Mamalis AG, Manolakos ED, Saigal S, Viegelaht GI, Johnson W. “Extensional plastic collapse of thin-walled frusta as energy absorbers”. *Int J Mech Sci* 1986;28:219–29.
- [29]. Mamalis AG, Manolakos ED, Viegelaht GI, Vaxevanidis NM, Johnson W. “On inextensional axial collapse of thin PVC conical shells”. *Int J Mech Sci* 1986;28:323–35.
- [30]. Fisher CA, Bert CW. “Dynamic buckling of an axially compressed cylindrical shell with discrete rings and stringers”. *J Appl Mech* 1973; 40:736–40.
- [31]. Jones N, Papageorgiou EA. “Dynamical axial plastic buckling of stringer stiffened cylindrical shells”. *Int J Mech Sci* 1982;24:1–20.
- [32]. Simitses GJ, Sheinman I. “Static and dynamic buckling of pressure- loaded, ring-stiffened cylindrical shells”. *J Ship Res* 1983;27:113–20.
- [33]. Birch RS, Jones N. “Dynamic and static axial crushing of axially stiffened cylindrical shells”. *Thin-Walled Struct* 1990;9:29–60.
- [34]. Zhang A, Suzuki K. “A study on the effect of stiffeners on quasi-static crushing of stiffened square tube with non-linear finite element method”. *Int J Impact Eng* 2007;34:544–50.
- [35]. Wang XG, Bloch JA, Cesary D. “Axial crushing of tubes made of multi materials”. In: *Mechanics and mechanisms of damage in composites and multi materials (ESIS11)*; 1991. p. 351–61.
- [36]. Song HW, Wan ZM, Xie ZM, Du XW. “Axial impact behavior and energy absorption efficiency of composite wrapped metal tubes”. *Int J Impact Eng* 2000;24:385–401.
- [37]. Bouchet J, Jacquelin E, Hamelin P. “Dynamic axial crushing of combined composite aluminium tube: the role of both reinforcement and surface treatments”. *Compos Struct* 2002;56:87–96.
- [38]. Mahdi E, Hamouda AMS. “Energy absorption capability of composite Hexagonal ring systems”. *Mater Design* 2012;34:201–10.
- [39]. Alkolose O, Mahdi E, Hamouda AMS. “Axial crushing of composite Elliptical

- tubes between flat platens". *Int j appl comp* 2003;10:6339–63.
- [40]. Babbage JM, Mallick PK. "Static axial crush performance of unfilled and foam-filled aluminum-composite hybrid tubes". *Compos Struct* 2005; 70:177– 84.
- [41]. Huang MY, Tai YS, Hu HT. "Numerical study on hybrid tubes subjected to static and dynamic loading". *Appl Compos Mater* doi:10.2007/s10443-010-9176-5.
- [42]. Guillow SR, Lu G, Grzebieta RH. "Quasi-static axial compression of thin walled circular aluminium tubes". *International Journal of Mechanical Sciences* 2001;43(9):2103–23.
- [43]. Guillow SR, Lu G, Grzebieta RH. "Quasi-static axial compression of thin walled circular aluminum tubes". *Int JMech Sci* 2001;43:2103-23.
- [44]. Tadaharu A, Atsuo T, Wakako A, Akihiko Y. "Energy absorption of a thin-walled cylinder with ribs subjected to axial impact". *Int J Impact Eng* 2008; 35:65-79.
- [45]. Gupta N.K, Venkatesh. "Experimental and numerical studies of impact axial compression of thin-walled conical shells". *Int J Impact Eng* 2007; 34:708-720.
- [46]. Zhiliang T, Shutian L, Zonghua Z. "Energy absorption properties of non-convex multi-corner thin-walled". *Thin-walled structures* 2012; 51:112-120.
- [47]. Ahmad M, Ismail K.A, Mat F. "Convergence of finite element model for crushing of a conical thin-walled tube". *Procedia Engineering* 2013; 53:586-593.
- [48]. Ahmad Z, Thambiratnam D.P. "Crushing response of foam-filled conical tubes under quasi-static axial loading". *Materials and design* 2009; 30:2393-2403.
- [49]. Nagel GM, Thambiratnam D.P. "A numerical study on the impact response and energy absorption of tapered thin-walled tubes". *Int J Mech sci* 2004; 46:201-16.
- [50]. Mamalis AG, Manolacos DE, Loannidis NB, Kostazos PK. "Numerical simulation of thin-walled metallic circular frusta subjected to axial loading". *Int J crashworthiness* 2005; 10:505-13.
- [51]. Ghamarian A, Tahaye Abedi M. "Axial crushing analysis of end-capped circular tubes". *Thin-walled structures* 2011; 49:743-752.
- [52]. Avalle M, Chiandussi G. "optimization of a Vehicle energy absorbing steel component with experimental validation". *Int J Impact Eng* 2007; 34:843-858.
- [53]. Yang J, Luo M, Huo Y, Lu G. "Energy absorption of expansion tubes using a conical-cylindrical die : Experimentals and numerical simulation". *International journal of mechanical sciences* 2010; 52:716-725.

[۵۴]. جواهری ا. "حل تحلیلی انرژی جذب شده در ضربه گیرهای مخروطی پر شده از فوم". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۱.

[۵۵]. نیک نژاد ن. "بررسی مقاومت به ضربه و قابلیت جذب انرژی در سازه های لانه زنبوری با سلول های پر شده از فوم". پایان نامه دکترا، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۸.

[۵۶]. انصاری خلخالی درویشه ر. "مطالعه ی تحلیلی و تجربی مقاطع جدارنازک بعنوان جاذب های انرژی تحت اثر بارگذاری های استاتیکی و دینامیکی". پایان نامه ی کارشناسی ارشد، دانشگاه گیلان، ۱۳۹۱.

[۵۷]. میر محمد صادقی ا. "بررسی تجربی و شبیه سازی لهیدگی پوسته های جدارنازک شیاردار تحت بارگذاری محوری". پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه مازندران، ۱۳۸۷.

- [۵۸]. رحمانی ر. "بررسی رفتار مکانیکی پوسته‌های جدارنازک ساندویچی با هسته‌ی فوم تحت بارگذاری محوری". پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه بو علی سینا همدان، ۱۳۹۱.
- [۵۹]. پارسا م. "بررسی تجربی و عددی رفتار سازه‌های جدارنازک چندسلولی تحت بارگذاری محوری". پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه بو علی سینا همدان، ۱۳۹۱.
- [۶۰]. قربانعلی آرانی ع، تشکری ع، مصلاهی ع. "بهینه‌سازی ابعاد هندسی پوسته‌ی استوانه‌ای جدارنازک تحت بارگذاری محوری در جذب انرژی جنبشی". دهمین همایش انجمن هوافضای ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۹.
- [۶۱]. ایزدی م، پیلتن م، علوی‌نیا ع. "بررسی تاثیر شکل سطح مقطع بر روی لهیدگی و جذب انرژی مقاطع جدارنازک تحت بارگذاری محوری". هفدهمین کنفرانس سالانه‌ی مهندسی مکانیک تهران، دانشگاه فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۸.
- [62]. Guang yong Sun, Fengxiang Xu, Guangyou Li, Qing Li. "Crashing analysis and multi objective Optimazation for thin-walled structures with functionaly graded thickness". *Int J Impact Eng* 2013; 64:62-74.
- [63]. Elmarakbi A, Yee xing long, Macintyre J. "Crash analysis and energy absorption characteristics of s-shape longitudinal members". *Thin-walled structures* 2013; 68:65-74.
- [64]. Ghamarian Ali, Tahaye Abadi M. "Axial crushing analusis of end-capped circular tubes". *Thin-walled structures* 2010; 49:743-752.
- [65]. Alavinia A, Parsapoor M. "Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular square, hexagonal and octagonal sections". *Thin-walled structures* 2014; 74:155-165.
- [66]. Wu Hong, Hoalin Fan, Zhicheng Xia, Fengnian Jin, Qing Zhou. "Axial crushing behaviors of multi-cell tubes with triangular lattices". *Int J Impact Eng* 2013;63L106-117.
- [67]. Zhang Xion, Zhang Hui. "Axial crushing of circular multi-cell collumns". *Int J Impact Eng* 2013; 12.
- [۶۸]. پرهیزکار م، قناد کهتویی م. "تحلیل ترموالاستیک استوانه‌ای چرخان جدارضخیم FGM پی‌زو الکتریک به کمک نظریه‌ی تغییرشکل برشی مرتبه‌ی اول با توزیع توانی خواص". پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۹۲.
- [۶۹]. شاهانی ا، براتی م. "شبیه‌سازی فرایندهای با تغییر شکل های بزرگ با استفاده از روش اجزاء محدود مش‌ریزی تطبیقی". *مجله مهندسی مکانیک شریف*: ۲۹،۴۱-۵۲، ۱۳۹۲.

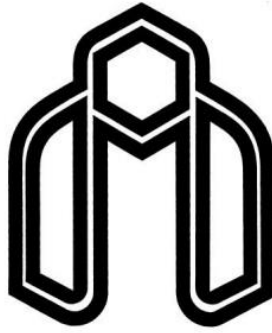
Abstract

Shells are suitable structures in absorption mechanical energy of accidents and impacts. By plastic deformation, they can damped impacts that are loaded to structures and persons who placed in car. The amount of energy absorbed in the shell in during crash accidents is high. This research is tried to present suitable change in geometry of conical shell that increases the absorption energy in accidents. On the basis, experimental test are done by Hydraulic Servo 8802 and numerical analysis are done by Abaquse software, on truncated conical stainless steel shell.

For study the possibility and performance possibility of increasing of efficiency in damping of energy, some changes are made in geometry of conical shells likes create holes and seams, change in location of holes, change in diameters of holes and etc.

This research can help to use thin conical shell to absorb much energy. After change in geometry experimental tests are done. Results show that the conical shells with starters, decrease the maximum primary force and increase the value of absorbed energy.

Keyword: shell, truncated conical, thin walled, absorb energy, numerical and experimental analysis.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

**Experimental and numerical analysis on optimization
of energy absorption of a conical steel shell under
axial loading**

Thesis
Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for
the Degree of
Master of Science (M.Sc)

Babak Jahed

Supervisor
Dr. M. Shariati

Date: June 2014