

بررسی رفتار جذب انرژی لوله های دایروی با شیار عرضی در لهیدگی محوری

جاذب انرژی به منظور دریافت انرژی غیر مطلوب استفاده می شود. یکی از پرکاربردترین جاذب های انرژی لوله های جدار نازک می باشند. ایجاد شیار و یا الگو در جداره لوله به منظور بهبود جذب انرژی انجام می شود. در این مقاله ویژگی های تغییر انرژی جذب شده لوله های آلومینیومی دارای الگوی محیطی بررسی و با لوله با جداره صاف به کمک روش المان محدود مقایسه شده است. الگوهای دایروی- محیطی با طول های مختلف و همچنین عمق های مختلفی در نظر گرفته می شوند. به کمک شبیه سازی عددی، لهیدگی استاتیکی آنها تحلیل می شود. نتایج نشان می دهند در برخی پارامترها، لوله بدون الگو بهینه تر از لوله الگودار است اما به طور کلی ایجاد الگوهای محیطی خواص تغییر انرژی این جاذبها را بهبود می بخشد.

بهنام کاظم شاهي^۱
دانشجوی کارشناسی ارشد

مجتبی شهرامیار^۲
استادیار

ناصر توسلی^۳
استادیار

واژه های راهنما: جذب انرژی، لوله آلومینیومی، دیواره با الگوی محیطی، بهینه سازی

۱- مقدمه

به طور کلی، یک جاذب انرژی سیستمی می باشد که انرژی سینتیک را به صورت کامل و یا جزئی به نوع دیگری از انرژی تبدیل می کند. این تبدیل می تواند به صورت برگشت پذیر و یا به صورت برگشت ناپذیر باشد. نوع برگشت ناپذیر که شامل تغییر شکل دائمی جاذب می شود در وسایل نقلیه برای اطمینان از عدم رسیدن آسیب به سرنشینان و یا قسمتهای حساس تعبیه شده است. طریقه تبدیل انرژی سینتیک به کار مورد نیاز برای تغییر شکل پلاستیک یک جاذب انرژی به پارامترهای زیادی از جمله نوع و اندازه بارگذاری، نرخ انتقال بار، الگوی تغییر شکل و خواص ماده بستگی دارد. لوله های جدار نازک، با مقطع دایروی، پرکاربردترین قطعات جذب انرژی در صنایع می باشند. انواع شیوه های رایج لهیدگی محوری لوله های مدور شامل مود متقارن (چین دار شدن)، مود نامتقارن (الماسی) و مود ترکیبی می باشد. از زمان به کار گرفتن جاذبهای انرژی در صنعت محققین به دنبال راههای افزایش خواص جذب انرژی آن ها بوده اند.

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، طراحی کاربردی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پرند Bkazemshahi@gmail.com

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پرند mshahramyar@piau.ac.ir

^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد پرند naser_tavassoli@yahoo.com

گاه تغییر در خواص مواد و گاه تغییر در پارامترهای هندسی جاذب به منظور مطالعه اثر آنها بر رفتار جذب انرژی پیگیری شده است. ژانگ و همکاران [۱] با ایجاد تغییراتی در ضخامت دیواره در مقطع لوله مربعی سعی در بهبود خواص این جاذب های انرژی نمودند. آنها با بررسی مکانیزم ایجاد چین خوردگی به این نتیجه رسیدند که اگر در گوشه های مربع ضخامت بیشتر از سایر نقاط اضلاع باشد قابلیت جذب انرژی آنها افزایش می یابد. نتایج نشان می دهد با انتخاب بهینه پارامترهای تغییر ضخامت می توان بدون افزایش در پیک نیرویی اولیه خواص جذب انرژی را بهبود بخشید.

علوی نیا و پارساپور [۲،۳] رفتار جذب انرژی لوله های جدار نازک با مقاطع مختلف چند ضلعی در حالات تک سلولی و چند سلولی بررسی کردند. مشخص است که ایجاد سلول های داخلی تاثیر قابل ملاحظه ای بر رفتار جذب انرژی دارد و با انتخاب مناسب چیدمان و تعداد سلول ها می توان خواص جذب انرژی را بهبود بخشید. به کارگیری پلیمر، فوم و انواع کامپوزیت جهت بهبود خواص جذب انرژی نیز مورد توجه محققین قرار گرفته است. زارعی و همکاران رفتار جاذب های کامپوزیتی را در بارگذاری دینامیکی به کمک روشهای تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. کامپوزیت استفاده شده فایبرگلاس در ماتریس پلی آمید بوده است. سپس به کمک روشهای ترمو فرمینگ و جوشکاریهای نوین از ورقهای کامپوزیتی لوله ها با مقاطع مستطیل و چند ضلعی ساخته و مورد ارزیابی قرار گرفت. در انتها مدل بهینه کامپوزیتی با مدل بهینه آلومینیومی مورد مقایسه قرار گرفتند و نتایج نشان می دهد که لوله کامپوزیتی در عین آنکه ۲۶٪ وزن کمتری نسبت به مدل آلومینیومی دارد ۱۷٪ جذب انرژی بهتری نشان می دهد [۴-۶]. میرزایی و همکاران رفتار جاذب های انرژی لوله های هیبریدی آلومینیومی را در بارگذاری نیمه استاتیکی تجربی و تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. لوله های هیبریدی در حقیقت لوله های دوجداره ای هستند که دارای مغز آلومینیومی بوده و یک لایه کامپوزیتی شامل فایبرگلاس در ماتریس اپوکسی حول مغز آلومینیومی قرار گرفته است.

نتایج نشان می دهند با افزایش ضخامت لایه هیبریدی انرژی جذب شده و بازده نیروی لهیدگی افزایش می یابد ضمن آنکه زاویه قرارگیری لایه های کامپوزیتی در رفتار لهیدگی کاملاً موثر است. اثر دیگر آن است که مد تغییر شکل لوله فلزی با ضخامت یکسان در مقایسه با لوله هیبریدی از نقطه نظر وجود و یا عدم وجود تقارن محوری متفاوت می باشد [۷]. توکسوی و گودن اثر پرکردن جعبه لهیدگی را به صورت نیمه بر رفتار جذب جعبه لهیدگی صنعتی 1050H14 را در بارگذاری دینامیکی و استاتیکی به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین این شرایط را با حالت های بدون فوم و کاملاً پر شده از فوم مقایسه نمودند [۸]. اثر ضخامت دیواره و چگالی فوم نیز بر روی رفتار جذب انرژی بررسی شد.

نتایج نشان می دهند استفاده از فوم مد تغییر شکل را به نحو مطلوبی بهبود می بخشد به نحوی که در جعبه های بدون فوم تاشدگی ها نامنظم با طول بزرگتری هستند در حالی که با استفاده از فوم تا خوردگی ها منظم تر می گردند نیروی متوسط لهیدگی و انرژی جذب شده بر واحد جرم با افزایش چگالی فوم و ضخامت دیواره جعبه افزایش می یابند. رفتار جعبه در حالت های مختلف بدون فوم، نیمه فوم و تمام فوم با چگالی های مختلف فوم و ضخامت های مختلف دیواره مقایسه شد و نتایج نشان می دهد با در نظر گرفتن حالت های خاصی از چگالی فوم و ضخامت های دیواره حالت نیمه فوم می تواند بیشینه انرژی جذب شده در واحد جرم را نسبت به حالت های بدون فوم و کامل فوم به دست دهد.

در حالتی که در شرایط دیگری از چگالی فوم و ضخامت دیواره ممکن است حالت تمام فوم برتری یابد [۸]. قمریان و ابدی رفتار لوله های آلومینیومی با یک سر بسته در حالات پر شده از فوم پلی اورتان و بدون فوم را در بارگذاری استاتیک با روشهای تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. رفتار این لوله ها با لوله های دو سر باز مورد مقایسه قرار گرفت. شبیه سازی به کمک کد ABAQUS Explicit صورت گرفت و نتایج هماهنگی مناسبی با نتایج تجربی داشت [۹].

نتایج آثار ارزنده لوله های یک سر بسته را در مقابل لوله های دو سر باز نشان می دهد. در این لوله ها به علت وجود فیلت در نزدیکی سر بسته تاشدگی در نزدیکی این مکان اتفاق می افتد و پیک نیرویی اولیه نسبت به لوله دو سر باز بسیار کوچکتر می باشد. با افزایش شعاع فیلت این نیروی بیشینه کاهش یافته و همچنین تغییرات نیرویی در ادامه تغییر شکل کاهش می یابد. پر کردن فوم پلی اورتان اگرچه نیروی متوسط تغییر شکل را افزایش می دهد انرژی مخصوص جذب شده را کاهش می دهد.

ایجاد شیار و یا الگو در جداره لوله یکی از مباحث مطرح به منظور بهبود رفتار جذب انرژی آن می باشد. تا کنون مطالعات بسیاری در رابطه با خواص این لوله ها صورت گرفته است. نیک نژاد و همکاران [۱۰] رفتار جذب انرژی لوله های دایروی را با حضور شیارهای حلقوی ایجاد شده با عملیات هیدروفرمینگ تحت بارگذاری شعاعی و عرضی به صورت نیمه استاتیکی بررسی کردند. در این مطالعه رفتار لوله های فاقد شیار، لوله های دارای شیارهای کم و لوله های دارای شیارهای کامل مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می دهد که لوله های فاقد شیار بهترین پاسخ رفتار جذب انرژی را در بارگذاری محوری دارند. صالح غفاری و همکاران [۱۱] تغییرات ساختاری لوله های فلزی را به منظور بهبود خواص جذب انرژی در بارگذاری محوری نیمه استاتیکی مورد بررسی تجربی قرار دادند. آنها با ایجاد شیارهای محیطی در دیواره، تغییر شکل پلاستیک را به نواحی دلخواه هدایت کردند که این باعث افزایش انرژی جذب شده شد. آنها در مطالعه دیگر (۲۰۱۱) [۱۲] بهینه سازی لوله های جاذب انرژی تقویت شده با رینگ های بیرونی را بررسی کردند. در این حالت لوله های فولادی به کمک ماشینکاری حاوی شیارهایی در فواصل مختلف محیطی شدند.

دراویزه و همکاران (۲۰۱۴) [۱۳] بهبود خواص جذب انرژی لوله های آلومینیومی شیاردار پر شده از فوم پلی اورتان با چگالی بسیار پایین را بررسی کردند. نتایج حاکی از آن است انتخاب پارامترهای شیار در مد تغییر شکل لوله بسیار مهم است و در برخی از حالت ها تغییر شکل های همراه با پیچیدگی به صورت غیر قابل کنترل اتفاق می افتد. عیوضیان و همکاران [۱۴] اثر ایجاد شیار (محوری و محیطی) در پاسخ جذب انرژی لوله های آلومینیومی را در بارگذاری استاتیکی مورد بررسی قرار دادند. با ایجاد شیارهای محیطی تغییر شکل تقارن محوری تضمین می شود ضمن آنکه قله اولیه نیرو حذف می شود و یکنواختی در نیروی لهیدگی به وجود می آید در حالی که میزان کل انرژی جذب شده و همچنین نیروی لهیدگی میانگین کاهش می یابد.

نتایج نشان می دهند که لوله ها با شیارهای محوری هم قله اولیه بیشتر و هم تغییرات نیرویی زیادتری در مقایسه با لوله های بدون شیار دارند و از این رو مناسب نیستند. اوزاکی و چن (۲۰۰۹) [۱۵] رفتار ورق های الگودار محیطی را در لوله های آلومینیومی مورد بررسی قرار دادند. در این حالت بارگذاری استاتیکی بر روی ورق هایی که شیارهایشان بر اساس توابع سینوسی می باشد به صورت استاتیکی انجام گرفت.

نتایج نشان می دهد که اگر طول موج شیارهای ایجاد شده بسیار بزرگتر و یا بسیار کوچکتر از طول موج چین خوردگی های لوله بدون شیار باشد و یا زمانی که عمق شیار بسیار کوچک باشد رفتار جذب انرژی لوله مستقل از نوع شیار می باشد. همچنین در حالتی که طول موج شیار بزرگتر از طول موج چین خوردگی باشد نوع چین خوردگی به صورت غیر متقارن محوری می باشد. در این حالت کنترل چندانی بر روی رفتار چین خوردگی وجود ندارد. در حالتی که طول موج شیار کوچکتر از طول موج چین خوردگی باشد آنگاه نوع چین خوردگی به صورت متقارن محوری خواهد بود. در این حالت بر حسب پارامترهای شیار شامل طول موج و اندازه رفتار پیشرفت چین خوردگی ها به صورت مرحله ای و یا یکباره خواهد بود. در نوع اول در نزدیکی محل اعمال نیرو اولین چین خوردگی شکل گرفته و کامل می شود و سپس دومین چین خوردگی در نزدیکی آن شکل می گیرد و به همین نحو شکل گیری باقی چین خوردگی ها ادامه می یابد. در نوع یکباره تمامی چین خوردگی ها در محل شیارها شروع به ایجاد و تکمیل شدن می کنند.

ژوفیانگ لیو و همکاران (۲۰۱۵) [۱۶] رفتار جذب انرژی لوله های آلومینیومی با الگوی سینوسی بر روی دیواره در بارگذاری دینامیک به کمک روش المان محدود را مورد بررسی قرار دادند. آنها اثر پارامترهای مختلف از جمله نسبت قطر به ضخامت دیواره، سرعت لهیدگی، طول موج و اندازه الگوی سینوسی را بر روی رفتار جذب انرژی را مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای جذب انرژی از جمله نیروی متوسط، راندمان نیروی لهیدگی، انرژی مخصوص جذب شده و راندمان لهیدگی را مورد ارزیابی قرار دادند.

با توجه به سابقه تحقیقات انجام شده، اگرچه در ارتباط با مود تغییر شکل در لوله های جدار نازک الگودار مطالعاتی صورت گرفته، خواص جذب انرژی آنها در مقایسه با لوله های جدار نازک ساده و بدون الگو مورد بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله اثر الگوهای محیطی به صورت کمائی از دایره بر روی رفتار جذب انرژی لوله های جدار نازک به کمک روش المان محدود مطالعه شده است. این اولین باری است که خواص جذب انرژی لوله جدار نازک با پارامترهای الگوی محیطی سنجیده می شود. ابتدا مدل اجزای محدود به کمک گزارشات تجربی ارائه شده در مرجع [۱۵] ارزش گذاری می شود و سپس اثر پارامترهای مختلف الگوی محیطی بر رفتار جذب انرژی مقایسه شده و در نهایت الگوی بهینه ارائه می گردد.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق از روش عددی المان محدود به منظور مطالعه رفتار جذب انرژی لوله های جاذب استفاده می شود. اولین گام اطمینان حاصل نمودن از صحت مدل المان محدود می باشد. چن و اوزاکی [۱۵] رفتار لهیدگی و جذب انرژی لوله های آلومینیومی با ضخامت دیواره ۱ میلی متر را درحالت های مختلف ساده و شیاردار با شیارهای سینوسی مورد بررسی قرار دادند. این گزارش به عنوان مبنایی برای ارزش گذاری المان محدود در نظر گرفته می شود به این نحو که مدلی مشابه با مدل ارائه شده در این گزارش ساخته شده و شبیه سازی صورت می گیرد. سپس نتایج عددی حاصل با نتایج تجربی مقایسه می شود.

ورق از جنس آلومینیوم A5052 می باشد. نمودار تنش- کرنش ماده به صورت دوخطی الاستیک-پلاستیک تخمین زده می شود و جدول (۱) خواص مکانیکی ماده مورد نظر را نشان می دهد.

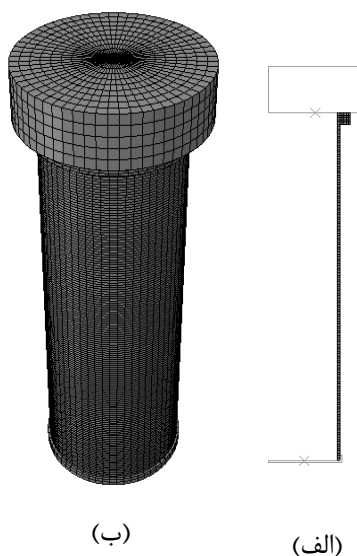
بنابراین رابطه تنش- کرنش مطابق معادله (۱) به دست می آید [۱۵].

$$\begin{cases} E\varepsilon & \text{If } \varepsilon < \frac{\sigma_y}{E} \\ \sigma_y + E_h \left(\varepsilon - \frac{\sigma_y}{E} \right) & \text{If } \varepsilon \geq \frac{\sigma_y}{E} \end{cases} \quad (1)$$

جدول ۱- خواص مکانیکی ورق آلومینیومی A5052

خواص	چگالی	ضریب پواسون	مدول الاستیک	تنش تسلیم	مدول پلاستیک
A5052	۲۷۰۰ kg/m ³	۰/۳	۷۰ GPa	۷۰/۶ MPa	۳/۵۳ GPa

از کد صریح نرم افزار آباکوس به عنوان کد حل کننده استفاده شده است. این کد در مقایسه با کد ضمنی نرم افزار آباکوس برای تغییر شکل های پیچیده و شرایط تماسی مناسب تر بوده و مشکلات همگرایی پاسخها را ندارد. فرض می گردد چین خوردگیها به صورت متقارن محوری اتفاق بیفتند و در نتیجه مدلسازی به صورت متقارن محوری انجام می گیرد. ابتدایی ترین حالت برای لوله جاذب انرژی حالت بدون شیار و با دیواره صاف می باشد و همین حالت به منظور ارزش گذاری استفاده شده است. شکل (۱) مدل متقارن محوری ساخته شده و همچنین مدل کامل لوله پس از المان بندی را نشان می دهد. مطابق شکل (۱) لوله ما بین یک سر متحرک و یک پایه ثابت قرار می گیرد و با حرکت سر متحرک به سمت پایین، تغییر شکل لوله شامل چین خوردگی ها صورت می گیرد. ورق به صورت تغییر شکل پذیر مدلسازی می شود و با المانهای خطی چهارگره ای شبکه بندی می شود. پایه ثابت و سر متحرک به صورت صلب مدلسازی می شوند.



شکل ۱- مدل المان محدود لوله جاذب انرژی (الف) مدل دو بعدی متقارن محوری، (ب) مدل سه بعدی حاصل شده از دوران مدل دو بعدی

خواص پلاستیک ماده به صورت جدولی از تنش- کرنش مطابق معادله (۱) به عنوان خواص پلاستیک به نرم افزار داده می شود. همچنین بین اجزای صلب و ورق، اصطکاک کولمب با ضریب ۰,۱ در نظر گرفته می شود [۱۵]. شکل (۲) تغییر شکل لوله و ایجاد چین خوردگی در لوله را پس از لهیدگی نشان می دهد.

از آنجا که معادلات تعادل در کد صریح نرم افزار آباکوس (ABAQUS Explicit) به صورت دینامیکی می باشد می بایست پارامترهای حل را به صورتی کنترل نمود که بتوان اطمینان حاصل کرد که شبیه سازی به صورت استاتیکی انجام گرفته است. مطابق راهنمایی دستورالعمل نرم افزار پارامترهای مهم مقایسه انرژی کینتیک با انرژی درونی قطعه تغییر فرم داده شده می باشد. بر این اساس پیشنهاد می شود که انرژی کینتیک کمتر از ۵٪ انرژی درونی باقی بماند. از طرف دیگر با توجه به اینکه گام های زمانی در کد صریح نرم افزار آباکوس به نسبت کوچک می باشد. یک تحلیل تغییر شکل ساده ممکن است ساعتها و یا گاهی روزها به طول بیانجامد. بنابراین نیاز است تا سرعت تحلیل بالا برده شود. در این حالت دو روش وجود دارد.

اولین روش بالا بردن سرعت تغییر شکل می باشد در این روش با کم نمودن زمان انجام تغییر شکل سعی در کاهش زمان تحلیل می شود. مثلا فرض کنید در یک تحلیل جذب انرژی با پایین آمدن سر متحرک به اندازه ۱ میلی متر تغییر شکل انجام گیرد. حال اگر این کار در ۱، ۰,۱، ۰,۰۱ و ۰,۰۵ ثانیه اتفاق افتد سرعت حرکت سنبه و به تبع آن سرعت تغییر شکل ۰,۱، ۱، ۲ و ۱۰ متر بر ثانیه خواهد بود. روش دوم استفاده از فاکتور مقیاس جرم (Mass scaling) می باشد. در این حالت با افزایش مجازی چگالی ماده تحت تغییر شکل گامهای زمانی حل افزایش یافته و سرعت حل بالا می رود. در تحقیق حاضر از روش اول به منظور افزایش سرعت حل استفاده می شود. با این وجود با مقایسه مقادیر انرژی کینتیک و انرژی درونی از استاتیکی بودن تحلیل اطمینان حاصل میشود. جدول (۲) زمان های لحاظ شده برای حل به همراه اطلاعات مربوط به شبیه سازی و نسبت انرژی کینتیک به انرژی درونی نشان داده است. این اطلاعات برای حالتی است که اندازه شبکه برابر ۱ در نظر گرفته شده است. با توجه به نتایج حاصل می توان نتیجه گرفت که حتی مدت زمان حل برابر با ۰,۰۱ ثانیه که معادل سرعت ۱۰ متر بر ثانیه می باشد؛ تغییر شکل هایی را در لوله جاذب ایجاد می کند که معادل حالت استاتیکی می باشند. بنابراین در اینجا از زمان ۰,۰۱ استفاده می شود.



شکل ۲ - تغییر شکل و چین خوردگی لوله آلومینیومی با استفاده از کد ABAQUS/Explicit

(الف) مدل دو بعدی متقارن محوری، (ب) مدل سه بعدی حاصل شده از دوران مدل دو بعدی

جدول ۲- دستیابی به زمان بهینه حل با اطمینان از نیمه استاتیکی بودن حل مساله

زمان مورد نیاز برای حل	زمان لهیدگی (S)	بیشینه انرژی درونی (KJ)	بیشینه انرژی کینتیک (KJ)	نسبت انرژی کینتیک به درونی %
۳ min	۰/۰۱	۴۷۷/۹	۳/۹۶	۰/۸
۷ min	۰/۰۵	۳۹۱/۳	۰/۲	۰/۰۰۵
۱۵ min	۰/۱	۳۸۴/۵	۰/۱۷	۰/۰۰۳۵
۲۴ min	۰/۲	۳۵۶/۲	۰/۱۴	۰/۰۰۳

برای اطمینان حاصل کردن از صحت تحلیل المان محدود توجه به حساسیت پاسخ ها به شبکه بندی حائز اهمیت است. بر این اساس، می بایست تحلیل به حساسیت شبکه در هر مدل المان محدود صورت گیرد. طبق این تحلیل عموماً یکی از خروجی های کد المان محدود مثلاً انرژی درونی در نظر گرفته می شود. ابتدا مدل با المان های درشت شبکه بندی می شود و پس از تحلیل بیشینه میزان انرژی درونی ثبت می گردد. سپس به مرور با ریز کردن المان ها در هر تحلیل بیشینه انرژی درونی ثبت می گردد.

مشاهده می شود به مرور میزان تغییرات بیشینه انرژی درونی با اندازه شبکه، کمتر می شود و می توان گفت که دیگر اندازه شبکه اثر قابل ملاحظه ای بر روی انرژی درونی ندارد. این اندازه به عنوان اندازه بهینه شبکه در نظر گرفته می شود. جدول (۳) تحلیل حساسیت شبکه انجام شده و اطلاعات مربوط به آن را هنگامی که زمان گام برابر با ۰,۱ ثانیه لحاظ شده است نشان می دهد.

مطابق جدول (۳) مشاهده می شود با کاهش اندازه شبکه زمان حل به طور فزاینده ای افزایش می باشد به طوری که با تغییر اندازه شبکه از ۱,۵ به ۰,۱۵ زمان حل از ۵ دقیقه به حدود ۱۸ ساعت افزایش می یابد. از طرف دیگر با کاهش اندازه شبکه تغییر انرژی درونی کاهش یافته و در حقیقت دقت تحلیل افزایش می یابد. در اینجا به منظور حفظ دقت و کمینه کردن زمان تحلیل اندازه شبکه ۰,۲۵ در نظر گرفته می شود.

با انتخاب زمان لهیدگی مناسب و اندازه شبکه بهینه، تحلیل لهیدگی استاتیکی لوله آلومینیومی ارائه شده در مرجع [۱۵] با فرض لوله ساده با دیواره صاف صورت گرفت. خروجی قابل مقایسه ارائه شده در مقاله حاضر نمودار نیرو جا به جایی لهیدگی می باشد. شکل (۳) رفتار تغییر نیروی لهیدگی (ارائه شده به صورت تنش فشاری) با میزان لهیدگی را در تحلیل های المان محدود و نتایج ارائه شده در مقاله را نشان می دهد.

نتایج مشاهده شده در شکل (۳) نشان می دهد که شبیه سازی المان محدود با دقت بسیار خوبی مطابق نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۱۵] بوده و از این نظر دارای اعتبار کافی برای بررسی اثر هندسه شیار بر روی خواص جذب انرژی لوله های جاذب انرژی شیاردار می باشد.

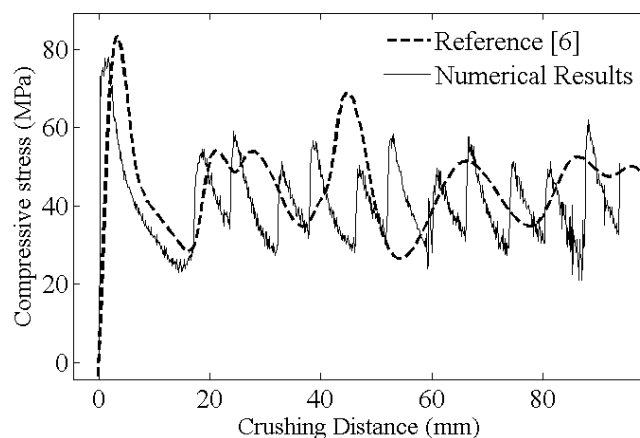
جدول ۳ - تحلیل حساسیت نسبت به اندازه شبکه

اندازه شبکه	تعداد شبکه در مقطع لوله	زمان مورد نیاز حل (دقیقه)	بیشینه انرژی درونی (J)	درصد تغییر انرژی درونی %
۱/۵	۱۱۰	۵	۱۹۵	---
۱	۱۷۵	۱۵	۳۸۴/۵	۹۷
۰/۶	۵۱۵	۱۲۰	۵۷۴	۴۹
۰/۴	۱۲۶۰	۲۱۰	۷۳۳/۴	۲۷
۰/۲۵	۲۷۶۰	۴۳۲	۷۸۵	۷
۰/۱۵	۴۲۰۰	۱۰۲۰	۷۹۳	۱

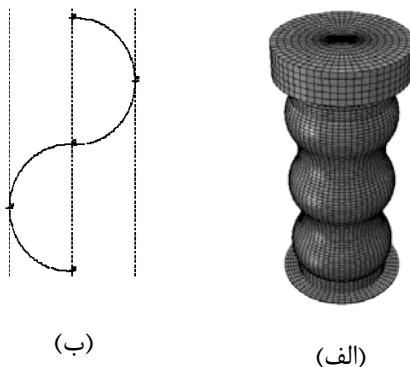
با توجه به تحقیقات انجام شده در مورد رفتار جذب انرژی لوله های جاذب می توان گفت دلیل ایجاد شیارها برای رسیدن به موارد ذیل است.

- کاستن قله نیرویی اولیه
- کاستن میزان پرش بین قله و دره نیرو در هر چین خوردگی
- قابلیت کنترل مد چین خوردگی به منظور پیش بینی صحیح رفتار جاذب

به منظور مطالعه رفتار جذب انرژی لوله های جاذب هندسه های کمانی از دایره به ازای مقادیر مختلف طول موج و ارتفاع الگو ایجاد شده بررسی می شود. شکل (۴) نمونه ای از اینگونه الگو را نشان می دهد. با توجه به لزوم تقارن محوری در مد لهیدگی که در این تحقیق مطلوب می باشد شیارها با توجه به مرجع [۱۵] می بایست ارتفاع شیارها از ۰ تا ۴ میلی متر و میزان طول موج از ۲۰ تا ۴۰ میلی متر می تواند تغییر کند. در این محدوده از طول و عمق الگو تعدادی عمق و طول مختلف برای الگو در نظر گرفته می شود. جدول (۴) آزمایش های شبیه سازی که برای مشخص نمودن رفتار جذب انرژی در نظر گرفته شده است را نشان می دهد.



شکل ۳ - مقایسه نیروی لهیدگی حاصل از تحلیل المان محدود و نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۶].



شکل ۴- الگوهای محیطی (الف) لوله با الگوی دایروی، (ب) تقارن الگوی دایروی

جدول ۴- سطوح تغییر پارامترهای شیارها

سطح	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
طول موج (mm)	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵	۴۰	--	--	--
ارتفاع (mm)	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵	۴

مطابق جدول (۴) مشاهده می شود با در نظر گرفتن ۵ سطح برای طول موج و ۸ سطح برای ارتفاع شیار در مجموع برای ۴۰ شبیه سازی صورت می گیرد. در هر مرحله اطلاعات مربوطه از جمله نمودار نیروی لهیدگی، انرژی جذب شده و سایر مقادیر مربوطه برای مقایسه خواص جذب انرژی ثبت شده و این اطلاعات مقایسه و حالت های بهینه معرفی می شوند.

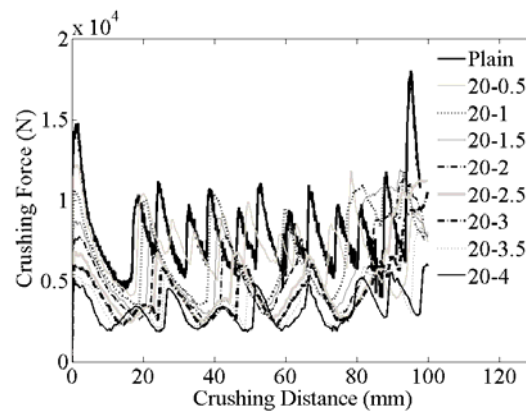
۳- بحث و نتایج

در بخش گذشته، مدل المان محدود ارزش گذاری شده و انتخاب الگوهای مختلف به منظور بررسی رفتار جذب انرژی صورت گرفت. در این قسمت نتایج حاصل از شبیه سازی المان محدود ارائه می شود. در مباحث مربوط به جذب انرژی عموماً پارامترهای مختلفی از جمله قله نیروی اولیه، انرژی جذب شده، انرژی جذب شده مخصوص، نسبت نیروی متوسط به نیروی بیشینه و مود لهیدگی سنجیده می شود. در این مقاله نیز این پارامترها اندازه گیری و توضیح داده خواهد شد.

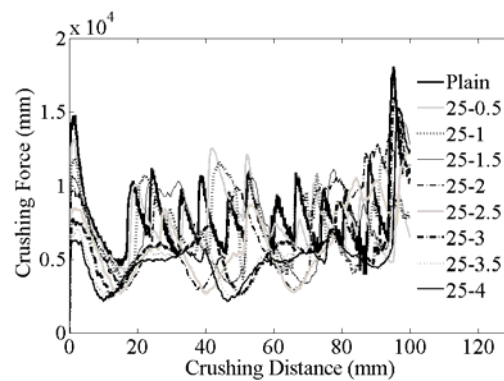
۴-۱- نمودار نیرو جابه جایی

نمودار نیرو جابه جایی در طول موج ها و عمق های مختلف الگو در شکل (۵) نشان داده شده است. نمودار نیرو- جابه جایی از نقطه نظر یافتن خواص کمی جذب انرژی بسیار با اهمیت می باشد. همچنین از لحاظ کیفی می توان نظم در تکامل چین خوردگی ها و مد لهیدگی را در این نمودار مشاهده نمود. به عنوان مثال با توجه به شکل (۵) می توان گفت در طول موج های کوچکتر، با تغییر عمق الگو رفتار نیروی لهیدگی منظم تر از طول موج های بزرگتر می باشد. همچنین مشخص است در تمامی طول موج و عمق های الگو قله اولیه کمتر از حالت بدون الگو می باشد.

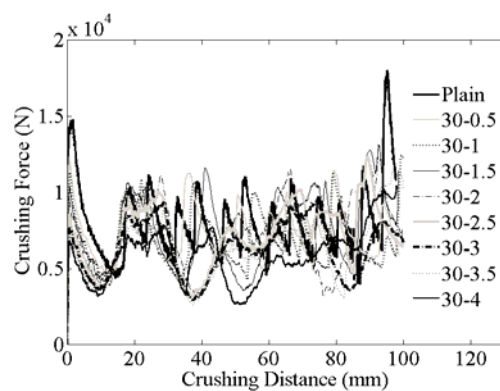
این وضعیت با قابلیت کنترل مد لهیدگی و حالت چین خوردگی ها در ارتباط است. در انتهای فاصله لهیدگی (۹۰-۱۰۰ میلی متر) رفتار نیروی لهیدگی نامنظم می باشد که این در اثر پیچیده شدن مد چین خوردگی لوله می باشد. بنابراین به منظور مقایسه پارامترهای جذب انرژی طول لهیدگی از ۰ تا ۹۰ میلی متر در نظر گرفته می شود.



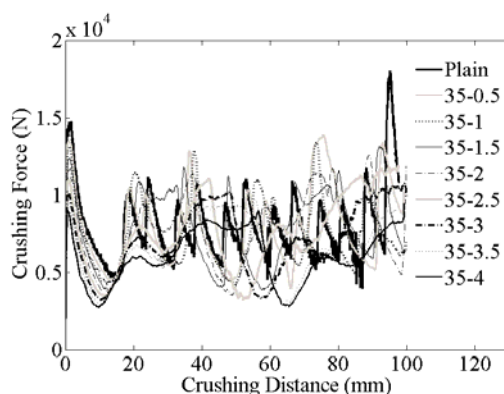
(الف)



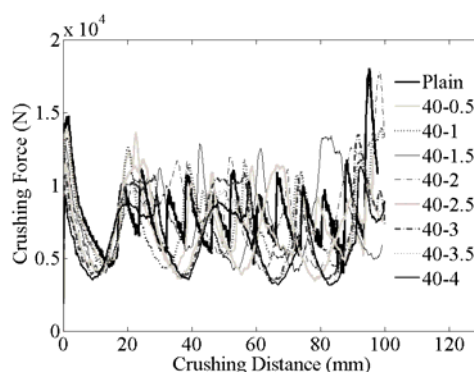
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل ۵- نمودار نیرو- جا به جایی در لهیدگی استاتیکی لوله الگودار با طول موج و عمق های مختلف الگو:

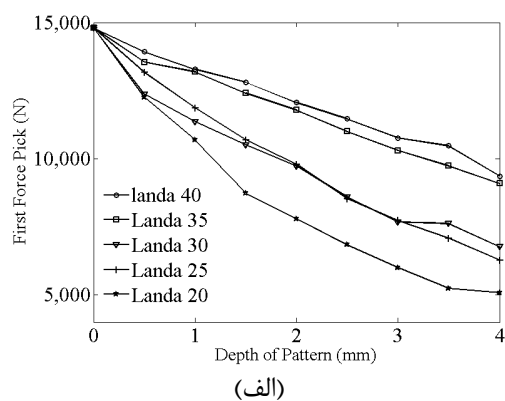
(الف) طول موج ۲۰ میلی متر، (ب) طول موج ۲۵ میلی متر، (ج) طول موج ۳۰ میلی متر،

(د) طول موج ۳۵ میلی متر و (ه) طول موج ۴۰ میلی متر

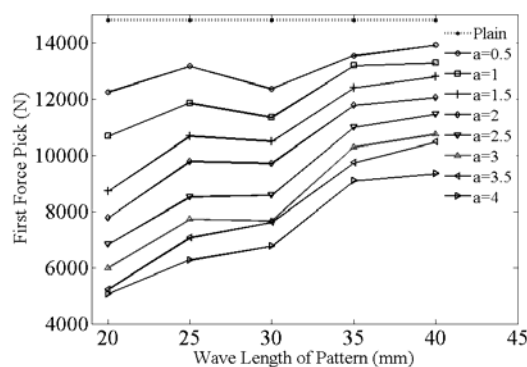
۴-۲- قله اولیه نیرو

قله اولیه نیرو از پارامترهای مهم در انتخاب جاذب به شمار می آید. شکل (۶) تغییرات قله اولیه نیرو را با تغییر در طول موج و عمق الگو نشان می دهد. مطابق شکل (۶) (الف) می توان گفت با افزایش عمق الگو قله اولیه نیرو کاهش می یابد. همچنین به طور کلی با افزایش طول موج الگو قله اولیه نیرو افزایش می یابد. البته در طول موج ۳۰ میلی متر در برخی از عمق های الگو کاهش قله اولیه نیرو دیده می شود. در تمامی حالت ها قله اولیه نیرو در لوله الگو دار کمتر از لوله با جداره صاف می باشد. یکی از ویژگیهای مطلوب جاذب انرژی قله اولیه کمینه می باشد.

بر این اساس در الگو با طول موج ۲۰ میلی متر و عمق ۴ میلی متر کمینه قله اولیه نیرو اتفاق می افتد که برابر با ۵۰۰۰ نیوتن می باشد. این مقدار حدوداً یک سوم قله اولیه نیرو در لوله با جداره بدون الگو می باشد.



(الف)



(ب)

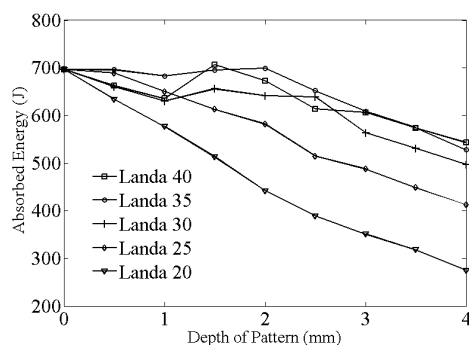
شکل ۶- تغییر قله اولیه نیرو به ازای طول موج و عمق های الگوی مختلف:
 (الف) قله اولیه نیرو برحسب عمق الگو، (ب) قله اولیه نیرو بر حسب طول موج الگو

۴-۳- انرژی جذب شده

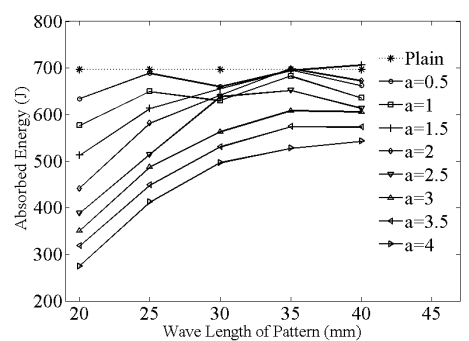
پارامتر اصلی دیگری که در تحلیل جذب انرژی اهمیت دارد میزان انرژی جذب شده می باشد. این پارامتر را می توان با استفاده از نمودار نیرو جابه جایی به دست آورد. در حقیقت سطح زیر نمودار نیرو جابه جایی برابر با انرژی جذب شده می باشد. شکل (۷) انرژی جذب شده در حالت های مختلف تا فاصله لهیدگی ۹۰ میلی متر را که رفتار لهیدگی منظم می باشد نشان می دهد.

مطابق با شکل (۷) (ب) مشخص می باشد به طور کلی با افزایش طول موج الگو انرژی جذب شده افزایش می یابد. همچنین در یک عمق الگو، با افزایش طول موج شیب افزایش انرژی جذب شده کاهش می یابد. در عوض با افزایش عمق الگو به طور کلی انرژی جذب شده کاهش می یابد.

انرژی جذب شده در لوله با جداره ساده نسبت به تمامی حالت ها الگودار به جز حالت الگو با طول موج ۴۰ و عمق ۱،۵ میلی متر بیشتر می باشد. کمینه انرژی جذب شده مربوط به طول موج ۲۰ و عمق ۴ میلی متر می باشد. با مقایسه انرژی جذب شده به عنوان یک پارامتر مطلوب با قله اولیه نیرویی که یک پارامتر نامطلوب محسوب می شود می توان نتیجه گرفت که این دو پارامتر مخالف هم عمل می کنند. بدین معنی که حالت الگو با طول موج ۲۰ و عمق ۴ میلی متر که در مورد قله نیروی اولیه بهترین ترکیب الگو می باشد در رابطه با انرژی جذب شده بدترین حالت می باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۷- انرژی جذب شده به ازای طول موج و عمق های الگوی مختلف:

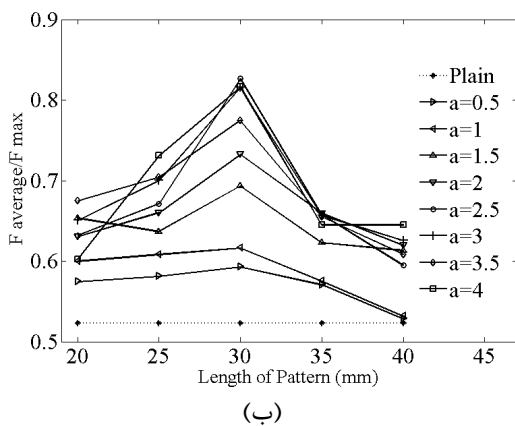
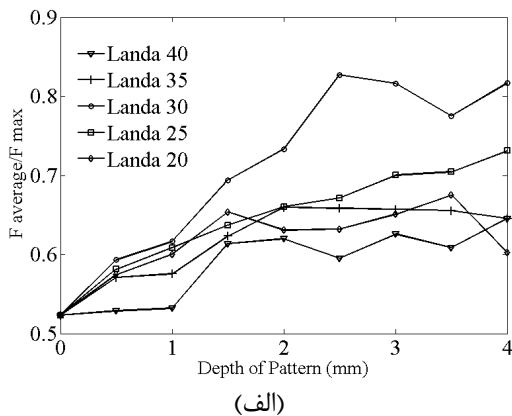
(الف) انرژی جذب شده بر حسب عمق الگو، (ب) انرژی جذب شده بر حسب طول موج الگو

۴-۴- بازده نیروی لهیدگی

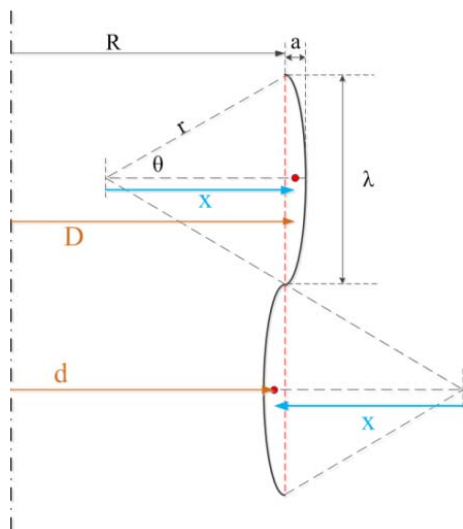
از دیگر ویژگی های مهم یک جاذب انرژی مناسب یکنواخت بودن نسبی نمودار نیرو جابه جایی می باشد. به عبارت دیگر مطلوب است که اختلاف قله ها و دره ها در نمودار نیرو جابه جایی کمینه باشد. این موضوع را می توان با تعریف پارامتر نسبت نیروی متوسط به قله اولیه نیرو تعریف نمود. نیروی متوسط را می توان به کمک انرژی جذب شده به دست آورد. با تقسیم کردن انرژی جذب شده به طول لهیدگی (در اینجا برابر با ۹۰ میلی متر می باشد) می توان نیروی متوسط را به دست آورد. شکل (۸) تغییرات نسبت نیروی متوسط به قله اولیه نیرو را به ازای طول موج و عمق های مختلف الگو نشان می دهد.

مطابق شکل (۸) مشخص می شود رفتار نمودارها به صورت اکیدا صعودی و یا نزولی نمی باشد و اکسترمم هایی قابل مشاهده می باشد. لوله با دیواره صاف، دارای افت و خیزهای فراوان بوده و از این حیث نسبت نیروی متوسط به قله اولیه نیرو کمینه می باشد.

به طور کلی با افزایش عمق الگو نسبت نیروی متوسط به قله اولیه افزایش می یابد. این در حالی است که با افزایش طول موج الگو ابتدا این نسبت افزایش و سپس کاهش می یابد. از آنجایی که بهینه ترین حالت نسبت نیروی متوسط به قله اولیه نیرو حالت بیشینه آن است می توان گفت الگوها با طول موج ۳۰ و ۲,۵ و ۴ بهترین حالت ها می باشند. کمینه نسبت نیروی متوسط به قله نیروی اولیه مربوط به طول موج ۴۰ و عمق ۰,۵ میلی متر می باشد.



شکل ۸- نسبت نیروی متوسط به قله اولیه نیرو به ازای طول موج و عمق های الگوی مختلف: (الف) نسبت نیروی متوسط به قله اولیه نیرو بر حسب عمق الگو، (ب) نسبت نیروی متوسط به قله اولیه نیرو بر حسب طول موج الگو



شکل ۹- هندسه بخشی از لوله به همراه الگوی برآمده و تورفته به صورت کمائی از دایره

۴-۵- انرژی مخصوص جذب

با توجه به اینکه جذب های انرژی به طور گسترده در وسایل نقلیه استفاده می گردند شاید مهمترین پارامتر در انتخاب آنها انرژی مخصوص جذب می باشد. این پارامتر برابر با میزان انرژی جذب شده در واحد جرم می باشد. با توجه به ثابت بودن طول لوله ها در تمامی حالت های الگودار، جرم لوله ها اندکی با هم متفاوت می باشند. بنابراین اولین گام محاسبه جرم لوله ها با هندسه مختلف الگو می باشد. برای محاسبه جرم لوله های الگودار از قضیه پایپوس-گلدینوس استفاده می شود. شکل (۹) استفاده از قضیه پایپوس-گلدینوس برای محاسبه حجم لوله الگودار را نشان می دهد.

شکل (۹) الگوی ایجاد شده در دیواره لوله با شعاع متوسط R را نشان می دهد. از آنجا که الگوها به صورت پیوسته روی دیوار شکل می گیرند به صورت یک در میان بر روی دیواره لوله برآمدگی و فرورفتگی دیده می شود. الگو به صورت کمانی از دایره با شعاع r می باشد که به اندازه 2θ امتداد یافته است. طول موج الگو λ و عمق آن a می باشد.

با توجه به طول موج و عمق الگو، شعاع کمان و زاویه θ به کمک معادله (۲) و (۳) محاسبه می شود.

$$r = \frac{a}{2} + \frac{\lambda^2}{8a} \quad (2)$$

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2r}\right) \quad (3)$$

مساحت جداره به صورت کمانی از دایره به کمک معادله (۴) محاسبه می شود.

$$A = \int_{-\theta}^{\theta} dA = 2 \int_0^{\theta} dA = 2tr\theta + t^2\theta \quad (4)$$

مرکز سطح این کمان از جداره لوله به کمک معادله (۵) محاسبه می شود.

$$x = \frac{\int_{-\theta}^{\theta} r \cos \theta dA}{A} \cong \frac{2tr^2 \sin \theta}{A} \quad (5)$$

حال حجمی که از دوران این کمان دایره حول محور استوانه ایجاد می شود را می توان به کمک تئوری پایپوس-گلدینوس به دست آورد. در این حالت حجم قسمت برآمده از معادله (۶) و حجم قسمت تورفته از معادله (۷) به دست می آید.

$$V = 2\pi DA = 2\pi A(R + a - r + x) \quad (6)$$

$$V' = 2\pi dA = 2\pi A(R - a + r - x) \quad (7)$$

سپس، با در نظر گرفتن چگالی می توان جرم جداره این کمان از دایره را به دست آورد. در اینجا با در نظر گرفتن تعداد تکرارهای برآمده و فرو رفته به ازای طول موج ها و عمق های مختلف الگو جرم لوله های مختلف محاسبه شد. جدول (۵) جرم لوله را به ازای طول موج ها و عمق های مختلف الگو بر حسب گرم نشان می دهد.

جدول ۵- جرم لوله ها به ازای طول موج و عمق های مختلف الگو بر حسب گرم

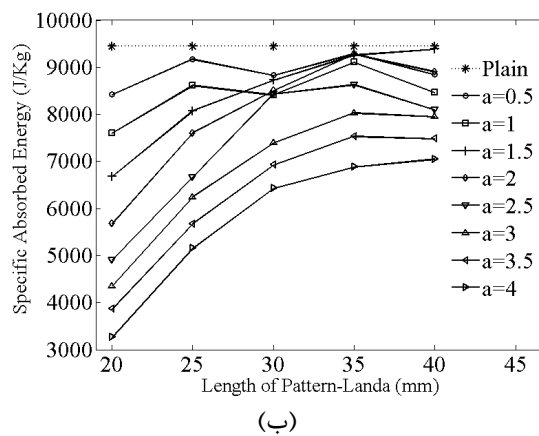
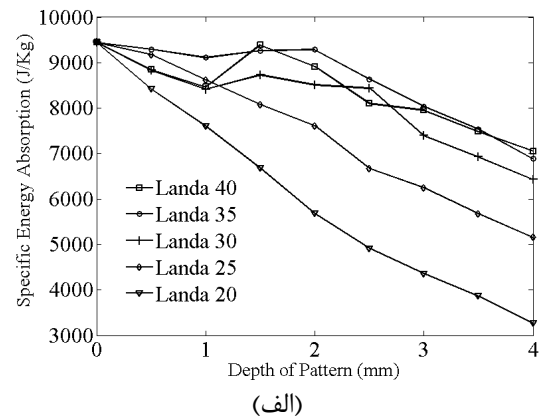
					طول موج (mm)
۴۰	۳۵	۳۰	۲۵	۲۰	عمق (mm)
۷۳/۸	۷۳/۸	۷۳/۸	۷۳/۸	۷۳/۸	۰
۷۳/۹	۷۴	۷۴	۷۴/۱	۷۴/۲	۰/۵
۷۴/۲	۷۴/۲	۷۴/۳	۷۴/۵	۷۵	۱
۷۴/۶	۷۴/۵	۷۴/۶	۷۵/۲	۷۶/۱	۱/۵
۷۵/۱	۷۴/۹	۷۵/۱	۷۶/۱	۷۷/۴	۲
۷۵/۶	۷۵/۳	۷۵/۶	۷۷	۷۸/۹	۲/۵
۷۶/۲	۷۵/۹	۷۶/۲	۷۸/۱	۸۰/۶	۳
۷۶/۹	۷۶/۵	۷۶/۹	۷۹/۳	۸۲/۶	۳/۵
۷۷/۵	۷۷/۲	۷۷/۷	۸۰/۶	۸۴/۷	۴

با توجه به جدول (۵) مشاهده می شود حضور الگوها در اندازه جرم لوله موثر بوده به قسمتی که بیشترین افزایش جرم، نسبت به لوله با جداره صاف، مربوط به الگو با طول موج ۲۰ و عمق ۴ میلی متر بوده که این به میزان حدود ۱۵ درصد بیشتر می باشد. با استفاده از داده های موجود در جدول (۵) و میزان انرژی جذب شده می توان پارامتر انرژی مخصوص جذب برای هر لوله را به دست آورد. شکل (۱۰) میزان انرژی مخصوص جذب را برای لوله ها با الگوهای مختلف نشان می دهد.

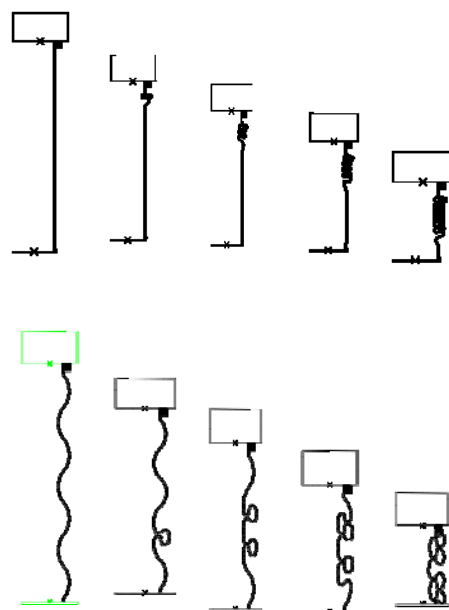
مطابق شکل (۱۰) مشاهده می شود به طور کلی با افزایش طول موج انرژی مخصوص جذب آن افزایش می یابد. مورد استثنا در این رابطه طول موج ۳۵ میلی متر می باشد که میزان انرژی مخصوص جذب بالایی دارد و در مواردی حتی از طول موج ۴۰ میلی متر هم پاسخ های بهتری نشان می دهد. همچنین به صورت کلی با افزایش عمق الگو انرژی مخصوص جذب کاهش می یابد. در برخی از طول موج ها افزایش در انرژی مخصوص جذب شده با افزایش عمق الگو در محدوده ۰,۵ تا ۱,۵ دیده می شود. کمینه میزان انرژی مخصوص جذب مربوط به طول موج ۲۰ و عمق ۴ میلی متر می باشد و بیشینه انرژی مخصوص جذب مربوط به طول موج ۴۰ و عمق ۱,۵ میلی متر می باشد.

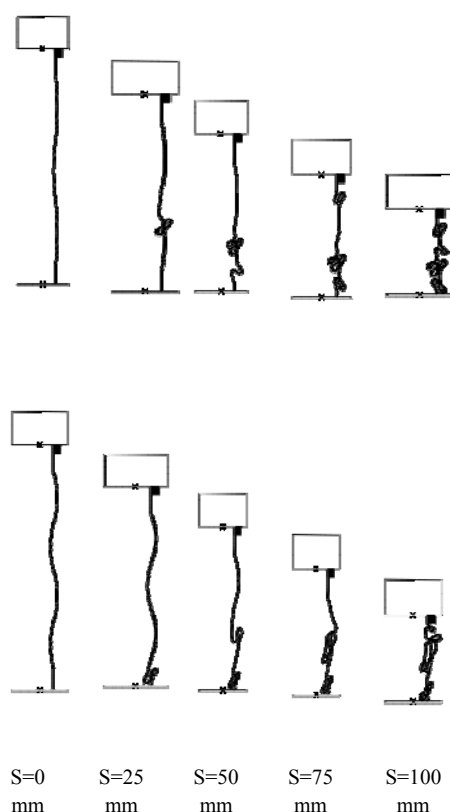
۴-۶- مود تغییر شکل

نکته حائز اهمیت دیگر مود تغییر شکل و لهیدگی در لوله های جاذب می باشد. شکل (۱۱) نمونه هایی از تکامل چین خوردگی را با افزایش فاصله لهیدگی نشان می دهد. مطابق شکل می توان دریافت نحوه تکامل چین خوردگی ها شدیداً به شرایط الگو بستگی دارد. همچنین مکان شروع چین خوردگی ها و نحوه ارتباط چین خوردگی های مختلف در مقاطع مختلف از فاصله لهیدگی بر حسب پارامترهای الگو تغییر می کند. چین خوردگی در حالت طول موج ۴۰ و عمق ۱,۵ ابتدا از مقاطع مرکزی لوله شروع شده؛ سپس چین خوردگی دوم و سوم با طول های بسیار کوتاه بلافاصله بر روی چین خوردگی اول شکل می گیرند.



شکل ۱۰- انرژی مخصوص جذب به ازای طول موج و عمق های الگوی مختلف:
 (الف) انرژی مخصوص جذب بر حسب عمق الگو، (ب) انرژی مخصوص جذب بر حسب طول موج الگو





شکل ۱۱- چگونگی شکل گیری چین خوردگی در لوله های جدار نازک الگو دار از بالا: ردیف اول- لوله با جداره صاف، ردیف دوم- الگو با طول موج ۲۰ و عمق ۴ میلی متر، ردیف سوم- الگو با طول موج ۴۰ و عمق ۱٫۵ میلی متر و ردیف چهارم- الگو با طول موج ۳۰ و عمق ۲٫۵ میلی متر

این در حالی است که در حالت طول موج ۳۰ و عمق ۲٫۵ شروع چین خوردگی از انتهای لوله می باشد، چین خوردگی ها با طول بلند شکل می گیرد و چین خوردگی دوم در مرکز لوله و بدون ارتباط به چین خوردگی اولیه شکل می گیرد.

۴-۷- انتخاب جاذب ها با ویژگی های بهینه

با توجه به موارد حائز اهمیت در انتخاب جاذب انرژی مشخص است که شاید از نقطه نظر پارامترهای مختلف، لوله ها با الگوهای متفاوت مناسب به نظر آیند. براساس این پارامترهای ارائه شده الگوهایی که خواص مثبتی نسبت به یک پارامتر خاص ایجاد کرده اند در جدول (۶) نشان داده شده اند. با توجه به مقادیر ارائه شده در جدول (۶) می توان بیان کرد که بهینه ترین حالت مربوط به طول موج ۴۰ و عمق ۱٫۵ متر می باشد. در این حالت با حفظ تقریبی انرژی مخصوص جذب نسبت به لوله با جداره صاف قله اولیه نیرو به اندازه تقریباً ۱۴٪ کاهش، نسبت نیروی متوسط به نیروی بیشینه به اندازه ۱۵٪ افزایش و وزن آن تنها به اندازه ۱٪ افزایش داشته است. لوله با طول موج ۲۰ و عمق ۴۰ اگر چه قله اولیه نیرو را به اندازه ۳ برابر کاهش می دهد اما در عین آن که وزن را به اندازه ۱۵٪ افزایش می دهد، انرژی مخصوص جذب را به اندازه حدود ۳ برابر کاهش می دهد و از این نقطه نظر نامناسب می باشد.

جدول ۶- الگوهای مورد توجه به منظور انتخاب الگوی بهینه

مد تغییر شکل	انرژی مخصوص جذب	نسبت نیروی متوسط به نیروی بیشینه	قله اولیه نیرو	عمق	طول موج
نامنظم	۹۴۴۴	۰/۵۲۳	۱۴۸۰۰	۰	۰
منظم	۹۴۰۶	۰/۵۷۱	۱۳۵۴۹	۰/۵	۳۵
نامنظم	۹۴۷۸	۰/۶۱۴	۱۲۸۰۲	۱/۵	۴۰
نامنظم	۸۴۵۱	۰/۸۲۷	۹۷۲۵	۲/۵	۳۰
نامنظم	۶۹۳۷	۰/۸۱۶	۶۷۶۴	۴	۳۰
منظم	۳۲۴۷	۰/۶۰۲	۵۰۷۲	۴	۲۰

۵- نتیجه گیری

در این مقاله اثر ایجاد الگوهای محیطی به صورت کمانی از دایره بر خواص جذب انرژی لوله های آلومینیومی در لهیدگی استاتیکی بررسی شد. ابتدا مدل المان محدود لوله با جداره صاف و بدون الگو ساخته و با نتایج تجربی ارائه شده در تحقیقات پیشین مقایسه و ارزش گذاری شد. سپس اثر الگو با طول موج و عمق های مختلف بر پارامترهای جذب انرژی از قبیل قله نیرویی اولیه، انرژی جذب شده، انرژی مخصوص جذب، نسبت نیروی متوسط به قله نیروی اولیه و مد تغییر شکل بررسی شد.

نتایج نشان می دهند از نقطه نظر پارامترهای مختلف جذب انرژی، الگوهای متفاوتی می توانند به عنوان پاسخ بهینه انتخاب شوند. به صورت کلی، الگو با طول موج ۴۰ و عمق ۱،۵ میلی متر با حفظ تقریبی انرژی مخصوص جذب نسبت به لوله با جداره صاف قله اولیه نیرو به اندازه تقریباً ۱۴٪ کاهش، نسبت نیروی متوسط به نیروی بیشینه به اندازه ۱۵٪ افزایش و وزن آن تنها به اندازه ۱٪ افزایش داشته است.

مراجع

- [1] Zhang, X., Wen, Z., and Zhang, H., "Axial Crushing and Optimal Design of Square Tubes with Graded Thickness", *Thin-Walled Structures*, Vol. 84, pp. 263–274, (2014).
- [2] AlaviNia, A., and Parsapour, M., "An Investigation on the Energy Absorption Characteristics of Multi-cell Square Tubes", *Thin-Walled Structures*, Vol. 68, pp. 26–34, (2013).
- [3] AlaviNia, A., and Parsapour, 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*, Vol. 74, pp. 155–165, (2014).
- [4] Zarei, H.R., and Kröger, M., "Crashworthiness Optimization of Empty and Filled Aluminum Crash Boxes", *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 12, No. 3, pp. 255–264, (2007).

- [5] Zarei, H.R., and Kroger, M., "Optimization of the Foam-filled Aluminum Tubes for Crush Box Application", *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, pp. 214–221, (2008).
- [6] Zarei, H.R., and Kroger, M., "Optimum Honeycomb Filled Crash Absorber Design", *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 193–204, (2008).
- [7] Mirzaei, M., Shakeri, M., Sadighi, M., and Akbarshahi, H., "Experimental and Analytical Assessment of Axial Crushing of Circular Hybrid Tubes under Quasi-static Load", *Composite Structures*, Vol. 94, pp. 1959–1966, (2012).
- [8] Toksoy, A.K., and Guden, M., "Partial Al Foam Filling of Commercial 1050H14 Al Crash Boxes, The Effect of Box Column Thickness and Foam Relative Density on Energy Absorption", *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, pp. 482–494, (2010).
- [9] Ghamarian, A., and TahayeAbadi, M., "Axial Crushing Analysis of End-capped Circular Tubes", *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, pp. 743–752, (2011).
- [10] Niknejad, A., Abdolzadeh, Y., Rouzegar, J., and Abbasi, M., "Experimental Study on the Energy Absorption Capability of Circular Corrugated Tubes under Lateral Loading and Axial Loading", *Proceeding of Mechanical Engineering, IMechE Part D: J Automobile Engineering*, Vol. 1, No. 23, pp. 654–667, (2015).
- [11] Salehghaffari, S., Tajdari, M., Panahi, M., and Mokhtarnezhad, F., "Attempts to Improve Energy Absorption Characteristics of Circular Metal Tubes Subjected to Axial Loading", *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, pp. 379–390, (2010).
- [12] Salehghaffari, S., Rais-Rohani, M., and Najafi, A., "Analysis and Optimization of Externally Stiffened Crush Tubes", *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, pp. 397–408, (2011).
- [13] Darvizeh, A., Darvizeh, M., Ansari, R., and Meshkinzar, A., "Effect of Low Density, Low Strength Polyurethane Foam on the Energy Absorption Characteristics of Circumferentially Grooved Thick-walled Circular Tubes", *Thin-Walled Structures*, Vol. 71, pp. 81-90, (2013).
- [14] Eyvazian, A., Habibi, M.K., Magid Hamouda, A., and Hedayati, R., "Axial Crushing Behavior and Energy Absorption Efficiency of Corrugated Tubes", *Materials and Design*, Vol. 54, pp. 1028-1038, (2014).
- [15] Chen, D.H., and Ozaki, S., "Numerical Study of Axially Crushed Cylindrical Tubes with Corrugated Surface", *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, pp. 1387-1396, (2009).
- [16] Liu, Z., Hao, W., Xie, J., Lu, J., Huang, R., and Wang, Z., "Axial-impact Buckling Modes and Energy Absorption Properties of Thin-Walled Corrugated Tubes with Sinusoidal Patterns", *Thin Walled Structures*, Vol. 94, pp. 410-423, (2015).

فهرست نمادهای انگلیسی

مدول الاستیک	E
کرنش	ε
تنش تسلیم	σ_y
مدول پلاستیک	E_h
شعاع الگوی دایروی	r
عمق الگوی دایروی	a
طول موج الگوی دایروی	λ
زاویه الگوی دایروی	θ
مساحت مقطع یک کمان دایروی از لوله	A
ضخامت دیواره	t
مرکز سطح الگوی دایروی از مرکز کمان	x
حجم الگوی دایروی برآمده (محدب)	V
حجم الگوی دایروی فرورفته (مقعر)	V'
مرکز سطح الگوی دایروی برآمده از محور لوله	D
مرکز سطح الگوی دایروی فرورفته از محور لوله	d
شعاع متوسط لوله	R

Abstract

Energy absorbers are used to store undesirable energy. Thin walled tubes are one of the most common energy absorbing components in. In this paper energy absorption of aluminum tubes with circumferential pattern is investigated. The pattern with different wave length and amplitude is made on the tube's wall.

Then, using numerical simulation, static energy absorbing characteristics of different tubes are investigated. The goal is to study the effect of pattern geometry on tube's energy absorbing characteristics. Findings show that in some parameters related to energy absorption, the values for tubes with and without pattern are somewhat similar. However, generally speaking results show that producing patterns with certain geometrical properties can considerably increase the capacity of tubes in energy absorption.