

فصل اول

مقدمه

یکی از مسائلی که امروزه بیش از پیش مورد توجه طراحان قرار گرفته، افزایش ایمنی وسایل و ابزارها به خصوص وسایل حمل و نقل است که مهم‌ترین هدف آن کاهش صدمات جانی و مادی در تصادف‌ها می‌باشد. در هنگام بروز تصادف، انرژی جنبشی وسیله به طریقی باید دفع شود تا به سایر قسمت‌های مهم و آسیب‌پذیر نرسد. بخش مهم در خودرو از نظر حفظ ایمنی، فضای داخل یا کابین سرنشینان است که پس از تصادف تا حد امکان باید بدون له‌شدگی و تورفتگی باشد. در سه دهه‌ی اخیر پیشرفت‌های زیادی در خصوص افزایش ایمنی خودروها صورت گرفته و در کنار آن استاندارد-هایی نیز ارائه گردیده که خودروسازان ملزم به رعایت آن‌ها هستند. موسسه‌هایی با عنوان¹ NCAP اقدام به آزمایش خودروها نموده‌اند که بر حسب میزان ایمنی خودروها به آن‌ها امتیاز می‌دهند. این امتیازها از یک تا پنج ستاره می‌باشد. خودروهای دارای چهار و پنج ستاره خودروهای ایمن،

¹ New Car Assessment Programmes

خودروهای با سه ستاره خوردروهای نیمه ایمن و از سه ستاره به پایین خودروهای غیر ایمن معرفی شده‌اند. از خودروهای موجود در بازار داخلی که توسط خودروسازان داخلی مونتاژ یا تولید می‌شوند، می‌توان به خودروهای پژو ۲۰۶، رنو لوگان و سمند LX اشاره کرد که همگی دارای سه ستاره می‌باشند. در شکل ۱-۱، تصویر آزمایش تصادف خودروهای لوگان و پژو ۲۰۶ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: تصاویر مربوط به آزمایش تصادف خودروی رنو لوگان (سمت راست) و پژو ۲۰۶ (سمت چپ) توسط Euroncap [۱].

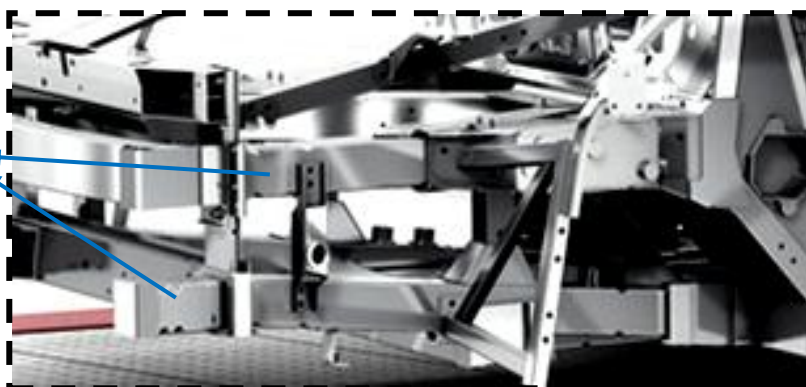
برای کاهش صدمات ناشی از برخوردها باید انرژی تصادف به طریقی کنترل شود. یکی از روش‌های کنترل، استفاده از جاذب انرژی می‌باشد. در واقع، جاذب‌های انرژی قطعاتی هستند که کل انرژی جنبشی و یا بخشی از آن را به شکل دیگری از انرژی تبدیل می‌کنند. این جاذب‌ها باید به اندازه کافی محکم و در عین حال انعطاف پذیر باشند تا از طریق تغییر شکل که عموماً تاخوردگی است، انرژی جنبشی را جذب و از رسیدن صدمه به مسافران و قسمت‌های حساس، جلوگیری کنند. از طرف دیگر، جاذب‌ها باید از لحاظ وزنی نیز بهینه باشند تا با کمترین افزایش وزن برای سازه، بیشترین قابلیت جذب انرژی را دارا باشند.

از آلیاژهای آلومینیم به عنوان جاذب انرژی در اشکال گوناگون استفاده می‌شود که مهم‌ترین علت آن نسبت بزرگ مقاومت بر وزن می‌باشد. به دلیل چگالی پایین آلیاژ آلومینیم نسبت به فولاد، می‌توان با جایگزین کردن قطعات آلومینیمی با قطعات فولادی، وزن سازه را تا حد زیادی کاهش داد. به همین خاطر، در خودروهای امروزی از آلیاژهای آلومینیم به طور گسترده‌ای در سپر جلو و عقب، محورهای

عرضی و طولی و همچنین در سایر قسمت‌ها مانند قاب فضایی، شاسی و موتور استفاده می‌شود. یکی از شرکت‌های خودروسازی که در زمینه بکارگیری تکنولوژی روز جهت افزایش ایمنی خودرو و کاهش صدمات ناشی از تصادف، بسیار فعال است، شرکت آئودی^۱ می‌باشد. در تازه‌ترین خودروی ساخته شده توسط این شرکت که با نام R8 معرفی شده، تمامی قاب شاسی فضایی، قطعات داخلی و بدنه از آلیاژ-های مقاوم و سبک آلومینیم و در قسمت‌هایی از فیبرکربن استفاده شده است. در این خودرو از جاذب‌های انرژی آلومینیمی جهت کاهش صدمه به سرنشینان و جذب انرژی تصادف استفاده شده است. در شکل ۲-۱ تصویر شاسی فضایی خودروی R8 به همراه جاذب‌های انرژی آن نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

جاذب انرژی به شکل
لوله‌ی مربعی

شکل ۲-۱: الف) شاسی و جاذب‌های انرژی خودروی آئودی R8 ب) نمای نزدیک تر^۲.

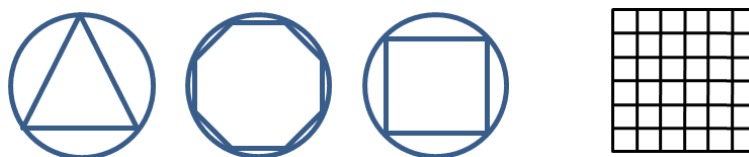
^۱ Audi

در پژوهش‌ها و طراحی سازه‌های جاذب انرژی، قابلیت جذب انرژی در کنار وزن سازه از اهمیت بالایی برخوردار است. بر همین اساس پارامتری تحت عنوان انرژی جذب شده‌ی مخصوص^۱ SEA که نسبت انرژی جذب شده بر واحد جرم سازه است، تعریف می‌شود. بیشینه بودن این مقدار در قیاس با طرح‌های پیشین، هدف طراحان و پژوهشگران می‌باشد.

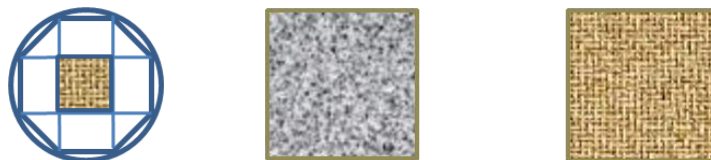
جاذب‌های انرژی از لحاظ هندسه به شکل‌های مختلف استوانه، مخروط ناقص، لوله‌ی مربعی، چندضلعی و چندسلولی تقسیم می‌شوند که به‌طور جداگانه و یا همراه با فوم‌های پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرند. تعدادی از مهم‌ترین جاذب‌های انرژی به شکل مقاطع جدار نازک در شکل ۳-۱ نشان داده شده است.



الف) لوله‌ها با مقطع چندضلعی، دایره، مربع و مخروط ناقص



ب) لوله‌ها با مقطع چندسلولی و مقاطع مرکب از چند مقطع هندسی

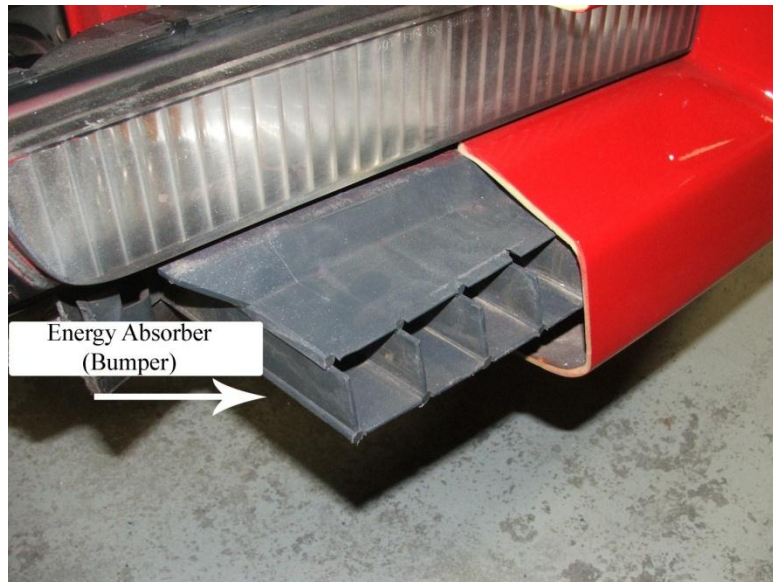


ج) لوله‌های پر شده با فوم پلیمری و فوم فلزی و حالت ترکیبی

شکل ۳-۱: مهم‌ترین مقاطع و شکل‌های مختلف استفاده شده به‌عنوان جاذب انرژی.

¹ Specific Energy Absorption

در تعدادی از خودروها، جاذب‌های انرژی برای جذب ضربه‌های وارده به خودرو، در درون سپر تعبیه شده‌اند. نمونه‌ای از این جاذب‌ها در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: جاذب انرژی چندسلولی در سپر عقب خودرو [۳].

در دهه اخیر سازه‌های جاذب انرژی در حالت جدار نازک به شکل چندسلولی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. این سازه‌ها در حالت ساخت انبوه، به روش اکستروژن ساخته می‌شوند که در تعداد بالای تولید، از لحاظ هزینه دارای صرفه اقتصادی می‌باشد و همچنین، به دلیل افزایش وزن اندک سازه در اثر چندسلولی شدن، نسبت به افزایش قابلیت جذب انرژی آن، جهت استفاده در طرح‌های صنعتی بسیار کاربردی می‌باشد. در نتیجه، تحقیق و بررسی پیرامون این سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است.

فصل دوم

پیشینه‌ی پژوهش

در سه دهه اخیر، تعداد زیادی آزمایش تجربی، شبیه‌سازی عددی و بررسی تئوری به‌منظور درک بهتری از مکانیزم له‌شدگی سازه‌های جدار نازک و خصوصیات آن‌ها در قالب کمانش، نیروی متوسط له‌شدگی، نوع تاخوردگی و مقدار انرژی جذب شده توسط چین‌خوردگی‌های خمیری تحت بارهای محوری شبه‌استاتیکی و دینامیکی انجام شده است. مطالعات صورت گرفته بر روی لوله‌های فولادی و آلومینیومی در بعضی موارد به‌همراه فوم‌های پلیمری بوده است.

بارگذاری محوری لوله‌های جدارنازک با مقطع دایره‌ای اولین بار به‌صورت نظری توسط الکساندر^۱ [۴] در سال ۱۹۶۰ مورد بررسی قرار گرفت. از آن پس، چین‌خوردگی لوله‌های جدار نازک به‌عنوان یک مکانیزم برای جذب انرژی معرفی شد. آزمایش‌های تجربی و بررسی‌های تئوری به‌منظور بررسی لوله‌ها با مقاطع دایره و مربع در حالت شبه‌استاتیکی و دینامیکی در سال‌های ۱۹۸۳ تا ۱۹۸۹ توسط

^۱ Alexander

آبراموویچ و ویرزبیکي^۱ [۶،۵]، آبراموویچ و جونز^۲ [۸،۷] و اندرو^۳ و همکارانش [۹] انجام شد. مطالعات تجربی آبراموویچ و جونز بر روی لوله‌های مربعی ساخته شده از فولاد نرم نشان داد که در له‌شدگی نمونه‌ها دو حالت متقارن و نامتقارن پدید می‌آید. با توجه به نتایج تجربی، تئوری^۴ SFE بر پایه خمش در تاخوردگی‌ها و تغییر شکل در سازه برای مقطع مربعی و مقاطع چندگوشه^۵ توسط آبراموویچ و ویرزبیکي ارائه شد.

پایه و اساس تئوری SFE، بررسی لوله‌های خمیری به‌وجود آمده در تاخوردگی‌ها می‌باشد. تئوری مذکور برای پیش‌بینی نیروی متوسط له‌شدگی مقاطع چندگوشه‌ای استفاده می‌شود. در تحلیل‌های تئوری به‌طور معمول از اثر بار دینامیکی صرف‌نظر شده و له‌شدگی‌ها تحت بارهای استاتیکی و دینامیکی یکسان فرض می‌شود. البته آبراموویچ و ویرزبیکي تئوری مذکور را به‌منظور در نظر گرفتن اثر نرخ کرنش اصلاح کردند [۳]. تئوری مربوط به چین‌خوردگی لوله‌های مربعی به‌منظور پیش‌بینی نیروی متوسط له‌شدگی توسط آن‌ها ارائه گردید. رابطه تئوری ارائه شده توسط آن‌ها در پژوهش‌های بعدی به‌منظور نزدیک شدن به نتایج تجربی اصلاح شد [۵]. در سال ۱۹۹۶ لانگست و هاپرستاد^۶ [۱۰] آزمایش‌هایی بر روی نمونه‌های مربعی آلومینیمی تحت بار استاتیکی و دینامیکی انجام دادند و نشان دادند که نیروی متوسط له‌شدگی در حالت دینامیکی از حالت استاتیکی بیشتر است.

روند چین‌خوردگی برای مقاطع دایره‌ای و مربعی شبیه به یکدیگر می‌باشد به‌طوری که در نمودار نیرو-جابجایی آن‌ها ابتدا یک پیشینه نیرو و سپس نوسان وجود دارد.

مقاطع دایره‌ای، مربعی، مثلثی و مخروطی در سال ۲۰۱۰ توسط علوی‌نیا و همدانی [۱۱] با استفاده از شبیه‌سازی عددی و آزمایش‌های تجربی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. در آزمایش‌های

¹ Abramowicz and Wierzbicki

² Jones

³ Andrews

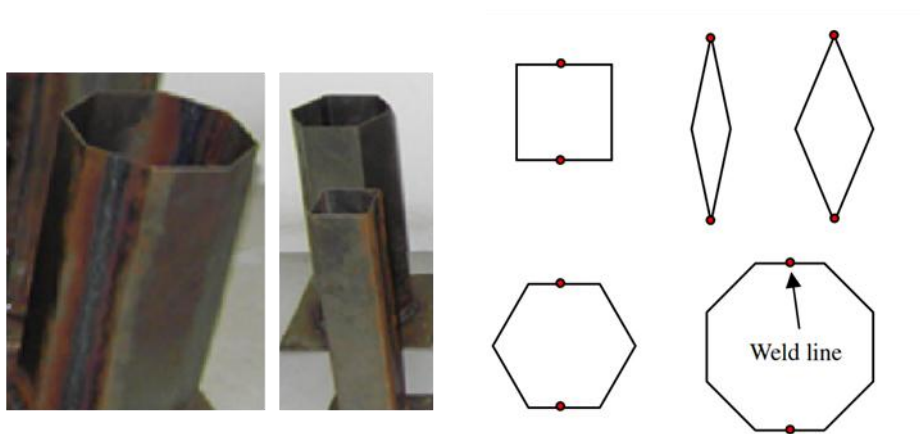
⁴ Super Folding Element

⁵ Multi Corner

⁶ Langseth and Hopperstad

آن‌ها از ورق‌های آلومینیم و جوشکاری آرگون جهت اتصال ورق‌ها استفاده شد. در آن تحقیق همچنین، از اثرات خط جوش بر روی نتایج صرف‌نظر گردید.

مقاطع هشت‌ضلعی توسط مامالیز^۱ و همکارانش در سال ۱۹۹۱ [۱۲] مورد بررسی تئوری و تجربی قرار گرفت. این تئوری در مطالعات دیگری با شبیه‌سازی‌های عددی و آزمایش‌های تجربی نمونه‌های جوشکاری شده در سال ۲۰۰۳ [۱۳] مقایسه شدند. مقاطع چند ضلعی در حالت لوزی، مربعی، شش‌ضلعی و هشت‌ضلعی به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی توسط زیونگ ژانگ و هو ژانگ^۲ در سال ۲۰۱۲ [۱۴] مورد بررسی قرار گرفت. مقاطع آزمایش شده توسط آن‌ها در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: مقاطع بررسی شده توسط زیونگ ژانگ و هو ژانگ [۱۴].

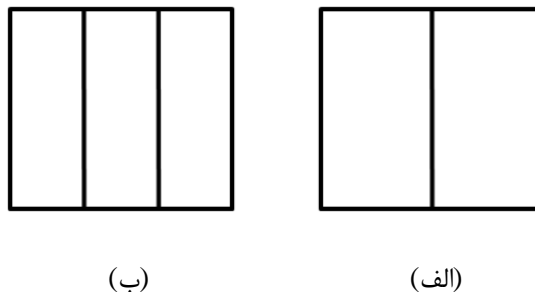
در بررسی صورت گرفته توسط آن‌ها از تئوری‌های ارائه شده در بررسی‌های مامالیز [۱۰]، جهت پیش‌بینی نیروی متوسط له‌شدگی استفاده شد. نمونه‌های ساخته شده‌ی آن‌ها از ورق‌های فولادی تهیه شده بودند. به منظور کاهش اثرات جوش در ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی، برای هر نمونه از دو خط جوش به صورت قرینه و در وسط اضلاع استفاده گردید. این محققان در بررسی‌های خود به دلیل تاثیر کم جوش بر نتایج از اثرات جوش صرف‌نظر و در شبیه‌سازی‌ها از نمونه‌های بدون جوش استفاده

¹ Mamalis

² Xiong Zhang and Hui Zhang

کردند.

در دو دهه‌ی اخیر به‌منظور افزایش جذب انرژی لوله‌های جدار نازک، مقاطع مربعی در حالت چندسلولی به دلیل داشتن وزن کم و ساخت ساده‌ی آنها مورد مطالعه محققین قرار گرفته است. چن^۱ و ویرزیکی [۱۵] در سال ۲۰۰۱ برای پیش‌بینی نیروی متوسط له‌شدگی لوله‌های مربعی در حالت تک‌سلولی، دوسلولی (2 × 1) و سه‌سلولی (3 × 1) با استفاده از تئوری Super Folding Element روابط تحلیلی را ارائه کردند. شکل ۲-۲ مقاطع مورد بررسی توسط آنها را نشان می‌دهد.

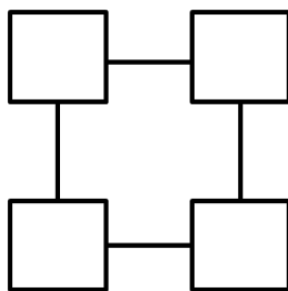


شکل ۲-۲: مقاطع الف) دوسلولی و ب) سه‌سلولی بررسی شده توسط چن و ویرزیکی [۱۵].

در سال ۲۰۰۲ لوله‌های جدارنازک چندسلولی در حالت مربعی توسط هنگ-سو کیم^۲ [۱۶] مورد بررسی عددی و تئوری قرار گرفت. او نشان داد که اضافه کردن المان‌های چندسلولی به گوشه‌های مقطع مربعی باعث افزایش جذب انرژی بر واحد جرم (SEA) تا ۱/۹ برابر مقطع تک‌سلولی معمولی می‌گردد. او همچنین با بهره‌گیری از روش‌های بهینه‌سازی، اندازه بهینه سلول‌های مقطع چندسلولی پیشنهادی را نیز محاسبه کرد. مقطع ارائه شده توسط او در شکل ۳-۲ نشان داده شده است.

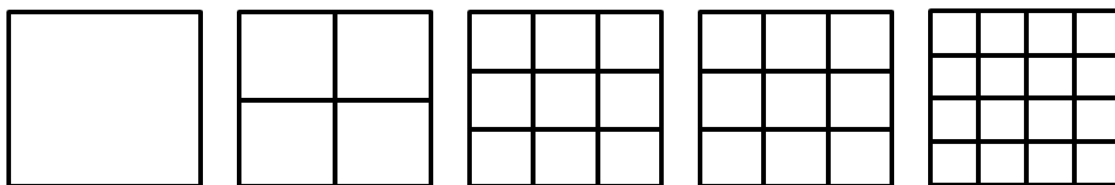
¹ Chen

² Heung-Soo Kim



شکل ۲-۳: مقطع بررسی شده توسط هنگ-سو کیم [۱۶].

مقطع چندسلولی مربعی با سلول‌های هم‌اندازه توسط زیونگ ژانگ و همکارانش [۱۷] در سال ۲۰۰۷ مورد بررسی‌های عددی و تئوری قرار گرفت و نشان داده شد که مقطع مربعی چندسلولی در حالت 3×3 نسبت به حالت تک‌سلولی تا ۱۰۰ درصد جذب انرژی را افزایش می‌دهد. مقاطع پیشنهادی آن‌ها دارای سلول‌های هم‌اندازه با زاویه قائم برای تمام سلول‌ها بود که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.

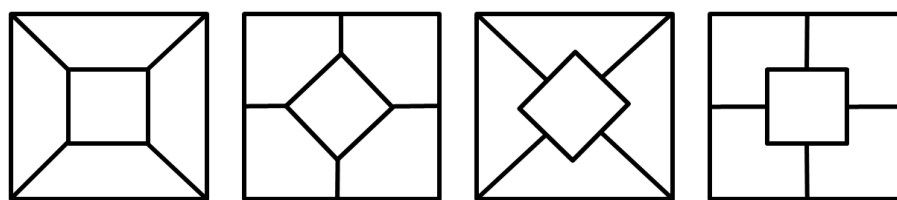


شکل ۲-۴: مقاطع بررسی شده توسط ژانگ و همکارانش [۱۷].

آن‌ها همچنین رابطه‌ی ساده شده‌ای برای پیش‌بینی نیروی متوسط له‌شدگی بر پایه تئوری SFE ارائه کردند و توسط شبیه‌سازی‌های عددی درستی رابطه مذکور را نشان دادند. آن‌ها مقطع چندسلولی را به سه نوع المان گوشه، T شکل و متقاطع تقسیم نمودند و با استفاده از نسبت جذب انرژی هر المان، یک رابطه به‌همراه ضرایبی ارائه دادند. در سال ۲۰۱۲ زیونگ ژانگ و هو ژانگ [۱۸] در بررسی دیگری روابط تئوری برای زوایای مختلف جداره‌های درون مقطع ارائه و روابط تئوری را با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی مورد ارزیابی قرار دادند. در سال ۲۰۰۸ بررسی‌های دیگری توسط

هو^۱ و همکارانش [۱۹] پیرامون بهینه‌سازی مقاطع مربعی چندسلولی با سلول‌های هم‌اندازه انجام گرفت که نشان داد افزایش تعداد سلول‌های مقطع مربعی باعث افزایش جذب انرژی می‌گردد.

مقاطع مربعی به شکل چندسلولی در حالت نامنظم و مورب توسط نجفی و رئیس‌روحانی [۲۰] در سال ۲۰۱۱ مورد بررسی تحلیلی و عددی قرار گرفت. مقاطع پیشنهادی آن‌ها با قابلیت افزایش انرژی جذب شده، در شکل ۵-۲ نشان داده شده است.



شکل ۵-۲: مقاطع پیشنهاد شده توسط نجفی و رئیس‌روحانی [۲۰].

در سال ۲۰۱۲ مقاطع دیگری در حالت شبه‌چندسلولی توسط تانگ^۲ و همکارانش [۲۱] به روش عددی مورد بررسی قرار گرفت. مقطع تک‌سلولی و دو مقطع پیشنهادی آن‌ها که از تقاطع دو مقطع مستطیلی ایجاد شده در شکل ۶-۲ نشان داده شده است. در پژوهش آن‌ها نشان داد شد که مقاطع پیشنهادی الف و ب در شکل ۶-۲ به ترتیب، ۱۱۸٪ و ۲۵۴٪ انرژی جذب شده بر واحد جرم (SEA) را نسبت مقطع تک‌سلولی معمولی افزایش داده است. همچنین، مقاطع مذکور به ترتیب، سبب افزایش مقدار بازدهی نیروی له‌شدگی (CFE^۳) به میزان ۴۵٪ و ۹۷٪ درصد شده است. بازده نیروی له‌شدگی، نسبت نیروی متوسط له‌شدگی به مقدار بیشینه نیرو می‌باشد که این بیشینه نیرو، معمولاً در ابتدای بارگذاری رخ می‌دهد که تحت عنوان نیروی بیشینه اولیه^۴، در مقالات معرفی شده است. نزدیک بودن مقدار بازدهی نیروی له‌شدگی به ۱۰۰ بیانگر برابری نیروی اولیه با نیروی متوسط له‌شدگی می‌باشد.

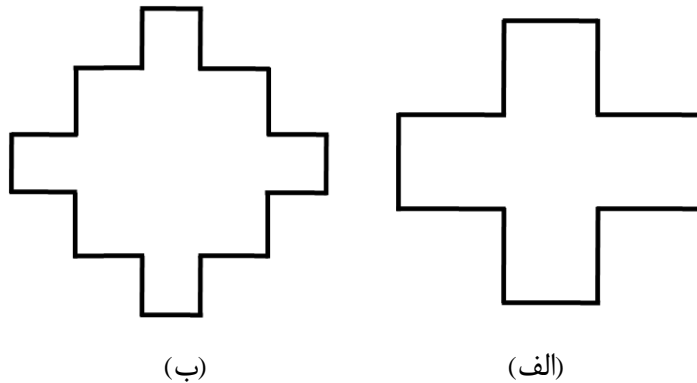
¹ Hou

² Tang

³ Crush Force Efficiency

⁴ Initial Peak Load

بنابراین، نیازی به اعمال نیروی زیاد برای شروع چین خوردگی نیست.



شکل ۲-۶: مقاطع پیشنهاد شده توسط تانگ و همکارانش [۲۱].

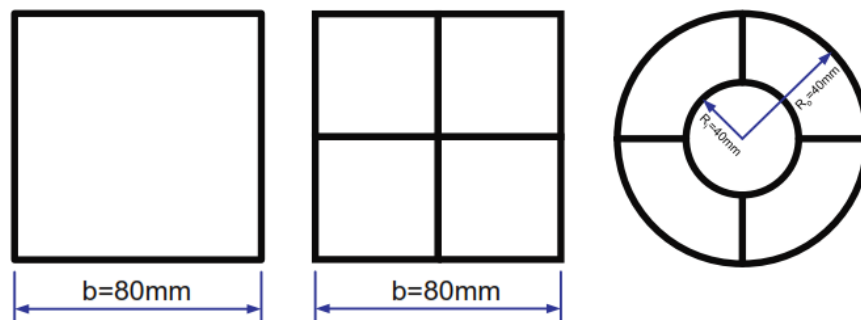
سازه چندسلولی در قالب مقطع مثلثی توسط کرولاک^۱ و همکارانش [۲۲] در سال ۲۰۰۷ مورد آزمایش تجربی قرار گرفت و ظرفیت تحمل بار شبه‌استاتیکی و پایداری آن مورد بررسی واقع شد. شکل نمونه آزمایش شده توسط آن‌ها در شکل ۲-۷ نشان داده شده است. در پژوهش صورت گرفته توسط آن‌ها، نشان داده شد که چندسلولی شدن مقطع سبب افزایش نیرو برای شروع تغییر شکل شده است.



شکل ۲-۷: مقطع پیشنهاد شده توسط کرولاک و همکارانش [۲۲].

^۱ Krolak

مقاطع چندسلولی در حالت استوانه‌ای توسط تانگ و همکارانش [۲۳] در سال ۲۰۱۲ با شبیه‌سازی عددی مورد بررسی قرار گرفت. مقطع چندسلولی دایروی در حالت افزایش سلول‌های شعاعی و محیطی توسط او و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت و نشان داده شد نمونه‌های استوانه‌ای با دو تیغه در راستای شعاعی و با وزن یکسان از سایر مدل‌ها انرژی بیشتری را جذب کرده است که این مقدار $1/5$ برابر مقدار انرژی جذب شده توسط مقطع مربعی 2×2 با وزن یکسان می‌باشد. نمونه مورد آزمایش توسط آن‌ها در شکل ۸-۲ نشان داده شده است.

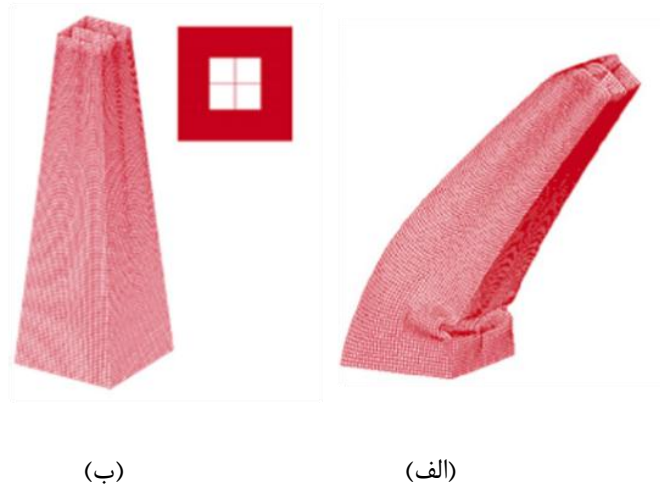


شکل ۸-۲: مقاطع بررسی شده توسط تانگ و همکارانش [۲۳].

علاوه بر استوانه و مقطع مربعی، هرم با مقطع مربعی در حالت چندسلولی و با زوایای متفاوت هرم تحت بار مایل توسط چنگ^۱ و همکارانش [۲۴] در سال ۲۰۱۲ مورد بررسی عددی و همچنین بهینه‌سازی از طریق روش DOE^۲ قرار گرفت. تابع هدف آن‌ها افزایش مقدار انرژی جذب شده بر واحد جرم و کاهش مقدار بیشینه نیروی اولیه بود. او نشان داد که چندسلولی شدن مقطع سبب جذب انرژی بیشتر توسط سازه نسبت به نمونه تک‌سلولی می‌شود. مقطع بررسی شده توسط او و همکارانش در شکل ۹-۲ نشان داده شده است.

¹ Chang

² Design Of Experiments

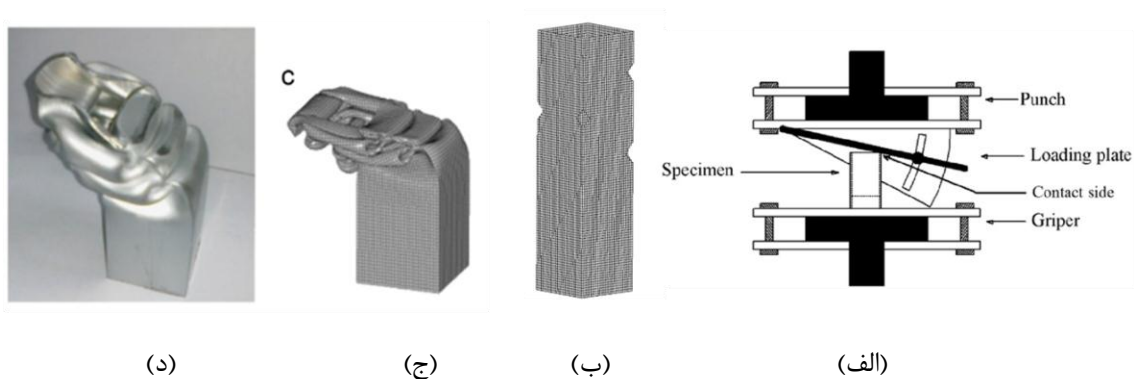


(ب)

(الف)

شکل ۲-۹: مقطع بررسی شده توسط چنگ و همکارانش (الف) پس از بارگذاری (ب) پیش از بارگذاری [۲۴].

همانطور که مشاهده شد، نوع چین خوردگی و مقدار جذب انرژی سازه‌ها تحت بارگذاری مایل از مواردی است که به تازگی مورد مطالعه محققان قرار گرفته است. روش دیگری برای افزایش جذب انرژی سازه تحت بار مایل در سال ۲۰۱۲ توسط علوی‌نیا و همکارانش [۲۵] ارائه شد. پژوهش آن‌ها نشان داد که ایجاد بریدگی و سوراخ در اطراف مقطع مربعی، جذب انرژی سازه را افزایش می‌دهد. مقطع مورد مطالعه آن‌ها در شکل ۲-۱۰ نشان داده شده است.



(د)

(ج)

(ب)

(الف)

شکل ۲-۱۰: مقطع بررسی شده توسط علوی‌نیا و همکارانش (الف) نحوه اعمال بار (ب) نمونه شبیه‌سازی شده پیش از بارگذاری (ج) نمونه شبیه‌سازی شده پس از بارگذاری (د) نمونه تجربی پس از بارگذاری [۲۵].

در این پایان‌نامه، به روش تجربی، شبیه‌سازی عددی و با بهره‌گیری از روابط تئوری به بررسی ویژگی‌های جذب انرژی سازه‌های چندسلولی پرداخته شده است. بررسی‌ها در دو مرحله (۱) حالت شبه‌استاتیکی و (۲) حالت دینامیکی صورت گرفته است. در پایان نیز یک نمونه مقطع چندسلولی پیشنهاد شده که انرژی جذب شده بر واحد جرم را نسبت به مقطع مربعی تک‌سلولی ۲۲۷٪ و مقدار بازدهی نیروی لهدگی تا ۶۸٪ افزایش داده است.

فصل سوم

آزمایش‌های تجربی