



مدل‌سازی تحمل آسیب در پوسته‌های جاذب انرژی دارای ناپیوستگی

هدی رستمی^{۱*}، مجید میرزائی^۲

^۱ فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ دانشیار، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴

چکیده

اهمیت بررسی موضوع تحمل آسیب و پژوهش در رفتار پس از تصادف و تلاش در بهبود رفتار سازه و کاهش شتاب‌های وارده به سرنشینان به کمک جاذب‌های انرژی، با مشاهده آمار روزافزون تصادفات وسایل نقلیه از جمله خودرو، قطار و هواپیما مشخص می‌شود. در این پژوهش رفتار جاذب انرژی جدار نازک با مقطع مستطیلی آلومینیومی توسط حل عددی در روش المان محدود و در نرم افزار آباکوس بررسی خواهد شد و برای بهبود پارامترهای جذب انرژی آن، ناپیوستگی‌هایی روی هندسه ایجاد شده که الگوی تاشدگی را منظم کرده است. رویکرد اصلی پژوهش، بهبود رفتار جذب انرژی بدون تغییر اساسی هندسه است. ناپیوستگی‌ها با اشکال هندسی، اندازه و تعداد متفاوت بر مکان‌های متفاوتی از مدل گذاشته شده و تا بهترین رفتار جذب انرژی بدست بیاید. پس از ارزیابی و انتخاب ناپیوستگی دایروی میان باقی اشکال هندسی، برای جانمایی مناسب آنها حدس اولیه‌ای از محل ناپیوستگی‌ها به کمک پژوهش‌های مشابه مورد نظر قرار گرفت. سپس از مقادیر ویژه هندسه که از حلگر کماتشی استخراج شده است، برای جانمایی و افزایش تعداد ناپیوستگی‌ها استفاده شده است.

در نهایت با بررسی ۴۳ مدل با تعداد و جانمایی متفاوت ناپیوستگی‌ها مدلی با بهبود ۱۳ درصدی معیار CFE پیشنهاد شد.

کلمات کلیدی: تحمل آسیب؛ پوسته‌های جاذب انرژی دارای ناپیوستگی؛ روش المان محدود؛ ضربه پذیری؛ معیار خرابی؛ تصادف

Modeling of Crashworthiness in Energy Absorbent Shells with Discontinuities

H. Rostami^{1,*}, M. Mirzaei²

¹ MSc graduate, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Assoc. Prof., Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract

The importance of research in crashworthiness and the post-accident behavior and efforts to improve the behavior of the structure and reduce the accelerations to the occupants with the help of energy absorbers is determined by observing the increasing statistics of vehicle accidents, including cars, trains, and airplanes. In this research, the energy-absorbing behavior of a thin wall with an aluminum rectangular section will be investigated by numerical solution in finite element method and in Abaqus software, and to improve its energy absorption parameters, discontinuities were created on the geometry, which regularized the folding pattern. The primary research approach is to improve the energy absorption behavior without fundamentally changing the geometry. Discontinuities with different geometrical shapes, sizes, and numbers are placed in different places in the model to obtain the best energy absorption behavior. After evaluating and choosing the circular discontinuity among the other geometric shapes, for their proper placement, an initial guess of the location of the discontinuities was considered with the help of similar research. Then, the eigenvalues of the geometry extracted from the buckling solver have been used to place and increase the number of discontinuities.

Finally, by examining 43 models with different numbers and placement of discontinuities, a model with a 13% improvement in the CFE criterion was proposed.

Keywords: Crashworthiness, Discontinuities energy absorbent shells, Finite Element, Damage criteria, Crash

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین نگرانی‌ها در بین خلبانان و مسافران در هواپیماهای مسافربری ایمنی است. اصطلاح ایمنی که می‌تواند دارای مفهومی گسترده باشد، در این بحث به دو حوزه طبقه بندی شده است:

حوزه اول کنترل و به حداقل رساندن عوامل ایجاد کننده سوانح، یا پیشگیری از سانحه و حوزه دوم، کنترل و به حداقل رساندن عواملی که باعث بروز آسیب در هنگام وقوع حادثه می‌شود یا کاهش خسارات. طراحی برای تحمل آسیب یا ضربه پذیری^۱ حوزه دوم ایمنی را مورد بررسی قرار می‌دهد. در جدول ۱ تعداد مرگ و میر در پرواز و نسبت آن به کل در سال‌های ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹ در آمریکا نشان داده شده است که عدد قابل توجهی است.

جدول ۱- میانگین سالانه تلفات هوانوردی ایالات متحده ۱۹۹۰-۱۹۹۹ [۱]

مرگ و میر	درصد کل	
۷۱۳	۸۰	هوانوردی عمومی
۹۴	۱۱	حمل و نقل تجاری
۲۶	۳	هواپیمای commuter
۵۴	۶	ایرتاکسی
۸۸۷	۲۵	کل

۱-۱- اصول طراحی بر اساس ضربه پذیری و تحمل آسیب [۱]

اصول اساسی رویکرد سیستمی در طراحی بر اساس ضربه پذیری را می‌توان با عوامل ذیل توصیف کرد:

• از مهمترین ملاحظات قابلیت ضربه پذیری مربوط به یک سازه محکم برای ایجاد فضای قابل زنده ماندن (Survival volume) است.

• مهار کردن سرنشین در سازه توسط ابزارهایی مانند صندلی‌ها و اتصالات آن و کمربند.

• مدیریت انرژی برخورد از لحظه برخورد تا انتقال ضربه به سرنشین و جذب آن توسط جاذب انرژی. در پژوهش پیش رو تمرکز بر این اصل است.

• طراحی مناسب فضای داخلی کابین برای به حداقل رساندن آسیب سرنشین از جمله عدم برخورد اجزای کابین در حین برخورد مورد نیاز است.

• عوامل پس از برخورد مانند سیستم سوخت، آتش سوزی و خروج

در پژوهش پیش رو به بخش مدیریت انرژی برخورد پرداخته شده و برای جذب انرژی ناشی از برخورد و انحراف نیروی ضربه از سرنشین به بدنه هواپیما، سازه‌های جاذب انرژی جدار نازک با مقطع مستطیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

بارگذاری محوری پوسته‌های جدار نازک با مقاطع دایره‌ای اولین بار توسط الکساندر [۲] در سال ۱۹۶۰ به صورت نظری مورد بررسی قرار گرفت. از آن پس، چین‌خوردگی لوله‌های جدار نازک به عنوان یک مکانیزم برای جذب انرژی معرفی شد. آبراموویچ و جونز [۳] در سال ۱۹۸۴ فروریزش لوله‌های استوانه‌ای را تحت اثر بارگذاری محوری شبه‌استاتیکی و دینامیکی بررسی کردند. یوون و نوریک [۴] در سال ۲۰۰۸، اثر ایجاد نقص از جمله ایجاد شیار و دندان برش روی لوله‌های آلومینیومی با مقاطع دایره و مربع را بر حالت فروپاشی و نیروی بیشینه لهیدگی به روش تجربی و عددی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که ایجاد نقص در لوله از جمله ایجاد برش‌ها و شیارها و دندان‌ها باعث فعال شدن حالت فروپاشی متقارن و کاهش نیروی بیشینه می‌شود. قمریان و ابدی [۵] در سال ۲۰۱۱ به بررسی عددی و تجربی لوله‌های استوانه‌ای سر بسته تحت بارگذاری محوری پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان داد که بیشینه نیروی اولیه لوله‌های سر بسته توخالی و تقویت‌شده با فوم، ۲۰ تا ۳۰ درصد کمتر از لوله‌های سرباز است. آذرخش و قمریان [۶] در سال ۲۰۱۷، میزان انرژی جذب در لوله‌های استوانه‌ای و مخروطی دوسر گیردار تحت بارگذاری محوری و مایل را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش لوله‌های جدار نازک از هر دو انتها بین دو صفحه صلب، ثابت شده و تحت بارگذاری محوری و مایل قرار داده شده است؛ سپس نحوه فروریزش نمونه‌ها، تغییرات نیرو و مقدار انرژی جذب شده در آن‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. سیم‌چالام و همکاران [۷] تجزیه و تحلیل عددی و تجربی رفتار فشرده‌گی و انرژی جذب شده توسط آلیاژهای آلومینیوم را با استفاده از لوله‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی انجام

^۱ Crashworthiness

سلول‌های زاویه صفر درجه باعث مکانیزم فروپاشی متقارن، افزایش اندازه سلول‌ها باعث کاهش حداکثر نیروی فروریزش و ظرفیت جذب انرژی، افزایش ضخامت لوله و چند لایه شدن جذب باعث تاثیر بر حداکثر نیروی فروریزش اولیه و ظرفیت جذب و همچنین چند لایه شدن جذب باعث بهبود راندمان فروریزش می‌شود.

استرادا و همکاران [۱۶-۱۹] اثر ناپیوستگی با اشکال گوناگون در پروفیل فولادی بر بهبود پارامترهای جذب انرژی را بررسی کردند و در پژوهشی دیگر اثر ناپیوستگی دایره‌ای در پروفیل آلومینیوم بر بهبود پارامترهای جذب انرژی را مطالعه کرده‌اند و در مرحله‌ی بعد شعاع ناپیوستگی دایره‌ای مورد بررسی قرار گرفت. استرادا و همکاران در پژوهشی دیگر به دوجداره کردن مدل و تاثیر سطح مقطع مدل بر پارامترهای جذب انرژی پرداختند. پس از آن تاثیر تغییر فاصله‌ی دو جداره‌ی مدل و تغییر ارتفاع ناپیوستگی‌ها بر روی دو جداره بررسی شد. در پژوهشی دیگر استرادا و همکاران تاثیر وجود دیواره بین دوجداره و تبدیل مقطع دو جداره به چند سلولی را بررسی کرده‌اند. بای و همکاران [۲۰] اثر زاویه برخورد، ضخامت مدل، زاویه نیم‌راس، قطر مدل، ابعاد برش گوشه و تعداد برش‌ها را بررسی و به این نتیجه رسیده است که نیروی بیشینه برای مدل با چهار برش مربعی در بیشترین عرض شیار، حدود ۳۴٪ کاهش یافته است.

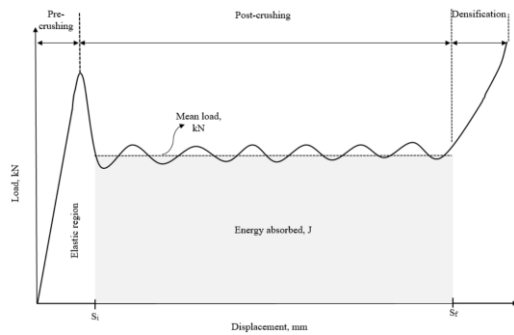
نوآوری بکار رفته در این پژوهش این است که بدون تغییر هندسه اصلی جاذب انرژی و صرفاً با اضافه کردن ناپیوستگی‌های هندسی پارامترهای جذب انرژی را بهبود می‌بخشد.

۱-۲- معیارهای موثر بر بهبود تحمل آسیب در جاذب انرژی جدار نازک

در شکل ۱ طرحواره نیرو-جابجایی برای فرآیند تصادف برای یک قطعه‌ی جاذب انرژی دیده می‌شود. ابتدا تغییر شکل در ناحیه‌ی الاستیک ماده صورت می‌گیرد و بیشترین مقدار نیرو در انتهای این بازه با نام نیروی ضربه‌ی بیشینه شناخته می‌شود که یکی از معیارهای موثر بر تحمل آسیب است و با P_{max} نشان داده می‌شود. طبق رابطه‌ی (۱) که در آن m نشانگر جرم نمونه‌ی در حال تصادف است، P_{max} نشان‌های از بیشینه شتاب وارد بر سرنشین در هنگام تصادف است که برای جلوگیری از

دادند. سان و همکاران [۸] یک مطالعه عددی برای تجزیه و تحلیل اثر هندسه مقطع پروفیل آلومینیوم بر روی پارامترهای جذب انرژی تحت بارگذاری دینامیکی داده‌اند. مقاطع مورد استفاده یک چند ضلعی شامل گوشه‌های متعدد است. چنگ و همکاران [۹] یک آزمایش تجربی انجام دادند که جذب انرژی مدل‌های دارای ناپیوستگی هندسی بر دیواره‌ها را مقایسه می‌کند. جذب انرژی در ناپیوستگی دایره‌ای با بهبود ۷۴/۶٪ نسبت به مدل اولیه بهترین عملکرد را داشته است. به همین ترتیب، فردینس [۱۰] اثر ایجاد ناپیوستگی در گوشه‌ها را به‌عنوان اختلالات هندسی در پروفیل‌های مربعی بررسی کرد. در نهایت ایجاد این ناپیوستگی عملکرد جذب انرژی نمونه را ۲۳٪ بهبود بخشید.

سعید کیاست و همکاران [۱۱] جاذب انرژی با سطح مقطع مربعی و دایره‌ای را برای استفاده در خودرو تحت شرایط بارگذاری دینامیکی با تغییر در ضخامت و ابعاد مقطع مختلف از نقطه نظر بازده وزنی مورد تحلیل عددی قرار دادند. مرزبان راد و همکاران [۱۲] جذب انرژی پنج سطح مقطع مربع، مستطیل، دایره، شش ضلعی و هشت ضلعی با زاویه برخورد ۰، ۱۵ و ۳۰ درجه و همچنین مکان، نوع (سوراخ یا تاخوردگی) و ابعاد مناسب ناپیوستگی بر جاذب انرژی را مورد بررسی قرار دادند. شریعتی و همکاران [۱۳] رفتارهای نرم‌شدگی پوسته‌های استوانه‌ای فولاد ضد زنگ 304L تحت بارگذاری نوسانی جابجایی کنترل شده و نیروی کنترل شده و همچنین اثر برش روی پوسته‌های استوانه‌ای و تأثیر مکان و اندازه برش‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش شعاع برش باعث کرنش و سرعت کرنش بیشتر و فروپاشی سریع‌تر شده است. آقاجانی و همکاران [۱۴] با ایجاد شیار در لوله‌های دایره‌ای شکل و افزایش شیارها، انواع فوم‌ها، مقاومت، دانسیته فوم و وزن آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. نتایج باعث انتخاب فوم پلی یورتان گشت. میزان جذب انرژی در لوله‌های با شیارهای نامتقارن بیشتر است. قدس بین و همکاران [۱۵] عملکرد لوله‌های فلزی مشبک تحت بارگذاری ضربه‌ای محوری را مورد مطالعه قرار دادند. ورق‌های فلزی مشبک علیرغم وزن کم، ظرفیت جذب انرژی بالایی دارند. در این پژوهش تأثیر اندازه سلول ورق فلزی مشبک، ضخامت لوله و چند لایه شدن جاذب بر جذب انرژی و رفتار جاذب‌ها به صورت عددی بررسی شد. نتایج نشان داد که لوله‌های با



شکل ۱- طرحواره نیرو-جابجایی در جاذب های انرژی [۲۱]

انرژی جذب شده توسط قطعه‌ی جاذب انرژی یکی از مهم‌ترین معیارها برای بهبود تحمل آسیب است. این معیار با $E_{absorption}$ نشان داده می‌شود و به معنای مساحت زیر نمودار نیرو جابجایی در ناحیه پلاستیک است. افزایش این عدد به شرط متعادل بودن باقی معیارها، به معنای بهبود مقاومت در برابر آسیب است.

$$E_{absorption} = \int_{S_i}^{S_f} P(s) ds \quad (۴)[۲۱]$$

SEA

نیز معیاری برای ارزیابی وضعیت تحمل آسیب یک قطعه است که از تقسیم انرژی جذب شده بر جرم جاذب انرژی به دست خواهد آمد. به دلیل مستقل بودن این معیار از جرم، معیار خوبی برای مقایسه‌ی مقاومت در برابر آسیب در چند قطعه‌ی مشابه است.

$$SEA = \frac{E_{absorption}}{m} \quad (۵)[۲۱]$$

در نهایت قطعه وارد مرحله‌ی غیرخطی متراکم شدن می‌شود. در این مرحله برای صفر شدن سرعت برخورد و به علت اتمام ناحیه جاذب انرژی، انرژی به صورت متراکم جذب می‌شود که البته در عدد جذب انرژی به حساب نمی‌آید. در این مرحله نکته‌ی مهم این است که نیروی وارد به سرنشین از حد مجاز بالاتر نرود و قسمت اصلی جذب انرژی به مقدار کافی در مرحله‌ی قبل صورت گرفته باشد.

پنجمین و مهم‌ترین معیار در بررسی رفتار تحمل آسیب، بازدهی نیروی ضربه یا CFE است. این معیار از تقسیم نیروی

آسیب سرنشین باید کمتر از حد مجاز باشد. ضمن این که توجه شود کاهش این نیرو باعث افزایش شتاب وارده در قسمت انتهایی تصادف نشود.

$$P_{max} = a_{max} \times m \quad (۱)[۲۱]$$

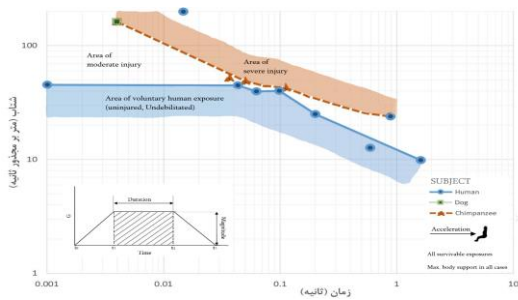
در قسمت بعد قطعه تحت بارگذاری، وارد مرحله تغییر شکل پلاستیک می‌شود و به وسیله‌ی تغییر شکل انرژی وارد شده بر سازه را جذب می‌کند. در این مرحله نمودار نیرو-جابجایی به صورت نوسانی حول نیروی ضربه‌ی میانگین که با P_{mean} نشان داده می‌شود، نوسان می‌کند. نیروی ضربه‌ی میانگین نیز یکی از پارامترهای موثر برای افزایش تحمل آسیب مدل است که طبق رابطه‌ی (۲) بیانگر شتاب میانگین وارد بر سرنشین است که برای جلوگیری از آسیب سرنشین باید کمتر از حد مجاز باشد. از طرفی برای افزایش سطح زیر نمودار و افزایش انرژی جذب شده، افزایش آن نیز مورد توجه است؛ بنابراین برای طراحی این معیار باید هر دو نکته مورد توجه قرار بگیرد.

$$P_{mean} = a_{mean} \times m \quad (۲)[۲۱]$$

نیروی ضربه‌ی میانگین، طبق رابطه (۳) برابر با مساحت زیر نمودار در ناحیه تغییر شکل پلاستیک تقسیم بر تغییرات جابجایی است.

$$P_{mean} = \frac{\int_{S_i}^{S_f} P(s) ds}{S_f - S_i} \quad (۳)[۲۱]$$

همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده، S_i نشان دهنده‌ی جابجایی در شروع ناحیه‌ی پلاستیک، S_f جابجایی در انتهای ناحیه‌ی پلاستیک، P نیرو و S جابجایی است.



شکل ۲- شتاب‌های مجاز برای بدن در راستای عمود بر

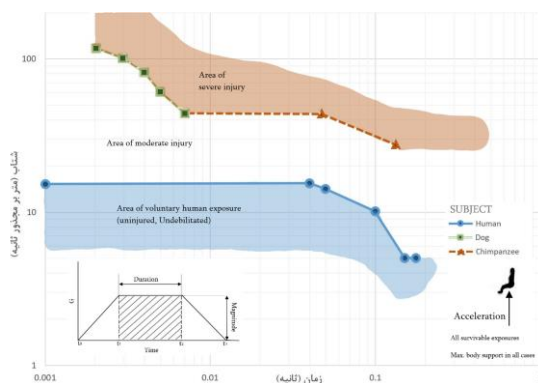
ستون فقرات [۱]

به‌عنوان مثال با توجه به شکل ۲، سرنشین در ناحیه‌ی بدون صدمه و مدت زمان سانحه ۰/۰۴ ثانیه، بیشینه شتاب 45G (۴۵ برابر شتاب گرانش) را تحمل می‌کند.

۱-۳-۲- شتاب مجاز در راستای موازی با سر

در شکل ۳ شتاب مجاز بدن انسان و گوریل و گراز در موازات با سر یعنی درجهت گرانش در حالت حرکت پایدار هواپیما نشان داده شده است. با توجه به بازه‌ی زمانی سانحه و هدف گذاری برای قرار گرفتن در هر یک از ناحیه‌های ذکر شده، بیشینه شتاب برای Pmax و Pmean تعیین می‌شود.

به‌عنوان مثال با توجه به شکل ۳، سرنشین در ناحیه‌ی بدون صدمه و مدت زمان سانحه ۰/۰۴ ثانیه بیشینه شتاب 16G (۱۶ برابر شتاب گرانش) را تحمل می‌کند.



شکل ۳- شتاب‌های مجاز برای بدن در موازات با سر [۱]

هر دو نمودار با توجه به کاربرد جاذب انرژی قابل استفاده است. به‌عنوان مثال در سپر ماشین و جلوی قطار چون بارگذاری به‌صورت افقی است و طبیعتاً جاذب انرژی نیز در همان راستا قرار می‌گیرد، باید از شکل ۲ استفاده نمود؛ ولی

ضربه‌ی میانگین به نیروی ضربه‌ی بیشینه به دست می‌آید. مفهوم آن به این شرح است که با افزایش نیروی میانگین، جذب انرژی بالا رفته و CFE نیز بهبود می‌یابد و همچنین با کاهش نیروی بیشینه، شتاب وارد بر سرنشین کاهش یافته و بر بازدهی CFE افزوده می‌شود.

$$CFE = \frac{P_{mean}}{P_{max}} \times 100 \quad (21)[6]$$

۱-۳-۳- محدوده مجاز بارگذاری بدن انسان [۱]

از آنجایی که هدف جاذب‌های انرژی در فرآیند تحمل آسیب، زنده ماندن و آسیب کمتر به سرنشین است، باید شتاب و نیروی مجاز وارد بر بدن بررسی شود تا بارگذاری بدن انسان بیشتر از حد مجاز نشود.

محدودیت بارگذاری برای هر جز بدن و هر یک از جهات بارگذاری، متفاوت است. در این بخش شتاب‌های بیشینه در دو جهت بارگذاری و برای کل بدن که استفاده‌ی بیشتری در هواپیماها و هلیکوپترها دارند، بررسی می‌شوند.

۱-۳-۱- شتاب مجاز در راستای عمود بر ستون فقرات

در شکل ۲ شتاب مجاز بدن انسان و گوریل و گراز در جهت عمود بر ستون فقرات یعنی درجهت حرکت پایدار هواپیما نشان داده شده است.

با توجه به بازه‌ی زمانی سانحه و هدف گذاری برای قرار گرفتن در هر یک از قسمت‌های:

ناحیه‌ی بدون صدمه یا بدون صدمه ناتوان کننده

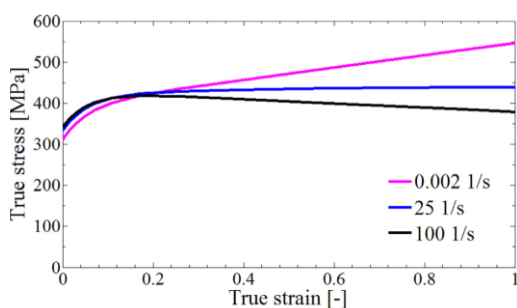
ناحیه‌ی صدمه‌ی متوسط

ناحیه‌ی صدمه شدید

بیشینه شتاب برای Pmax و Pmean تعیین می‌شود.

می‌باشد. شعاع انحنای گوشه‌های سطح مقطع ۷/۹ میلی‌متر است.

نوع ماده، آلیاژ آلومینیوم EN AW-7108 T6 با چگالی ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و مدول الاستیسیته ۷۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳۳ در نظر گرفته شده است. خواص پلاستیسیته ماده در شکل ۲ برای نرخ تغییرات کرنش نشان داده شده است که در این مدل از نرخ تغییرات کرنش برابر با ۲۵ استفاده شده است (سرعت ۱۰ متر بر ثانیه و طول قطعه ۰/۴ متر).



شکل ۵- خواص پلاستیسیته برای آلیاژ آلومینیوم EN AW-7108 T6 در نرخ کرنش‌های مختلف [۱۹]

در مدل‌های دینامیکی به علت ایجاد شدن پارگی بین المان‌ها تعریف شاخص آسیب برای مدل‌سازی ناحیه بعد از پلاستیک مورد نیاز است. به این معنی که ماده ابتدا وارد محدوده الاستیک، سپس پلاستیک و بعد با پارگی المان‌ها وارد محدوده آسیب شده که رشد این محدوده با رشد آسیب مدل می‌شود. در این پژوهش دو نوع شاخص آسیب با نام‌های DUCTILE و SHEAR در مدل‌سازی استفاده شده است که خصوصیات آن‌ها در جدول ۲ قابل مشاهده است و در نهایت اثر آن‌ها بر مدل با یکدیگر مقایسه خواهد شد. در مدل اعتبارسنجی تنها از معیار شکست DUCTILE استفاده شده است.

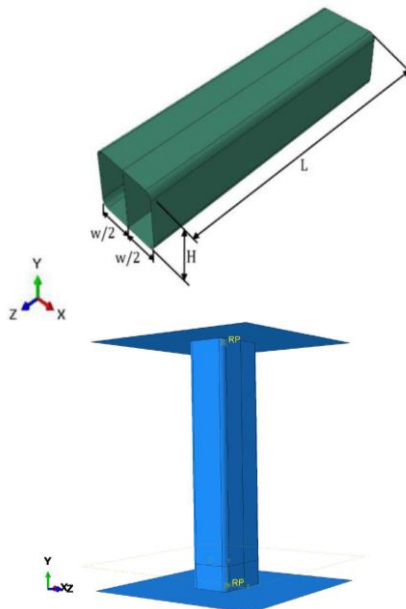
در کاربردهای هوافضایی اعم از زیر صندلی سرنشینان در هواپیماها و هلیکوپتر بارگذاری و به تبع آن جهت قرارگیری جاذب انرژی، بیشتر به صورت زاویه دار و ترکیبی از عمودی و افقی است.

با توجه به زاویه برخورد ۳۰ درجه، حالت بحرانی 36G است و این موضوع برای طراحی معیارهای Pmax و Pmean مورد توجه قرار می‌گیرد.

سرعت برخورد در این پژوهش، بر اساس کمترین سرعت برخورد الزامات FAR23، FAR25، FAR27 و FAR29، ۱۰ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

۲- مدل‌سازی المان محدود و اعتبار سنجی

به جهت سنجش اعتبار مدل در این مطالعه ابتدا از هندسه‌ی شکل ۴ که در پژوهش استرادا و همکاران [۱۹] و هوپاترا و همکاران [۲۲] (هندسه دو سلوله) به دو روش عددی و تجربی مدل شده، استفاده شده است. مدل‌سازی در نرم افزار آباکوس و با حلگر Dynamic Explicit انجام شده است.



شکل ۴- هندسه مدل دو سلوله [۱۹]

در شکل ۴ ابعاد هندسی $W = 95 \text{ mm}$ ، $L = 396.5 \text{ mm}$ و ضخامت صفحات نیز برابر با $H = 68 \text{ mm}$ و $2/5$ میلی‌متر

خصوصیت مماسی penalty با ضریب اصطکاک ۰/۰۱۵ استفاده شده است.

به علت ایده آل نبودن ماده و هندسه و بارگذاری‌ها، قید نقصان با کلید واژه‌ی Imperfection در قسمت edit keywords وارد شده است. بدین صورت که ابتدا با کلگر کمانشی Buckle در بخش Linear Perturbation در نرم افزار آباکوس و به صورت اختصاصی برای هر هندسه با قیود گفته شده اجرا شده و با محاسبه مقادیر ویژه، حالت‌های کمانشی آن هندسه به دست آورده می‌شود. سپس در مدل اصلی با کلید واژه‌ی گفته شده فراخوانی می‌شود. در این پژوهش مود اول و دوم کمانشی در آنالیز کمانش با ضریب تاثیر ۰/۰۱۵ به وسیله کد زیر بر مدل اعمال شده است که باعث ایجاد نقص در مدل اولیه می‌شود. این قید با تغییر هر مدل، بروزسانی می‌شود. ضریب ۰/۰۱۵ و تعداد موده‌های اعمال شده، در قسمت اعتبار سنجی با تطبیق با دو مدل منبع مورد مقایسه به دست آمده است.

*IMPERFECTION,FILE=DT-T,STEP=1

1,0.0015

2,0.0015

در ادامه نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج عددی پژوهش استرادا و همکاران و پژوهش تجربی هوپاترا و همکاران مقایسه شده است. همان طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، الگوی تاشدگی مدل و همین طور نمودار نیرو جابجایی که در شکل ۸ نشان داده شده است، با نمونه‌ی متناظر در پژوهش استرادا و همکاران مشابه است. همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، الگوی تاشدگی این مدل به نمونه‌ی واقعی نیز نزدیک است.

جدول ۲- خواص آسیب ماده [۱۹]

پارامترهای شکست	پارامترهای شکست	
SHEAR	DUCTILE	
۰/۳۵	۰/۴۴	کرنش شکست
۱/۲	۱۴۹۴	نرخ کرنش
-	۸/۶۳۰۴	پارامتر تنش سه بعدی ^۱
۲/۰۵	-	نسبت تنش برشی
۰/۳	-	K _s

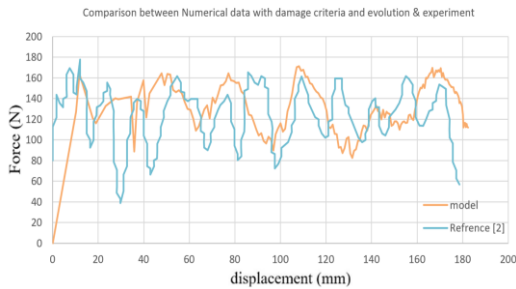
در نمودار فوق کرنش شکست به معنای میزان کرنش پلاستیکی که یک ماده پیش از رسیدن به نقطه شکست می‌تواند تحمل کند، نرخ کرنش به معنای تغییرات کرنش نسبت به زمان و پارامتر تنش سه بعدی به معنای نسبت (فشار هیدروستاتیک یا تنش متوسط) به تنش معادل است. برای مدل‌سازی رشد آسیب از جابجایی برابر با ۰/۰۰۱ استفاده شده است.

صفحات بالا و پایین به صورت پوسته و صلب طراحی شده است و المان دو بعدی مربعی یعنی R3D4 با اندازه‌ی ۵ میلی متر به آن اختصاص داده شده است. همانند پژوهش مرجع [۱۹] و به علت ثابت نگه داشتن فرضیات، لوله‌ی آلومینیومی نیز به صورت shell و با المان‌های دوبعدی مربعی یعنی S4R با اندازه‌ی ۵ میلی متر مدل شده است.

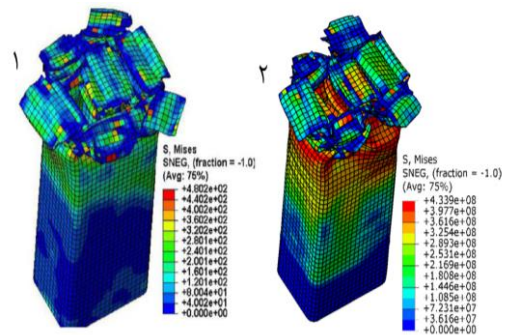
به نقطه‌ی مبدا صفحه‌ی بالا سرعت اولیه‌ی 10 m/s و جرم ۵۰۰ کیلوگرم و قید جابجایی برابر با صفر در پنج درجه‌ی آزادی غیر از جهت حرکت (y) داده شده است. درجات آزادی نقطه‌ی مبدا صفحه‌ی پایین به صورت کامل بسته شده است. علاوه بر آن ۴ سانتی‌متر از قسمت پایین مدل جدا شده (partitioning) و درجات آزادی آن به علت ایجاد تکیه‌گاه بسته شده است.

برای مدل‌سازی برخوردها در مدل‌سازی دینامیکی از گزینه‌ی general contact با خصوصیت عمودی hard contact و

^۱ Stress Triaxiality



شکل ۹- نمودار نیرو-جابجایی برای مدل و منبع [۲۲]



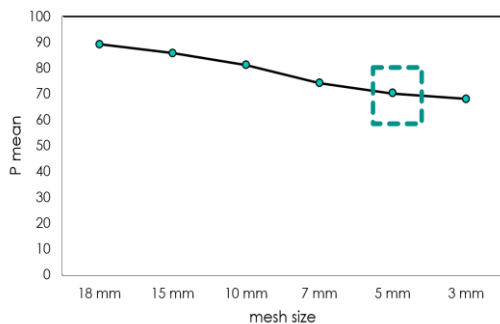
شکل ۶- الگوی تاشدگی برای (۱) منبع [۱۹] و (۲) مدل

در نتیجه در حالت کلی اعتبار مدل با این دو پژوهش سنجیده شده و قابل تایید است.

۳- معرفی مدل اصلی

مدلسازی مدل اصلی اولیه کاملاً مشابه توضیحات بخش قبل می‌باشد با این تفاوت که طول قطعه به ۴۰۰ میلی‌متر و سطح مقطع به حالت تک سلوله و بدون تیغه میانی تبدیل شده است. زمان مدل‌سازی نیز به ۰/۰۴ ثانیه و تعداد حل^۱ به ۲۷۰ عدد تغییر یافته است.

برای بررسی همگرایی مش اندازه مش از ۱۸ تا ۳ میلی‌متر تغییر داده شد و نتایج نیروی میانگین با یکدیگر مقایسه گشت. همان طور که در شکل ۱۰ مشخص است، تقریباً از اندازه مش ۵ میلی‌متر به بعد روند نمودار ثابت و قابل قبول شده است؛ بنابراین ۵ میلی‌متر به علت مطلوب بودن نتیجه (نسبت به مش بزرگتر) و همین طور عدم اضافه کردن زمان حل بیش از اندازه (نسبت به مش کوچکتر)، انتخاب می‌شود.

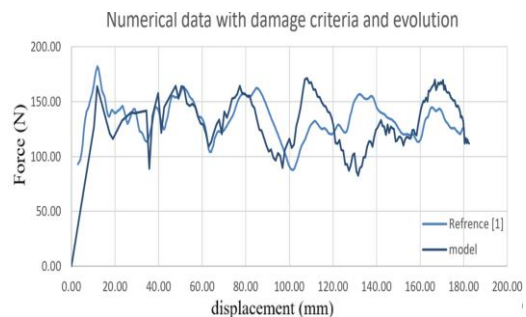


شکل ۱۰- بررسی همگرایی مش



شکل ۷- نمونه واقعی متناظر با مدل شبیه سازی

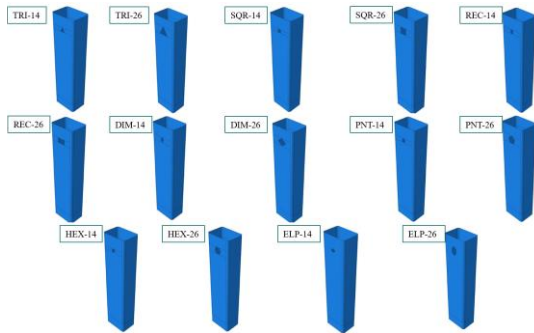
شده [۲۲]



شکل ۸- نمودار نیرو-جابجایی برای مدل و منبع [۱۹]

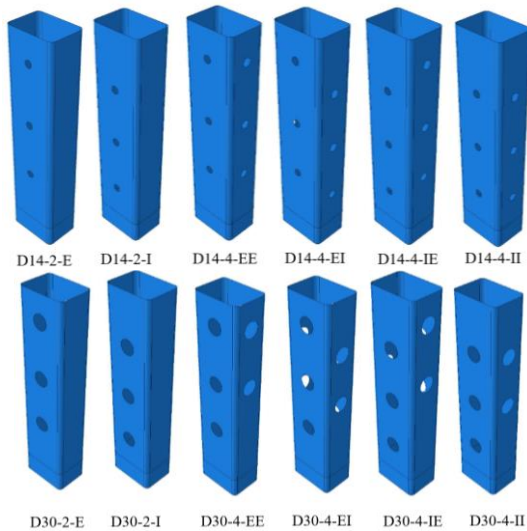
نمودار نیرو جابجایی پژوهش تجربی هوپاترا و همکاران در شکل ۹ مقایسه شده است. این دو نمودار غیر از نقاطی در حالت کمینه نمودار، با یکدیگر مطابق می‌باشند.

^۱ Iteration



شکل ۱۲- تغییرات شکل هندسی ناپیوستگی‌ها

برای اعمال تغییرات جانمایی و تعداد ناپیوستگی، شش حالت جانمایی و تعداد برای دو قطر ۱۴ و ۳۰ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. همانند شکل ۱۳ تعداد ناپیوستگی ۶ و ۱۲ در نظر گرفته شده و به ترتیب در دو وجه و چهار وجه قرار گرفته اند. برای حدس اولیه محل قرار گیری ناپیوستگی‌ها همانند شکل ۱۴ از جانمایی تحذب و تقعر هندسه در حلگر کمانشی در سه مقدار ویژه استفاده شده و ارتفاع‌های ۵۰، ۱۶۰ و ۲۶۰ میلی‌متری و ارتفاع‌های ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ میلی‌متری در نظر گرفته شده است.



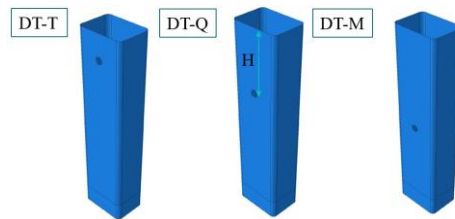
شکل ۱۳- تغییرات جانمایی و تعداد ناپیوستگی‌های با

قطر ۱۴ و ۳۰ میلی‌متر

بعد از تایید شدن مدل پایه ناپیوستگی‌ها بر روی جداره جاذب انرژی ایجاد می‌شود که تغییر در ارتفاع و اندازه و تعداد و جانمایی و شکل هندسی آن‌ها بررسی می‌شود. لازم به ذکر است، با ایجاد ناپیوستگی‌ها و اضافه شده المان‌های مثلثی، المان S3R نیز به المان‌ها اضافه می‌شود. مدل ماده برای shell و homogeneous و مدل پلاستیسیتیه rate dependent و مدل تحمل آسیب Ductile و مدل رشد آسیب بر اساس جابجایی انتخاب شده است.

۴- اعمال ناپیوستگی‌های هندسی

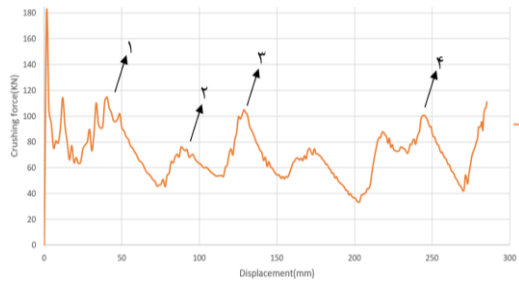
برای اعمال تغییرات ارتفاع ناپیوستگی‌ها همانند شکل ۱۱ دو ناپیوستگی دایروی به قطر ۱۴ میلی‌متر بر دو وجه روبرو جاذب در H برابر با ۵۰ و ۱۲۵ و ۲۰۰ جانمایی شده است.



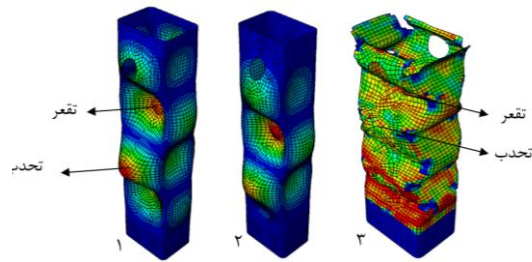
شکل ۱۱- تغییرات ارتفاع ناپیوستگی‌ها

برای اعمال تغییرات اندازه قطر ناپیوستگی، در ارتفاع برابر با ۵۰ میلی‌متر (H=50) قطر دو ناپیوستگی دایروی روبروی هم بین اعداد ۶، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸، ۲۰، ۲۲، ۲۴، ۲۶، ۳۰، ۳۶ و ۵۰ میلی‌متر تغییر می‌کند.

برای اعمال تغییرات شکل هندسی ناپیوستگی، در ارتفاع برابر با ۵۰ میلی‌متر (H=50) شکل هندسی دو ناپیوستگی روبروی هم بین مثلث و مربع و مستطیل و لوزی و پنج ضلعی و شش ضلعی و بیضی و دایره همانند شکل ۱۲ تغییر می‌کند. مساحت ناپیوستگی‌ها در همه حالات ثابت فرض شده و دو حالت ۵۳۱ و ۱۵۴ میلی‌متر مربع مورد بررسی قرار گرفته است.



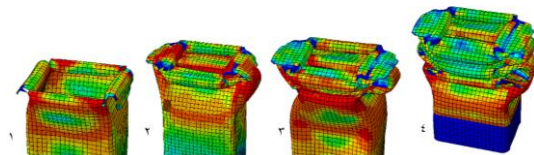
شکل ۱۶- نمودار نیرو-جابجایی برای مدل بدون ناپیوستگی



شکل ۱۴- جانمایی تحدب و تقعر در حلگر کمانشی

۵- نتایج مدل‌سازی

ابتدا نتایج شبیه‌سازی بدون ناپیوستگی معرفی می‌شود. در شکل ۱۵ روند ایجاد پارگی در گوشه‌های مدل در ابتدای تغییر شکل و در سه جابجایی ۴۰، ۸۰، ۱۳۵ و ۲۵۰ میلی‌متری نشان داده شده است.

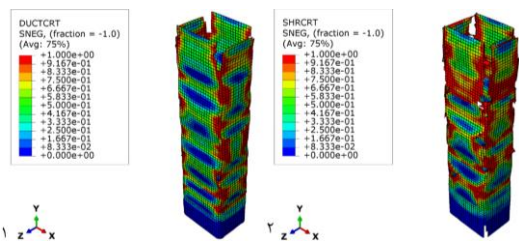


شکل ۱۵- نحوه ایجاد گسستگی برای مدل بدون ناپیوستگی در جابجایی‌های ۴۰، ۸۰، ۱۳۵ و ۲۵۰ میلی‌متری

در هر دو معیار نقاطی که دچار ترک و پارگی می‌شوند، به عدد یک رسیده و با نقاط قرمز نشان داده شده‌اند. از طرفی با تعریف پارامتر رشد آسیب المان‌ها بعد از آنکه تغییر شکل بیش از حد مجاز داشته باشند، حذف می‌شوند. با توجه به شکل ۱۷ معیار Shear Damage حذف المان بیشتری را نسبت به Ductile Damage نشان می‌دهد و همچنین المان fail شده یا قرمز کمتری دارد. برای انتخاب معیار بهتر نیاز به مقایسه آن با نمونه واقعی می‌باشد بدین صورت که در جابجایی‌های ثابت، حذف المان معیار Shear Damage اغراق آمیز است؛ زیرا اکثر المان‌های گوشه را حذف کرده که مغایر با واقعیت است. این گفته در پژوهش استرادا و همکاران نیز تایید شده است [۱۹]؛ بنابراین معیار Ductile Damage مدل بهتری را ارائه داده است و همین معیار در ادامه مدل‌سازی استفاده شده است.

به علت عبور از ناحیه پلاستیسیته و ورود به ناحیه خرابی المان، ابتدا گسستگی‌هایی در گوشه‌های مدل ایجاد و سپس تاشدن مدل اتفاق افتاده است.

در شکل ۱۶ رفتار موجی شکلی برای نمودار نیرو جابجایی مدل بدون ناپیوستگی دیده می‌شود. نقاط قله‌ی این نمودار که بعضی از آنان با اعداد یک تا چهار نشان داده شده است، تاثیر بیشتری بر افزایش سطح زیر نمودار و در نتیجه افزایش جذب انرژی می‌گذارند. در شکل ۱۵ نیز الگوی تاشدگی در نقاط ذکر شده نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود، این نقاط مربوط به زمانی است که قطعه در بیشترین حالت هر تاخوردگی قرار می‌گیرد. در واقع در هر تاخوردگی یک قله‌ی جذب انرژی اتفاق می‌افتد که با کنترل آن جذب انرژی میانگین افزایش می‌یابد.

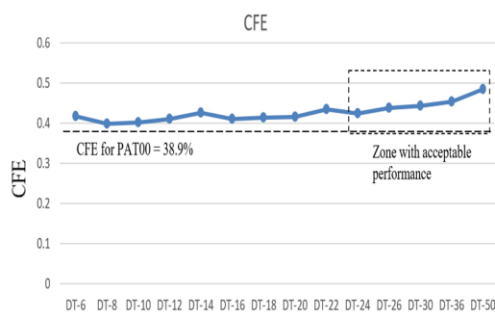


شکل ۱۷- مقایسه شاخص آسیب (۱) Ductile Damage و (۲) Shear Damage

نتایج تغییرات ارتفاع ناپیوستگی‌ها

همان طور که در شکل ۱۸ نشان داده شده است، جذب انرژی و نیروی میانگین و CFE در همه‌ی مدل‌های سوراخ دار نسبت به مدل بدون ناپیوستگی بیشتر و نیروی بیشینه در همه‌ی مدل‌ها نسبت به مدل بدون ناپیوستگی کمتر شده است. این موضوع نشان دهنده‌ی این است که ایجاد ناپیوستگی به جذب

همه‌ی پارامترهای تحمل آسیب نسبت به مدل بدون ناپیوستگی بهبود یافته‌اند. معیار CFE در شکل ۲۱ نشان داده شده و با مدل بدون ناپیوستگی مقایسه و مدل‌های بهبود یافته شده مشخص شده است. بهترین مدل، مدل‌های DT-26 الی DT-50 با ارتفاع ۵۰ میلی‌متر است. از بین این چهار مدل، مدل DT-30 به دلیل ایجاد شتاب انتهایی مناسب‌تر بهترین گزینه است. این نکته در بخش بعد توضیح داده می‌شود. انرژی جذب شده ویژه توسط ۱۴ مدل ذکر شده نسبت به مدل بدون ناپیوستگی بین ۰٫۴٪-۰٫۶٪ و ۰٫۹٪-۰٫۱۹٪ بهبود داشته است. بهترین درصدها برای مدل DT-50 است، ولی به علت نکته‌ی ذکر شده بهترین مدل DT-30 است که معیار CFE را نسبت به مدل بدون ناپیوستگی، ۵/۴٪ بهبود بخشیده است.



شکل ۲۱- معیار CFE در تغییرات قطر ناپیوستگی‌ها

تا کنون مدل‌سازی صورت گرفته تا ۰/۰۴ ثانیه بوده است که سرعت اولیه‌ی وارد شده به نمونه نزدیک صفر می‌شود، ولی وارد مرحله پیک انتهایی نیرو، که در مقدمه به آن اشاره شد، نمی‌شود. همان‌طور که اشاره شده، شتاب بیشینه این قسمت نیز باید بررسی شود که در محدوده شتاب قابل تحمل بدن انسان باشد. این شتاب، طبق محاسبات ذکر شده در این حالت برابر با 36G است.

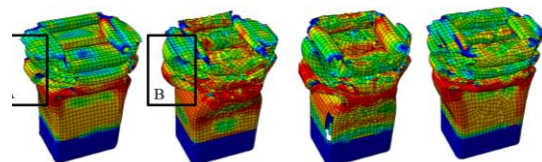
همان‌طور که در شکل ۲۲ نشان داده شده است، مدل DT-30 و DT-36 با 39G و 38G شتاب بیشینه در قسمت انتهایی مدل بهترین عملکرد را داشته‌اند و با خطای ۰٫۶٪ و ۱۰٪ عملکرد قابل قبولی نسبت به بیشینه شتاب قابل تحمل بدن را دارا می‌باشند. با توجه به اینکه نیروی میانگین و انرژی جذب شده در مدل DT-36 کمتر از DT-30 است؛ بنابراین مدل DT-30 به‌عنوان بهترین مدل معرفی شده است.

انرژی و باردهی بیشتر کمک می‌کند. انرژی جذب شده ویژه بین ۰/۲۵٪-۰/۴٪ و CFE بین ۳/۶٪-۱/۲٪ افزایش یافته است. بهترین مدل برای DT-T است که در آن CFE افزایش ۳/۶ درصدی داشته است.

با دقت در بخش A و B نشان داده شده در شکل ۱۹ دریافت می‌شود که این بهبود در حدود چهار درصدی تحت تاثیر بهبود الگوی تاشدگی است. در واقع با کنترل نقاط تا شدن که پیش از این به نقش موثر آن‌ها در جذب انرژی شد، از تیز شدن این محدوده و در نتیجه خرابی المان و حذف و عدم تحمل تنش آن جلوگیری شده است؛ یعنی در بخش A شکل تاشدن تیزتر، پلاستیسیته المان‌ها سریعتر و خرابی و گسستگی المان‌ها نیز سریع‌تر نسبت به بخش B رخ داده است.

نام مدل	P_{max} (KN)	P_{mean} (KN)	$E_{absorption}$ (KJ)	SEA (J/gr)	CFE%
PAT00	180.48	70.31	20.22	20.9	38.9
DT-T	165.73	70.52	20.26	21.0	42.5
DT-Q	181.52	72.84	20.63	21.4	40.1
DT-M	177.67	71.93	20.47	21.2	40.5

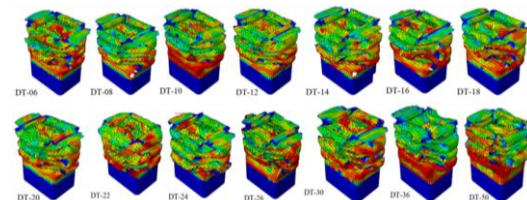
شکل ۱۸- نتایج تغییرات ارتفاع ناپیوستگی‌ها



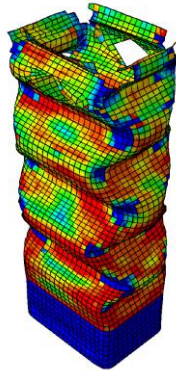
شکل ۱۹- الگوی تاشدگی برای مدل بدون ناپیوستگی و ارتفاع ۵۰، ۱۲۵ و ۲۰۰ میلی‌متر

نتایج تاثیر تغییرات قطر ناپیوستگی‌ها

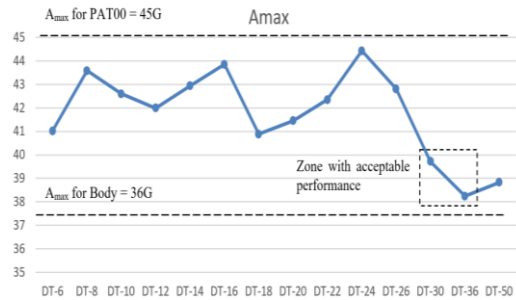
در شکل ۲۰ توزیع تنش و الگوی تاشدگی برای هر یک از ۱۴ مدل معرفی شده، دیده می‌شود. از دید کلی، الگوی تاشدگی برای همه‌ی مدل‌ها تقریباً ثابت است.



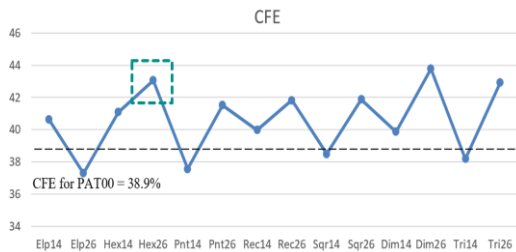
شکل ۲۰- نتایج تغییرات قطر ناپیوستگی‌ها



شکل ۲۳- تغییر حالت برای مدل DIM-26 در تغییرات شکل هندسی ناپیوستگی‌ها



شکل ۲۲- بیشینه شتاب انتهای مدل با قطر سوراخ متفاوت



شکل ۲۴- معیار CFE در تغییرات شکل هندسی ناپیوستگی‌ها

نتایج تغییرات تعداد و جانمایی ناپیوستگی‌ها

بعد از ثابت ماندن شکل ناپیوستگی، افزایش تعداد ناپیوستگی و همچنین تغییر چیدمان آنها بر اساس تحلیل مقدار ویژه مدل‌سازی شده است. الگوی تاشدگی برای مثالی از این مدل‌ها یعنی مدل D30-4-IE در شکل ۲۵ قابل مشاهده است.

نتایج تغییرات شکل هندسی ناپیوستگی‌ها

در شکل ۲۳ تغییر حالت برای مدل DIM-26 مثال زده شده است. همان‌طور که در شکل ۲۴ نشان داده شده است، از بین تمامی مدل‌های با مساحت ۱۵۴ میلی‌متر مربع، DT-14 که دارای ناپیوستگی دایروی است، CFE بالاتری را دارا است. همین اتفاق برای مدل‌هایی که مساحت ۵۳۱ میلی‌متر مربعی دارند نیز اتفاق می‌افتد. در DIM-26 نیز که CFE برابر با حالت متناظر دایروی است، دیده می‌شود که جذب انرژی پایین‌تری اتفاق می‌افتد. همان‌طور که در مدل‌های قبل نیز مشاهده شد، در هر مدل هندسی، سوراخ‌های کوچک‌تر عملکرد بدتری در برابر پارامترهای تحمل آسیب داشته‌اند.

دلیل اینکه شکل هندسی دایره بهترین عملکرد را داشته است، می‌تواند به خاطر عدم ایجاد تمرکز تنش در اطراف ناپیوستگی باشد. همان‌طور که گفته شد، یکی از نکات موثر، جلوگیری از حذف المان به وسیله افزایش تنش و خرابی است. در این قسمت با انتخاب دایره به‌عنوان ناپیوستگی از این مقوله جلوگیری شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، بدترین حالت مربوط به ناپیوستگی مثلثی کوچک است.

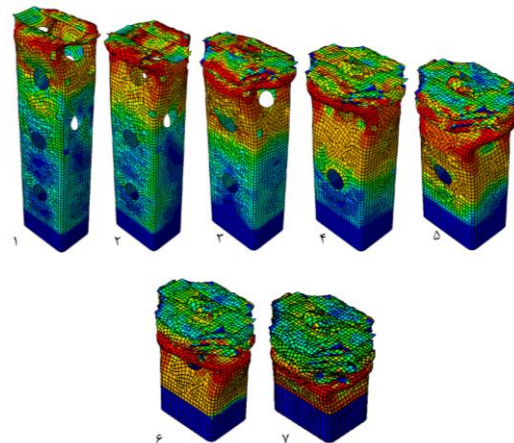
در حالت کلی با افزایش تعداد سوراخ‌ها نیرو و شتاب اولیه کاهش یافته، و در نتیجه CFE افزایش می‌یابد؛ ولی شتاب وارد بر بدن در قسمت انتهایی بیشتر شده است. لازم به ذکر است که قسمت انتهایی در هیچ کدام از مقالات مقدمه، بررسی نشده است، ولی چون در نهایت شتاب غیر مجاز به بدن وارد می‌شود، ضرورت دارد که شتاب این قسمت نیز در بازه مورد نظر قرار گیرد. همان طور که در بخش‌های گذشته گفته شد، در صورت استفاده‌ی مدل در جهت عمود بر ستون فقرات شتاب مجاز بدن بیشتر است و این عدد در محدوده می‌باشد. از طرفی در قسمت پایانی تصادف در وسایل نقلیه مهلت عمل کردن باقی سیستم‌ها نیز وجود دارد؛ بنابراین با پذیرش این ۱۵٪ خطا، مدل D30-4-IE بهترین مدل این پژوهش در نظر گرفته می‌شود.

دلیل این اتفاق همان طور که در بخش‌های قبل نیز ذکر شد، این است که جلوگیری بهتر از خرابی المان و حذف آن صورت می‌پذیرد. این موضوع به وسیله تغییرات جزئی در الگوی تاشدگی و ایده‌آل سازی نقاط تاشدگی و همچنین تیز نشدن قسمت‌های تاشدگی انجام شده است. در شکل ۲۵ الگوی تاشدگی این مدل دیده می‌شود و قابل مشاهده است که نسبت به باقی مدل‌ها تاشدگی مرتبط‌تر و با تمرکز تنش و در نتیجه آن خرابی و حذف المان کمتر وجود دارد.

جذب انرژی مدل‌های مختلف اختلاف محسوس با یکدیگر ندارند و این در واقع به دلیل این است که رویکرد این پژوهش بر تغییر مدل نبوده، بلکه بهبود مدل و کاهش شتاب‌های وارده بر بدن در دستور کار قرار گرفته است.

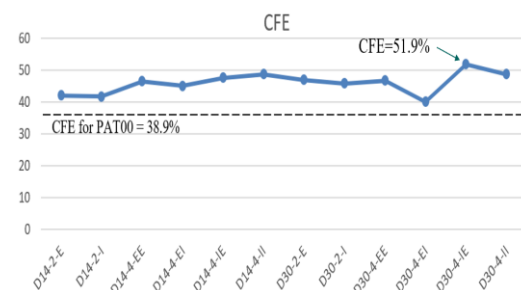
۶- نتیجه گیری

در این پژوهش رفتار پوسته‌های جاذب انرژی جدار نازک با مقطع مستطیلی توسط حل عددی در روش المان محدود در نرم افزار آباکوس و در حلگر Dynamic Explicit مورد بررسی قرار گرفته است. پس از بررسی صحت سنجی و همگرایی مش مدل، سرعت اولیه از استانداردهای موجود و به مقدار ۱۰ متر بر ثانیه مدل با سطح مقطع مستطیلی شکل جنس آلومینیوم ۷۱۰۸ اعمال شد. قید Imperfection نیز به علت وجود اختلالات هندسی و مواد توسط ضربی از حالات اول و دوم مقدار ویژه هر مدل به آن اعمال شده است. سنجش مدل بر اساس معیار CFE، نیروی بیشینه، نیروی میانگین، انرژی جذب

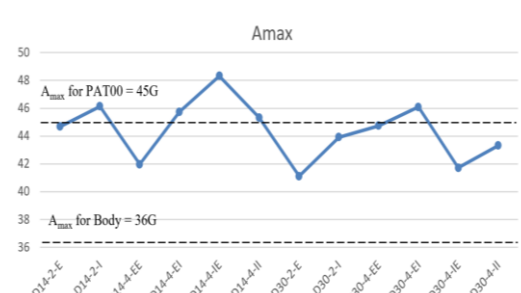


شکل ۲۵- روند تغییر حالت برای مدل D30-4-IE در تغییرات تعداد و جانمایی ناپوستگی‌ها

با توجه به شکل ۲۶ بهترین عملکرد برای مدل D30-4-IE است که در آن معیار CFE بهبود ۱۳٪ پیدا کرده است. ولی همان طور که در شکل ۲۷ نشان داده شده است، شتاب بیشینه در قسمت انتهایی به 41G افزایش پیدا کرده است که نسبت به شتاب مجاز بدن ۱۵٪ بیشتر است.



شکل ۲۶- معیار CFE در تغییرات تعداد و جانمایی ناپوستگی‌ها



شکل ۲۷- بیشینه شتاب برای مدل با افزایش تعداد ناپوستگی

مراجع

- [1] I. Simula Technologies, small airplane Crashworthiness design guide, T. R. Hurley and J. M. Vandenburg, Eds.(2002) The NASA Langley Research Center General Aviation Program Office.
- [2] J. Alexander (1960) "An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading," The Quarterly J. Mech. Appl. Math., vol. 13, no. 1, pp. 10-15.
- [3] W. Abramowicz and N. Jones (1984) "Dynamic axial crushing of circular tubes," Int. J. Imp. Eng., vol. 2, no. 2, pp. 179-208.
- [4] S. C. Yuen and G. Nurick (2008) "The energy-absorbing characteristics of tubular structures with geometric and material modifications: an overview.," Applied Mechanics Reviews, vol. 61, no. 2.
- [5] A. Ghamarian and M. T. Abadi (2011) "Axial crushing analysis of end-capped circular tubes," Thin-Walled Structures, vol. 49, no. 6, pp. 743-752.
- [6] S. Azarakhsh and A. Ghamarian (2017) "Collapse behavior of thin-walled conical tube clamped at both ends subjected to axial and oblique loads," Thin-Walled Structures, vol. 112, pp. 1-11.
- [7] B. Simhachalam, K. Srinivas and C. Lakshmana Rao, "Energy absorption characteristics of aluminum alloy AA7XXX and AA6061 tubes
- [16] Q. Estrada, D. Szwedowicz, M. Baltazar, C. Cortes, T. Majewski and C. A. Estrada (2015) "The performance of energy absorption in structural profiles with different discontinuities," The Int J. Adv. Manufac. Tech., vol. 84, no. 5-8, pp. 1081-1094, 27.
- [17] Q. Estrada, D. Szwedowicz, A. Rodriguez-Mendez, M. Elías-Espinosa, J. Silva-Aceves, J. Bedolla-Hernández and O. A. Gómez-Vargas (2019) "Effect of radial clearance and holes as crush initiators on the crashworthiness performance of bi-tubular profiles," Thin-Walled Structures, vol. 140, pp. 43-59, 1.
- [18] Q. Estrada, D. Szwedowicz, A. Rodriguez-Mendez, O. A. Gómez-Vargas, M. Elias-Espinosa and J. Silva-Aceves (2018) "Energy absorption performance of concentric and multi-cell profiles involving damage evolution criteria," Thin-Walled Structures, vol. 124, pp. 218-234.
- [19] Q. Estrada, D. Szwedowicz, J. Silva-Aceves, T. Majewski, J. Vergara-Vazquez and A. Rodriguez-Mendez (2017) "Crashworthiness behavior of aluminum profiles with holes considering damage criteria and damage evolution," Int. J. Mech. Sci., vol. 131, pp. 776-791.

شده، SEA و بیشینه شتاب وارد بر سرنشین انجام شده است. نتایج حاصل از این پژوهش به شرح ذیل است:

- با بررسی دو معیار خرابی Ductile Damage و Shear Damage دریافت شد که معیار خرابی Damage تخمین خرابی بهتر و دقیق‌تری دارد.
- با بررسی سه ارتفاع برای ناپیوستگی دایروی با قطر ۱۴ بر دو وجه روبرو، بالاترین ارتفاع یعنی ارتفاع ۵۰ میلی‌متری، بهترین ارتفاع است. این مدل مسبب بهبود ۳,۶٪ معیار CFE شده است.
- با بررسی ۱۴ مدل ناپیوستگی دایروی با قطرهای متفاوت واقع بر دو وجه روبرو و ارتفاع ۵۰، بهترین بهبود معیارهای تحمل آسیب متعلق به مدل با قطر ۳۰ میلی‌متری است. در این مدل معیار CFE بهبود ۵,۴٪ و انرژی جذب شده ویژه (SEA) بهبود ۶,۲٪ داشته است. بیشینه شتاب اعمالی به بدن به 39G کاهش پیدا کرده که ۱۰٪ با شتاب قابل تحمل برای بدن فاصله دارد و نمونه‌ی اولیه را ۱۵٪ بهبود می‌دهد.
- با بررسی هفت حالت هندسی دیگر برای دو اندازه سوراخ و در ارتفاع ۵۰ میلی‌متر، بهترین حالت برای ناپیوستگی همان حالت دایره است. در این بخش بدترین عملکرد مربوط به مدل ناپیوستگی مثلثی کوچک است.
- با بررسی ۱۲ مدل با تعداد و جانمایی متفاوت ناپیوستگی، بهترین رفتار تحمل آسیب برای قطر ۳۰ میلی‌متر و تعداد ۱۰ عدد است، به‌صورتی که وجه بلندتر سطح مقطع، جانمایی حالت تقعر و وجه کوتاه‌تر سطح مقطع، جانمایی حالت تحدب داشته باشد. در این حالت معیار CFE، بهبود ۱۳٪ پیدا می‌کند. بیشینه شتاب در بازه ۰/۰۱ تا ۰/۱ ثانیه انتهایی، ۱۵٪ نسبت به بیشینه شتاب مجاز بدن خطا دارد ولی نسبت به مدل اولیه بهبود ۶٪ را نشان می‌دهد.
- بررسی رفتار مجموع مدل‌ها نشان دهنده این می‌باشد که بهبود رفتار تحمل آسیب به دلیل جلوگیری از خرابی المان و حذف آن است. این موضوع به وسیله تغییرات جزئی در الگوی تاشدگی و ایده‌آل سازی نقاط تاشدگی و همچنین تیز نشدن قسمت‌های تاشدگی انجام شده است.
- به آن دلیل که در این پژوهش رویکرد اصلی بر بهبود مدل بوده و نه تغییر مدل، تغییرات محسوسی در انرژی جذب شده حس نمی‌شود، ولی معیار CFE و شتاب‌های وارد بر سرنشین بهبود یافته‌اند.

- [10] M. Ferdynus (2013) "An energy absorber in the form of a thin-walled column with square cross-section and dimples," *Maintenance and Reliability*, vol. 15, no. 3, p. 253–258.
- [11] Kiasat, M. S., and A. Najibi (2008) "Numerical Analysis of Crashworthiness of Circular and Square Tubes under Axial Crashing." *ISME2008*: 14-16.
- [12] J. Marzbanrad (2011) " Modeling and Simulation of an Auto-Body Structure Considering Crashworthiness Assessment Approach Submitted to a Barrier for Energy Absorption Enhancement," *Conference on Mechanical Engineering*, no. 1.
- [13] Shariati, Mahmoud, and H. Hatami (2012) "Experimental study of SS304L cylindrical shell with/without cutout under cyclic axial loading." *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 58.1: 35-43.
- [14] D. aghjani, "The experimental and finite element analysis of energy absorbers with Grooved circular cross section by foam in modern bumper of vehicles," *Conference on Mechanical Engineering, Material and Metallurgy*, no. 5.
- [15] Jahromi, A. Ghodsbin, and H. Hatami (2017) "Energy absorption performance on multilayer expanded metal tubes under axial impact." *Thin-Walled Structures* 116 2017: 1-11.
- [20] M. Bay and A. Rahi (2020) "Investigation of crashworthiness behavior of thin-walled cylindrical tubes with cutting edges under axial and oblique quasi-static loading," *J. Mech. Eng.*, vol. 50, no. 1, pp. 37-46.
- [21] Özkan ÖZBEK, Ömer Yavuz BOZKURT, Ahmet ERKLİĞ (2019) "Crashworthiness of basalt fiber reinforced composite pipes subjected to quasi-static lateral compression". *UEMK*.
- [22] H. Hooputra, H. Gese, H. Dell and H. Werner (2004) "A comprehensive failure model for crashworthiness simulation of aluminum extrusions," *Int. J. Crashworthiness*, vol. 9, no. 5, pp. 449-464.
- subjected to static and dynamic axial load," *International J. Crashworthiness*, vol. 19, no. 2, pp. 139-152, 05 Feb 2014.
- [8] D. Sun, M. Krawiec and H. Hooputra (2017) "Characterization and Modelling of the Damage Behavior of Extruded Aluminum Profiles for Crash Simulations," *Materials Science Forum*, vol. 877, pp. 674-679.
- [9] Q. Cheng, W. Altenhof and L. Li (2006) "Experimental investigations on the crush behavior of AA6061-T6 aluminum square tubes with different types of through-hole discontinuities," *Thin-Walled Structures*, vol. 44, pp. 441-454.