

طراحی بهینه یک ساختار جدید جذب کننده ساندویچی برای سپر جلو خودرو

چکیده: در تحقیق حاضر، با ارائه ساختار جدیدی از جذب کننده ها تلاش شده است عملکرد آن نسبت به جذب کننده یکپارچه پلیمری که در سپر خودروها بکار گرفته می شود، بهبود یابد. جذب کننده ارائه شده ساختاری ساندویچی دارد بطوریکه پوسته ها و هسته به ترتیب از جنس فوم آلومینیومی و فوم پلیمری می باشند. پژوهش حاضر با استفاده از روش اجزا محدود حل و جهت انجام شبیه سازی ها از نرم افزار آباکوس استفاده شده است. همچنین شبیه سازی مسئله مطابق استاندارد ای سی ای آر ۰۴۲ (E.C.E-R042) انجام گرفته است. در نهایت با تحلیل نتایج مشاهده گردید چگالی نسبت به ضخامت تاثیر بیشتری بر عملکرد جذب کننده دارد. در تمام حالات ساندویچی بیشینه تنش فون مایسس و بیشینه کرنش پلاستیک معادل نسبت به جذب کننده پلیمری کاهش داشته است و بیشینه نیرو برخورد در بازه محدودی از چگالی پوسته نسبت به جذب کننده پلیمری کمتر بوده است. در نهایت با استفاده از روش تاگوچی بهترین ساختار برای تحمل بیشینه نیروی برخورد، بالاترین تنش فون مایسس و کرنش پلاستیک معادل محاسبه گردید که جذب کننده ساندویچی با ضخامت پوسته ۲۵ میلیمتر و چگالی ۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب به عنوان مورد منتخب معرفی شد.

واژه‌های راهنما: جذب کننده سپر، برخورد سرعت پایین، اجزا محدود، ساختار ساندویچی، فوم آلومینیومی، روش تاگوچی، آنالیز واریانس

علی افراسیابی

دانشجوی کارشناسی ارشد

حسین محمدی*

دانشیار

کامیار هاشم‌نیا

استادیار،

دانشکده مهندسی مکانیک،

دانشگاه شیراز، شیراز

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۰۲

بازنگری: ۱۴۰۲/۱۰/۰۹

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۲۶

Ali Afrasiabi
MSc. Student

Hossein
Mohammadi*
Associate Professor

Kamyar
Hashemnia
Assistant Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering,
Shiraz University,
Shiraz

Optimum designing of a new sandwich absorber structure for car front bumper

Abstract: In this study, a novel absorber design is presented to enhance performance over the conventional polymer variant in car bumpers. The new absorber adopts a sandwich structure with aluminum foam shells and a polymer foam core. Finite Element Method (FEM) and Abaqus software were employed, conforming to the E.C.E-R042 standard. Analysis indicates density has a more significant impact on performance than thickness. Across sandwich configurations, both maximum von Mises stress and plastic strain were significantly reduced compared to the polymer absorber. The maximum impact force, within a specified shell density range, was lower than the polymer counterpart. The optimal structure for maximum impact force, von Mises stress, and the plastic strain was determined using the Taguchi method. The selected item: sandwich absorber, 25mm shell thickness, and 225 kg/m³ density.

Keywords: Bumper absorber, Low-speed impact, Finite Element Method (FEM), Sandwich structure, Aluminum foam, Taguchi method, Analysis of Variance (ANOVA)

۱- مقدمه

ای را در کامپیوتر شبیه سازی کرد. روش اجزا محدود، بر اساس حل عددی مسائل کاملاً پیچیده همراه با شرایط مرزی مختلف را شبیه سازی می کند.

از جمله اولین تحقیقات مربوط به بهبود عملکرد سیستم سپر توسط چئون و همکارانش، با هدف تنظیم مصرف سوخت خودروهای سواری و کاهش گازهای گلخانه ای بدون کاهش ایمنی خودروهای سواری صورت گرفت. آن ها با استفاده از مواد مرکب در سپر خودرو مطالعات خود را آغاز کردند. برای نمونه سپر خودرویی را مورد مطالعه قرار دادند. آزمایش خمش شبه استاتیکی را بر روی سپر از جنس فولاد انجام دادند و بار دیگر تست را بر روی سپری مشابه، با جنس ماده مرکب اپوکسی با پارچه الیاف کربنی تکرار کردند. همین آزمایشات را بصورت عددی با روش اجزا محدود مجدداً انجام و نتایج هر دو روش نشان داد بجز افزایش مقاومت خمشی سپر، کاهش وزن محسوسی نیز در سپر جدید وجود دارد [۴].

سایپان و همکاران، با بررسی روش ها و دیدگاه های مختلف به بهینه سازی پوسته سپر با جنس ماده مرکب پرداختند. آن ها در انتها بهترین روش را جهت توسعه پوسته سپر انتخاب و پیشنهاد دادند بهترین ماده جهت جذب ضربه، وزن کم و زیبایی، ماده مرکب پایه پلیمر است [۵]. لیو و دی با استفاده از ضربه زننده ای آزمون برخورد با سپر خودرو را انجام دادند. ضربه زننده در هر آزمایش به ترتیب از سه فاصله متفاوت ۰/۰۷۵، ۰/۱ و ۰/۱۵ متر از سپر بصورت سقوط آزاد به وسط آن بصورت کاملاً عمودی برخورد کرد. نیرو عکس العمل در انتهای جداکننده ها و جابجایی در محل اتصال جداکننده ها و سپر اندازه گیری شد. نتایج با پاسخ های عددی و تحلیلی همخوانی قابل قبولی داشت [۶].

داوودی و همکاران، پژوهشی بر روی میزان آسیب پا، لگن، بالاتنه و سر عابر پیاده با خودرو حین تصادف داشتند و تلاش کردند راه حلی برای کاهش آسیب عابرین پیاده ارائه دهند. در این پژوهش از بالشتک از جنس ماده مرکب اپوکسی با الیاف تقویت شده به شکل بیضوی به جای جذب کننده فومی از جنس پلی پروپیلن منبسط شده استفاده شد. همچنین در پژوهش دیگر آن ها با در نظر گرفتن فاکتورهای کمی و کیفی مدنظر خود در انتخاب بهترین سپر از لحاظ ایمنی و عملکرد، هشت سپر با سطح مقطع متفاوت اما با منحنی یکسان در هندسه جلو سپر، ضخامت، ابعاد و جنس یکسان مورد بررسی قرار دادند. آن ها با شبیه سازی تست برخورد سرعت پایین در نرم افزار آباکوس سپرها را مورد ارزیابی قرار دادند و با بررسی نتایج، مناسب ترین سطح مقطع را معرفی کردند [۷، ۸]. کوریچو و همکاران، تلاش کردند سپری با

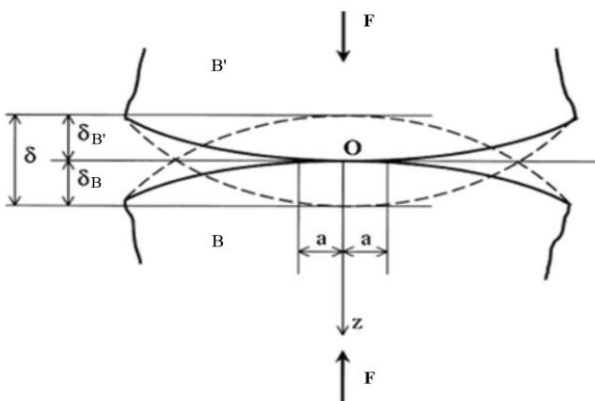
برخورد با سرعت پایین بطور قابل توجهی به دلیل حرکت آهسته در ترافیک سنگین و یا در هنگام پارک کردن خودرو رخ می دهد. برخی از سپرها به درستی طراحی نمی شوند و در هنگام برخورد با سرعت پایین نمی توانند از آسیب به قطعات مختلف جلوگیری کنند و یا استحکام کافی برای مهار نیروی وارده در طول برخورد را ندارند [۱].

سیستم سپر خودرو اجزا مختلفی دارد که یکی از آن ها جذب کننده نام دارد. این قسمت دومین جزء اصلی سیستم سپر پس از پوسته می باشد که پشت پوسته سپر قرار می گیرد. وظیفه اصلی آن مهار قسمتی از نیروی وارده برخورد می باشد. غالباً جنس آن ها از فوم های فشرده پلیمری می باشد که برای ساخت آن ها از فرآیند های خاصی استفاده شده است [۲].

در مجموع فوم ها به سه دسته پلیمری، سرامیکی و فلزی تقسیم می شوند. تلاش های دانشمندان متالوژی برای ایجاد تخلخل در فلزات باعث دستیابی به مواد مهندسی به نام فوم های فلزی شد. آن ها با ادامه آزمایشات و تحقیقات خود بر روی مواد پایه فوم ها دریافتند بیشتر فلزها توانایی تبدیل به ساختار فومی را دارند، منتهی با روش های متفاوت و گاهاً دشوار. مواد پایه این فوم ها را می توان از فلزات مختلفی مانند آلومینیوم، فولاد، نیکل، مس، روی، تیتانیوم، منیزیم و آلومینیوم انتخاب کرد. به دلیل چگالی پایین نسبت به سایر فلزات، در دسترس بودن و نقطه ذوب پایین رایج ترین آن ها آلومینیوم می باشد. برای انتخاب ماده زمینه یا پایه فوم ها نمی توان تنها به فلزات مذکور در حالت خالص و آلیاژی که از آن ها ساخته می شود اکتفا کرد بلکه از مواد مرکب پایه فلزی و ترکیبات بین فلزی مانند نیکل تیتانیوم نیز می توان استفاده کرد که در سال های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. فوم های فلزی دارای خواص جدید فیزیکی، حرارتی، صوتی، مقاومت بالا و چگالی کم هستند [۳].

با پیشرفت علم و تولید مواد جدید با ویژگی های منحصر بفرد، محققان و دانشمندان زیادی در صنعت خودرو در تلاش هستند با استفاده از مواد جدید و طراحی منحصر بفرد عملکرد سیستم سپر را بهبود ببخشند. بدین منظور اولین مطالعات و تحقیقات برای بهبود عملکرد سیستم سپر روی مدل های تجربی صورت گرفت. به دلیل پارامترهای مختلف، محدودیت ها و هزینه های زیاد، استفاده از مدل های تجربی در همه حالات امکان پذیر نبود. اخیراً با ظهور کامپیوترهای قدرتمند، روش های جدید حل و نرم افزارهای قدرتمند شبیه سازی می توان هر پدیده

در این تحقیق فقط جزء نرمال سرعت نسبی خطی مورد توجه است. با تماس دو جسم با یکدیگر مطابق شکل (۱)، نقطه تماس O بوجود می آید به طوری که در مقایسه با بقیه جسم ابعاد خیلی کمی دارد و به مرور دو جسم در یکدیگر فرو می‌روند که منجر به توسعه نقطه تماس می شود و به سطح تماس تبدیل می شود. از برخورد دو جسم به یکدیگر، فرورفتگی نسبی بین دو جسم به وجود می آید که ناشی از نیروی برخورد بین دو جسم است. نیروی برخورد بوجود آمده حین برخورد مطابق رابطه (۱ الف) بیان می شود. همچنین میزان فرورفتگی کل از رابطه (۱ ب) محاسبه می گردد [۱۴].



شکل ۱ نفوذ دو جسم B و B' حین برخورد با یکدیگر [۱۵]

$$F_{imp} = -m_B \ddot{\delta}_B = -m_{B'} \ddot{\delta}_{B'} \quad (الف)$$

$$\delta = \delta_B + \delta_{B'} \quad (ب)$$

جذب کننده سیستم سپر از جنس فوم می باشد. مدل فوم له شونده برای فوم های مختلف ارائه شده است [۱۶]. این مدل برای مدل سازی فوم هایی که معمولاً ساختارهای جذب انرژی هستند یا مواد خردشونده به غیر از فوم ها، مانند چوب استفاده می شود. در این پژوهش برای مدل سازی رفتار پلاستیک فوم آلومینیوم از سخت شوندگی همسانگرد استفاده شده است. برای رفتار پلاستیک فوم ها تابع تسلیم یا سطح تسلیم در مدل فوم له شونده با سخت شوندگی همسانگرد مطابق شکل (۲)، نمایش داده شده است که یک بیضی در صفحه تنش $p-q$ را نشان می دهد. همچنین معادله بیضی مذکور در رابطه (۲ الف) نمایش داده شده است. سطح تسلیم در سخت شوندگی همسانگرد پس از ورود به ناحیه پلاستیک بی آنکه جابجا شود، بزرگ می شود. در اصل این مدل برای فوم های فلزی ارائه شده است.

طراحی جدید بسازند که عملکرد بهتری نسبت به سپرهای پیشین از خود نشان دهد. آن ها با مطالعه بر روی نوعی ماده مرکب تلاش کردند سپری جدید بسازند و با استفاده از نمودار نیرو زمان و میزان آسیب، آن را با سپر فولادی مقایسه کنند. با استفاده از نرم افزار آباکوس، این سپر را شبیه سازی و با انجام مقایسه به این نتیجه رسیدند که عملکرد سپر با جنس ماده مرکب بسیار بهتر از فولادی می باشد [۹]. خدکار و همکاران، به تحلیل تجربی و عددی شبه استاتیکی تیر ضربه گیر سپر خودرو پرداختند. آن ها در آزمایشگاه سه تیر را که هر کدام از یک نوع خاص از آلیاژ فولاد بودند، تحت آزمایش خمش سه نقطه ای قرار دادند. آزمایش را به روش اجزا محدود تکرار کردند. نتایج دو روش با درصد کم خطا به یکدیگر شباهت داشتند و ماده منتخب برای تیر ضربه گیر پیشنهاد شد [۱۰]. لیو و همکاران پاسخ ضربه پنل ساندویچی را تحت ضربه های منفرد و مکرر مطالعه کردند و تأثیر ضخامت ورق های جلو و عقب و فوم آلومینیوم را بر ظرفیت حمل و جذب انرژی بررسی کردند [۱۱]. یینگ و همکاران عملکرد سازه های فلزی جدار نازک را با استفاده از فوم های آلومینیومی که سبک وزن و قابلیت جذب انرژی بالایی دارند بهبود بخشیدند [۱۲]. هو و همکاران طراحی بهینه ای را برای تیر ضربه گیر سپر با استفاده از ورقه های فلزی فیبری^۱ انجام دادند که منجر به بهبود عملکرد تحت تست برخورد سرعت پایین گردید [۱۳]. بررسی مراجع نشان دهنده آن است که در اغلب پژوهش ها کوشیده شده است با تغییر ماده یا ساختار قسمتی از سیستم سپر و بررسی پارامترهای مختلف که تأثیر گذار هستند، عملکرد آن را بهبود ببخشند.

در پژوهش حاضر تلاش شده است ساختار جدیدی از جذب کننده ها ارائه و با در نظر گرفتن اثر گذاری چگالی و ضخامت پوسته های جذب کننده بر روی پارامترهای مدنظر بررسی گردد و نهایتاً بهینه ترین حالت جذب کننده بین حالت های بررسی شده با استفاده از روش تاگوچی مشخص گردد. همچنین تست برخورد در سرعت بالاتر تکرار می گردد تا تأثیر آن به عنوان یک پارامتر بر روی جذب کننده بررسی شود.

۲- مبانی نظری

۲-۱- روابط و معادلات حاکم بر مسئله

در هر لحظه در طول برخورد، نرخ تغییر جزء نرمال سرعت نسبی به نیروی F_{imp} که در نتیجه به جابجایی δ منجر می شود؛ بستگی دارد [۱۴].

^۱ Fiber Metal Laminates (FMLs)

۲-۲- تجزیه و تحلیل رابطه خاکستری^۱

این مطالعه از روش تحلیل رابطه ای خاکستری برای بررسی اثر همزم آن چند پارامتر بر پاسخ خروجی استفاده کرده است. این روش برای تعیین مقدار بهینه برای هر پارامتر با تبدیل آن‌ها به متغیر پس از انجام شبیه سازی یا آزمایش و استخراج پارامترها استفاده می شود. این رویکرد امکان تعیین یک مقدار بهینه برای هر پارامتر را در حین در نظر گرفتن تعاملات بین آن‌ها فراهم می کند [۱۸].

این روش اولین بار در تحقیق [۱۹] معرفی و توسعه یافت. برای استفاده از روش تحلیل رابطه خاکستری، اولین مرحله شامل نرمال سازی داده‌ها بین ۰-۱ برای ایجاد یک رابطه خاکستری می باشد. سپس این روش از معادله های (۵ الف) و (۵ ب) برای تعیین مقدار بهینه برای هر پارامتر بر اساس اینکه مقدار کوچکتر یا بزرگتر بهتر است، استفاده می کند. این رویکرد امکان تعیین یک مقدار بهینه را برای هر پارامتر در حالی که تعاملات بین آن‌ها در نظر گرفته می شود کاربرد دارد [۱۸].

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \min_j y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}; \quad (الف ۵)$$

$$i = 1, 2, \dots, a \quad j = 1, 2, \dots, b$$

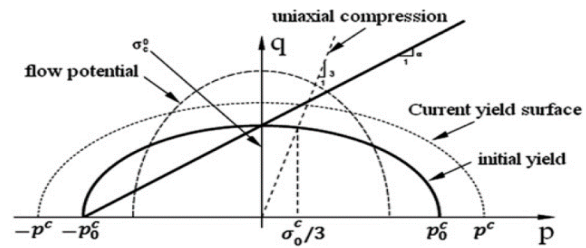
$$x_{ij} = \frac{\max_j y_{ij} - y_{ij}}{\max_j y_{ij} - \min_j y_{ij}}; \quad (ب ۵)$$

$$i = 1, 2, \dots, a \quad j = 1, 2, \dots, b$$

که در آن a و b به ترتیب تعداد شبیه سازی ها یا آزمایش - های انجام شده و تعداد پارامترهای موثر در هر شبیه سازی یا آزمایش می باشد. x_{ij} مقدار پس از تولید رابطه خاکستری و y_{ij} مقدار اصلی برای شبیه سازی i ام در پارامتر j ام است [۱۶]، [۲۰]. x_{0j} ایده آل ترین گزینه نرمال شده در بین تمامی شبیه سازی ها در پارامتر موثر j ام است. در مرحله بعد برای نشان دادن اینکه x_{ij} چه میزان به x_{0j} نزدیک است از ضریب رابطه خاکستری^۲ استفاده می شود که در رابطه (۶ الف) بیان می شود. شایان ذکر است ضریب رابطه خاکستری بزرگتر به x_{0j} نزدیکتر است [۱۶، ۱۸، ۲۰].

$$\xi_{ij} = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0ij} + \zeta \Delta_{max}}; \quad (الف ۶)$$

$$\zeta \in [0, 1]$$



شکل ۲ سطح تسلیم در صفحه تنش p - q برای فوم له شونده با سخت شونده گی همسانگرد [۱۷]

$$F = \sqrt{q^2 + \alpha^2 p^2} - B = 0 \quad (الف ۲)$$

$$B = \alpha p_c \quad (ب ۲)$$

که در رابطه (۲ الف)، p و q به ترتیب به عنوان تنش فشاری میانگین و تنش فون مایسس معرفی می شوند و در رابطه (۲ ب)، p_c مقاومت تسلیم در فشار هیدرو استاتیکی و α اندازه حدودی بردار منحنی بیضی تسلیم در صفحه تنش p - q را نشان می دهد و با نام ضریب شکل شناخته می شود (رابطه ۳ الف).

$$\alpha = \frac{3K}{\sqrt{9-K}} \quad (الف ۳)$$

$$K = \frac{\sigma_0^c}{p_0^c} \quad (ب ۳)$$

رابطه (۳ ب)، معرف نسبت تنش می باشد و σ_0^c و p_0^c به ترتیب معرف تنش تسلیم اولیه در فشار تک محوره و تنش تسلیم اولیه در فشار هیدرواستاتیک است. پارامتر β مخصوص مدل فوم له شونده با سخت شونده گی همسانگرد می باشد که در رابطه (۴ الف) آورده شده است. همچنین مطابق رابطه (۴ ب)، نسبت پواسون پلاستیک، بیانگر نسبت کرنش پلاستیک عرضی به طولی تحت بارگذاری فشاری تک محوره می باشد. برای اکثر فوم ها با چگالی پایین نسبت پواسون پلاستیک نزدیک صفر است و $\beta \sim 2/12$ می شود.

$$\beta = \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1-2\nu_p}{1+\nu_p}} \quad (الف ۴)$$

$$\nu_p = \frac{3-K^2}{6} \quad (ب ۴)$$

² Grey Relational Coefficient (GRC)

¹ Grey Relational Analysis (GRA)

(۶ ب)

$$\Delta_{0ij} = |x_{0j} - x_{ij}|$$

۳- شبیه سازی

در محاسبات ضریب تمییز γ معمولاً مقدار ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود [۱۸]. همچنین Δ_{min} و Δ_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر مقادیر Δ_{0ij} را در بین تمام شبیه سازی ها در پارامتر موثر Z ام نشان می‌دهند. ضریب رابطه خاکستری بالاتر نشان دهنده نزدیکی بیشتر پارامتر مربوطه به مقدار بهینه است و درجه رابطه خاکستری^۱ را می‌توان با استفاده از رابطه (۷) پس از محاسبه ضرایب رابطه خاکستری بدست آورد.

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^b \omega_j \xi_{ij} \quad (7)$$

در رابطه (۷)، $\sum_{j=1}^b \omega_j = 1$ ، که در آن ω_j ضریب وزنی برای پارامتر Z ام است. با تبدیل چندین ضرایب رابطه ای خاکستری به یک درجه رابطه خاکستری برای هر شبیه سازی، می‌توان تعیین کرد که درجه رابطه خاکستری بالاتر مربوط به نزدیکی بیشتر به حالت بهینه می‌باشد [۲۱].

۲-۳- آیین نامه برخورد سرعت پایین

آیین نامه و استانداردهای زیادی جهت تست برخورد خودروها وجود دارد. در پژوهش حاضر از توافقنامه اعلام شده در سازمان ملل متحد (ای سی ای) استفاده شده است. مقررات شماره ۴۲ این توافقنامه در مورد تایید تجهیزات و قطعات حفاظتی مستقر در قسمت های جلو و عقب وسایل نقلیه موتوری در برخورد سرعت پایین برای اطمینان از اینکه ضربه های جزئی صدمه جدی وارد نمی‌کند، اعمال شده است. منطقه آزمایش باید به اندازه کافی بزرگ باشد تا ضربه زننده و خودرو را در خود جای دهد تا پس از برخورد اجازه جابجایی به هر دو را بدهد. تجهیزات تست وسیله نقلیه باید بر روی یک سطح افقی، صاف و صلب قرار گیرند.

همچنین خودرو باید در حال سکون باشد، چرخ های جلو در وضعیت مستقیم قرار گیرند و ترمزها باید جدا شوند. ضربه زننده یک سازه صلب است که اصولاً از جنس فولاد سخت شده می‌باشد و جرم آن باید برابر با جرم بدون بار خودرو مورد آزمایش باشد. ضربه زننده باید با سرعت ۴ کیلومتر بر ساعت به خودرو برخورد کند و هر دو دقیقاً در یک راستا با یکدیگر برخورد کنند [۲۲].

اجزای اصلی سیستم سپر مطابق شکل (۳)، به ترتیب پوسته، جذب کننده، تیر ضربه گیر و جداکننده‌ها می‌باشند که ضخامت پوسته، تیر ضربه گیر و جداکننده‌ها به ترتیب ۳/۱، ۲/۴۵ و ۱ میلیمتر در نظر گرفته شده است. در تحقیق حاضر، ضربه زننده همراه با قید جسم صلب مدلسازی شده است. پوسته سپر از پلی اتیلن چگالی بالا و تیر ضربه گیر و جداکننده‌ها از جنس آلومینیوم ۲۰۲۴-تی ۳ می‌باشند که خواص آن‌ها در جدول (۱)، گزارش شده است. جذب کننده پلیمری از جنس فوم پلی پروپیلن گسترده و ضخامت آن ۱۰۰ میلیمتر می‌باشد، درحالیکه جذب کننده جدید مطابق شکل (۴)، ساختاری ساندویچی دارد، بطوریکه هسته همان جذب کننده پلیمری و پوسته ها از جنس فوم آلومینیومی می‌باشند که خواص آن‌ها در جدول (۲)، آورده شده است. همچنین حالت خاصی جهت بررسی عملکرد جذب کننده انتخاب شده است، به گونه ای که نیمی از ضخامت پوسته دارای چگالی ۱۵۰ و نیمی دیگر ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد و در مجموع چگالی آن ۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد. دو پارامتر موثر در شبیه سازی‌ها یعنی ضخامت و چگالی پوسته جذب کننده و همچنین ضریب اصطکاک بین سطوح در جدول (۳)، قابل مشاهده هستند. مدت زمان شبیه سازی برخورد ۰/۱۳ ثانیه و جرم خودرو ۱۳۰۰ کیلوگرم در شبیه سازی ها در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر، ابتدا طرح هندسی اولیه سیستم سپر خودرو با تمام اجزا و ضربه زننده در نرم افزار سالدورکس ترسیم و جهت استفاده به نرم افزار آباکوس منتقل و در گام بعد موادی را که مدنظر می‌باشند بصورت کامل در آباکوس تعریف و به قسمت مربوطه اختصاص گردید. اجزا مختلف مطابق با استانداردهای گفته شده جایگذاری و تنظیم شد. سپس قیود، شرایط اولیه و مرزی لحاظ گردید. در این پژوهش تماس بین ضربه زننده و سپر از نوع Surface to surface contact در نظر گرفته شده است. همچنین جهت جلوگیری از جدا شدن اجزا سپر بین آن‌ها قید Tie تعریف شده است و برای ضربه زننده قید Rigid body در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی مطابق با آیین نامه برخورد سرعت پایین طوری تنظیم شده است که ضربه زننده و خودرو در یک راستا با یکدیگر برخورد می‌کنند. از المان C3D8R برای سپر و المان R3D4 برای ضربه زننده استفاده شده است. دلیل استفاده از این نوع المان برای ضربه زننده

¹ Grey Relational Grade (GRG)

جدول ۲ خواص مکانیکی و مشخصات فوم‌های تشکیل دهنده جذب کننده [۲۵،۲۶]

فوم	مدول الاستیسیته (Mpa)		نسبت پواسون		چگالی (kg/m ³)
	نسبت پواسون	نسبت پواسون	نسبت پواسون	نسبت پواسون	
فوم پلی پروپیلن گسترده	۵/۱۳۲	۰	۰	۰	۷۰
فوم آلومینیومی	۱۵۰۰	۰/۳	۰/۳	۰/۳	۱۵۰
					۳۰۰

جدول ۳ پارامترهای موثر و مهم استفاده شده در شبیه سازی‌ها

۲۵، ۲۰، ۱۵	ضخامت پوسته جذب کننده (mm)
۳۰۰، ۲۲۵، ۱۵۰	چگالی پوسته جذب کننده (kg/m ³)
۰/۳	ضریب اصطکاک بین سطوح

۴- اعتبار سنجی

۴-۱- استقلال از شبکه

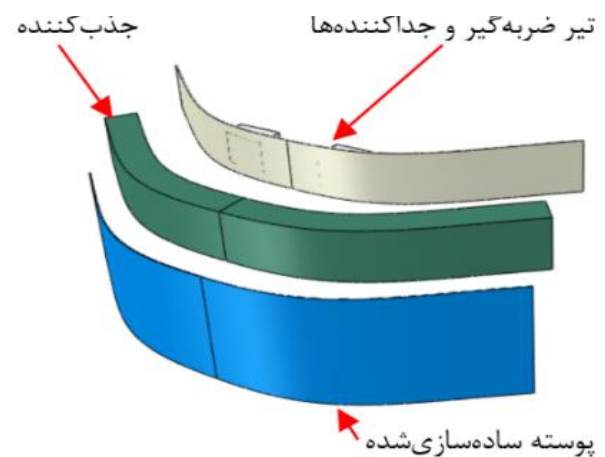
بررسی استقلال از شبکه یکی از با اهمیت ترین بخش های هر شبیه سازی می باشد. بررسی این مورد نه تنها در نرم افزار آباکوس بلکه در تمامی نرم افزارهای تحلیلی که دامنه را گسسته سازی^۱ می کنند اهمیت فراوانی دارد. بطور کلی می توان بیان کرد اگر در شبیه سازی، مطالعه استقلال از شبکه صورت نگرفته باشد، پاسخ های بدست آمده به هیچ عنوان قابل استناد نمی باشد. به بیان دیگر استقلال از شبکه یعنی انتخاب بهینه ترین مش بندی ممکن برای دریافت پاسخ های قابل قبول.

در این پژوهش نیروی حاصل از برخورد، یکی از متغیرهای مهم می باشد که در تعداد المان های مختلف مورد بررسی قرار گرفته شده است. ابتدا شبیه سازی با یک مش نسبتاً درشت انجام و متغیر مورد نظر استخراج شد. جهت صرفه جویی در وقت و هزینه محاسباتی، تعداد المان مدل یکی مانده به آخر که مورد تایید واقع شد، جهت شبیه سازی انتخاب گردید.

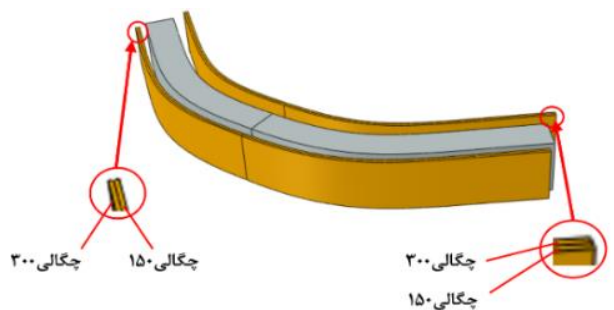
در تحقیق حاضر جهت بررسی استقلال از شبکه، ۵ مدل مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که تعداد المان ها، در نمودار شکل (۵) آورده شده است. همچنین مدل های بررسی شده، جذب کننده سیستم سپر در حالت پلیمری و بدون ساختار ساندویچی می باشند.

این می باشد که پس از طراحی ضربه زننده در سالدورکس و آمدن به آباکوس تبدیل به پوسته شده است و قید جسم صلب به آن اعمال شده است. لذا به این دلیل از المان R3D4 استفاده شده است.

نرم افزار آباکوس با حل عددی مسئله برخورد، با استفاده از حلگر Abaqus Explicit شبیه سازی را انجام داد که می توان آن را همراه با نتایج خروجی مشاهده و مورد بررسی قرار داد. در گام بعد برای بررسی پارامتر سرعت و تاثیر آن بر روی جذب کننده، شبیه سازی با سرعت ۲۵/۲ کیلومتر بر ساعت تکرار گردید.



شکل ۳ سیستم سپر در حالت اصلی به تفکیک اجزا



شکل ۴ جذب کننده با ساختار ساندویچی به همراه پوسته با ساختار ترکیبی

جدول ۱ خواص مکانیکی و مشخصات مواد تشکیل دهنده سیستم سپر [۲۳،۲۴]

ماده	مدول الاستیسیته (Gpa)	نسبت پواسون	چگالی (kg/m ³)
پلی اتیلن چگالی بالا	۱/۱۸	۰/۴۶	۹۵۰
آلومینیوم ۲۰۲۴-تی ۳	۷۰	۰/۳	۲۷۷۰

¹ Discretization

۵- بحث و نتایج

جهت مطالعه تاثیر ضخامت پوسته جذب کننده با ساختار ساندویچی از ۳ ضخامت ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی متر با دو ساختار پوسته بصورت پلیمری و ترکیبی استفاده شده است. ضخامت و چگالی پوسته دو پارامتر مجزا هستند که تاثیر جداگانه ای بر عملکرد سیستم سپر حین برخورد دارند. با در نظر گرفتن ۳ پارامتر بیشینه نیروی برخورد، بیشینه تنش فون مایسس و بیشینه کرنش پلاستیک معادل برای جذب کننده به بررسی آنها در چگالی و ضخامت های مختلف جذب کننده پرداخته شده، همچنین مقایسه ای بین حالات ساندویچی و جذب کننده پلیمری صورت گرفته است و در نهایت بهینه ترین حالت بین موارد بررسی شده انتخاب گردیده است.

در ادامه به تعریف پارامتری بی بعد پرداخته شده است که در نمودارها و نتایجی که گفته خواهد شد، کاربرد دارد و از آن استفاده فراوانی می شود.

نسبت ضخامت: این پارامتر بی بعد مربوط به ضخامت پوسته های جذب کننده می شود که عبارت است از: نسبت ضخامت پوسته به هسته جذب کننده. این پارامتر با نماد t_{SC} نشان داده شده است (رابطه (۸)).

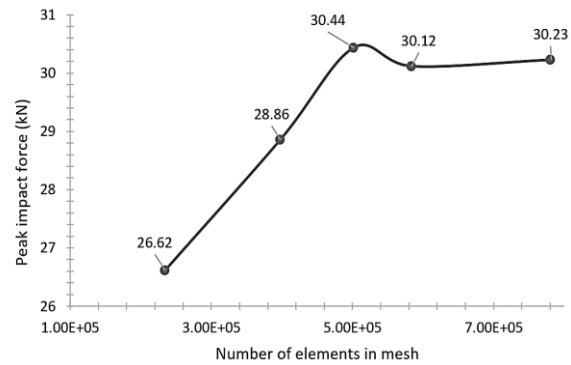
$$t_{SC} = \frac{t_{face-sheet}}{t_{core}}; t_{SC} \geq 0 \quad (8)$$

جدول ۴ نامگذاری مدل های بررسی شده

نام اختصاری مدل	توضیح
Simple	جذب کننده پلیمری
SanR-T	جذب کننده ساندویچی با ضخامت R و چگالی T
HybridR	جذب کننده ساندویچی با پوسته ترکیبی با ضخامت R

به دلیل بالا بودن تعداد مدل های بررسی شده، جهت سهولت در نامگذاری مدل ها مطابق جدول (۴) هر مدل بصورت اختصاری کدگذاری شده است.

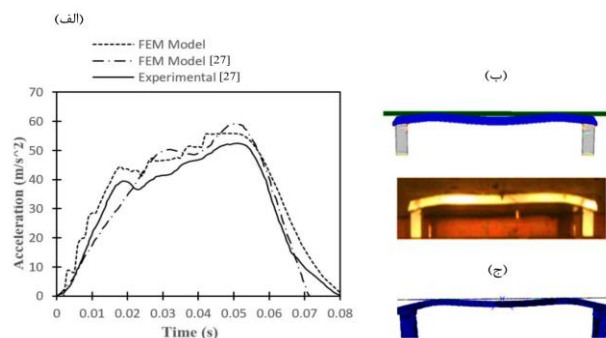
۵-۱- تأثیرات ضخامت و چگالی پوسته جذب کننده بر بیشینه نیروی برخورد



شکل ۵ مطالعه استقلال از شبکه با بررسی بیشینه نیروی برخورد

۴-۲- اعتبارسنجی مدل سازی سپر حین تست برخورد

با هدف اطمینان بخشیدن به روش مدل سازی سپر و همچنین نحوه شبیه سازی برخورد سرعت پایین، یکی از پژوهش های پیشین که در این زمینه انجام گرفته است در نظر گرفته شد و بخشی از مطالعه آن که بر روی برخورد سرعت پایین سپر خودرو بود مورد ارزیابی قرار گرفت. در بخشی از پژوهشی که توسط سان و همکاران [۲۷]، صورت گرفته، ابتدا سپر را مطابق استاندارد IIHS^۱ بصورت تجربی مورد ارزیابی قرار دادند و سپس تست برخورد را در نرم افزار، شبیه سازی و پس از حل با نتایج تجربی مقایسه کردند که پاسخها تفاوت زیادی با یکدیگر نداشتند. برای دقت در حل مسئله و بدست آمدن جوابی مشابه با مقاله به تبعیت از آن از المان هایی با سایز ۳mm استفاده شده است.



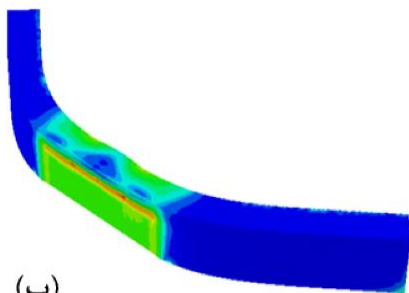
شکل ۶ (الف) شتاب بر حسب زمان و (ب) مقایسه نتایج گزارش شده منبع [۲۷] با (ج) نتیجه شبیه سازی ارائه شده

طبق نتایج گزارش شده در بخشی از تحقیق سان و همکاران، که به مطالعه تجربی و شبیه سازی عددی برخورد سرعت پایین سپر پرداختند، همانطور که در نمودار شکل (۶) قابل مشاهده می باشد، روند تغییرات شتاب در طول برخورد مطابقت خوبی با نتیجه شبیه سازی انجام شده دارد.

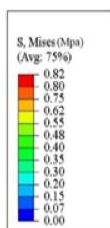
¹ Insurance Institute For Highway Safety

دو پارامتر مذکور یعنی بیشینه تنش فون مایسس و بیشینه کرنش پلاستیک معادل حین برخورد از مواردی هستند که می توانند حائز اهمیت باشند. با تغییر ساختار در جذب کننده سیستم سپر انتظار می رود که تغییراتی در عملکرد سپر حین برخورد بروز دهد. با وجود آنکه بیشترین نیروی برخورد در حالات مختلف بررسی شد، اما این موضوع حائز اهمیت می باشد که عملکرد جذب کننده نیز مطالعه شود. بدین منظور، تصمیم گرفته شد در زمانی که بحرانی ترین وضعیت سپر و بیشترین نیروی برخورد و فشردگی رخ می دهد، بررسی ها صورت گیرد. بدین منظور بررسی کانتور تنش فون مایسس هسته جذب کننده در زمان مذکور انجام شد. شکل (۸)، تصویری از جذب کننده پلیمری و هسته جذب کننده در حالتی که پوسته ساختاری ترکیبی دارد و ضخامت آن ۲۵ میلیمتر می باشد آورده شده است.

(الف)



(ب)

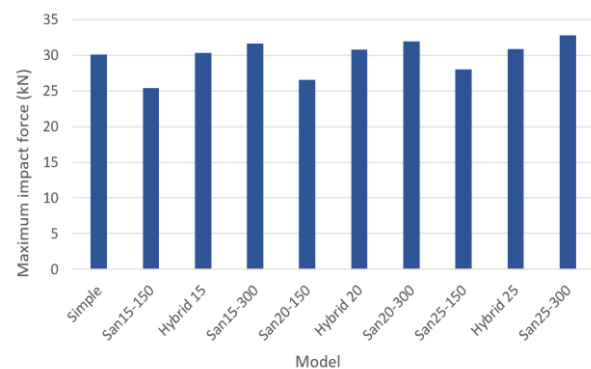


شکل ۸ تنش فون مایسس؛ (الف) جذب کننده پلیمری، (ب) هسته جذب کننده ساندویچی با ضخامت ۲۵ میلیمتر و چگالی پوسته ۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب

کرنش پلاستیک معادل در ناحیه جدایش برای تمامی حالات بررسی گردید. برای نمونه مطابق شکل (۹) مقایسه ای بین هسته جذب کننده ساندویچی ($t_{sc} = 0.25$) و جذب کننده پلیمری با در نظر گرفتن کانتور کرنش پلاستیک معادل انجام گرفته است. با بررسی تمامی کانتورها مشاهده گردید، تنش فون مایسس جذب کننده کاهش پیدا کرده است بطوریکه با افزایش چگالی پوسته جذب کننده، مقدار آن کمتر شده است، همچنین می توان

در ابتدا تغییرات نیروی برخورد برای حالتی که سیستم سپر همراه با جذب کننده پلیمری می باشد، بررسی و سپس برای حالت های مختلف دیگر با چگالی و ضخامت متفاوت پوسته جذب کننده مورد بررسی قرار گرفت. با یک بررسی جزئی بصری نمودار می توان متوجه شد که روند تمام حالات، مشابه یکدیگر می باشند.

با بررسی نمودار شکل (۷)، می توان به این نتیجه دست یافت که در چگالی ۱۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب بیشینه نیروی برخورد نسبت به جذب کننده پلیمری که مقدار آن ۳۰/۱۲۱ کیلو نیوتون می باشد، کاهش داشته است. همچنین در حالتی که چگالی پوسته جذب کننده، ۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب می باشد، مقدار پارامتر مذکور تفاوت زیادی با جذب کننده پلیمری ندارد و تقریباً برابر می باشد اما در چگالی ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب این مقدار نسبت به جذب کننده پلیمری مقدار بیشتری را نشان می دهد. در مجموع بیشترین نیروی برخورد در یک ضخامت و سرعت برخورد ثابت برای پوسته جذب کننده با افزایش چگالی، افزایش می یابد. همچنین بیشترین نیروی برخورد در یک چگالی و سرعت برخورد ثابت همیشه روند افزایشی را از خود نشان می دهد اما روند رشد آن نسبت به افزایش چگالی کمتر می باشد. نیروی برخورد در چگالی های بالای پوسته از جذب کننده پلیمری پیشی گرفت که نشان دهنده این موضوع می باشد، در افزایش چگالی پوسته جذب کننده محدودیت یا به عبارت دیگر بازه مجازی وجود دارد و متناسب با چگالی و ضخامت هسته جذب کننده، می توان مقدار آن را افزایش داد.



شکل ۷ بیشینه نیروی برخورد در ضخامت و چگالی های مختلف پوسته

۵-۲- تاثیرات ضخامت و چگالی پوسته جذب کننده بر بیشینه تنش فون مایسس و بیشینه کرنش پلاستیک معادل

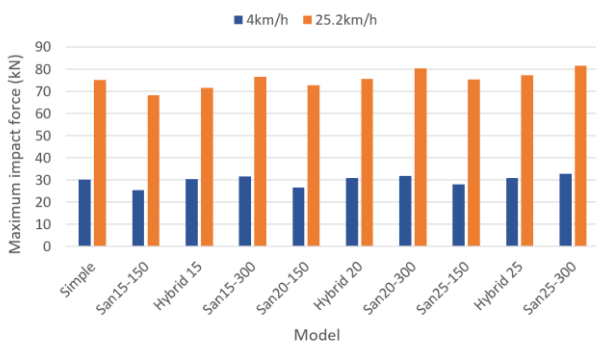
برای آگاهی از نتایج تمام مدل‌ها، در جدول (۵)، میزان کاهش بیشینه تنش فون مایسس هسته جذب کننده با ساختار ساندویچی نسبت به جذب کننده پلیمری که مقدار آن ۰/۸۲ مگاپاسکال می‌باشد، آورده شده است. همچنین در جدول مذکور میزان کاهش بیشینه کرنش پلاستیک معادل نسبت به جذب کننده پلیمری که مقدار آن ۰/۳۸۹ است، نیز قابل مشاهده می‌باشد.

۵-۳- پارامتر سرعت

در بخش‌های (۵-۱) و (۵-۲)، پارامترهای مدنظر مطابق استاندارد گفته شده مورد ارزیابی قرار گرفتند. حال در این بخش با هدف تاثیر سرعت بر عملکرد جذب کننده سپر جلو و بررسی رفتار جذب کننده در حالتی که تحت فشردگی بیشتر قرار گیرد، سرعت ضربه زننده در تست برخورد سرعت پایین از مقدار استاندارد ۴ کیلومتر بر ساعت به ۲۵/۲ کیلومتر بر ساعت افزایش یافت.

۵-۳-۱- بیشینه نیروی برخورد

تست برخورد در سرعت ۲۵/۲ تکرار گردید. بیشینه نیروی برخورد حاصله در این سرعت برای جذب کننده پلیمری ۷۵/۲۲ کیلو نیوتون را نشان داد و همانطور که در شکل (۱۰) قابل مشاهده می‌باشد، روند تغییرات بیشینه نیروی برخورد در حالات مختلف جذب کننده ساندویچی مشابه سرعت ۴ کیلومتر بر ساعت می‌باشد و تغییر خاصی در روند نمودارها مشاهده نگردید. در شکل (۱۱) تغییرات نیرو بر حسب زمان برای حالت‌های مختلف قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۰ تاثیرات چگالی و ضخامت پوسته جذب کننده با ساختار ساندویچی بر بیشترین نیرو حاصل از برخورد

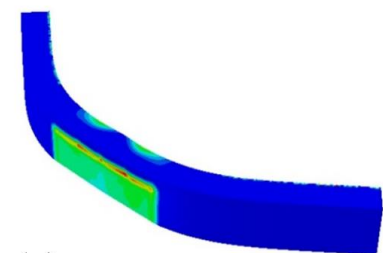
در مجموع با توجه به نتایج حاصله از شکل (۱۰) و شکل (۱۱) می‌توان نتیجه گرفت، در دو سرعت در نظر گرفته شده

عنوان کرد در همه حالات، بیشینه تنش فون مایسس جذب کننده با ساختار ساندویچی مقدار کمتری نسبت به پلیمری دارد. از دلایل کاهش مقدار آن می‌توان به خواص مکانیکی فوق العاده فوم آلومینیومی اشاره کرد و اینکه این فوم‌ها نسبت به فوم‌های پلیمری از مدول الاستیسیته و تنش تسلیم بالاتری برخوردار هستند.

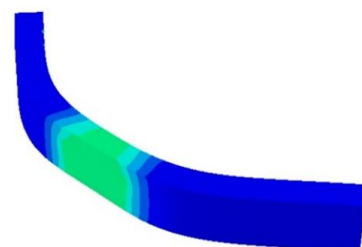
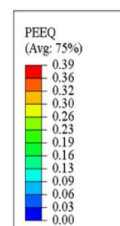
جدول ۵ میزان کاهش بیشینه تنش فون مایسس و بیشینه کرنش پلاستیک معادل هسته جذب کننده نسبت به جذب کننده پلیمری بر اساس معیار تسلیم فون مایسس و کرنش پلاستیک معادل

مدل	میزان کاهش براساس معیار تسلیم فون مایسس (%)	میزان کاهش براساس کرنش پلاستیک معادل (%)
San15-150	۱۵/۹	۲۸/۲
Hybrid 15	۳۸/۱	۳۱/۷
San15-300	۴۳/۳	۳۸/۸
San20-150	۳۱/۶	۳۱/۹
Hybrid 20	۴۴/۱	۳۴/۷
San20-300	۴۷/۲	۴۰/۴
San25-150	۳۷/۷	۴۹/۶
Hybrid 25	۴۶/۳	۵۷/۱
San25-300	۴۵/۵	۶۲/۵

(الف)

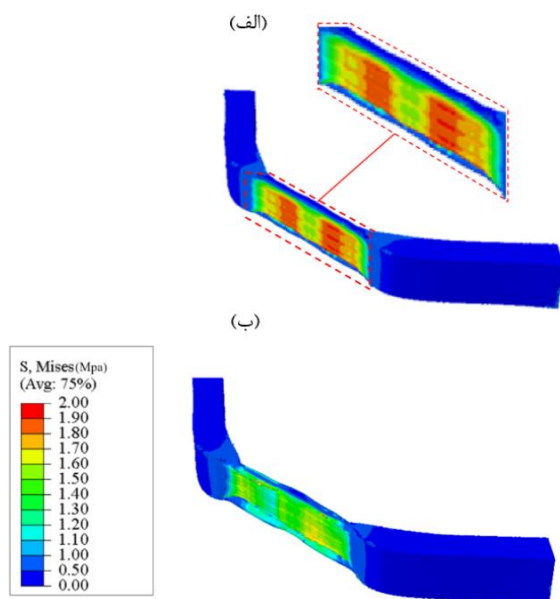


(ب)

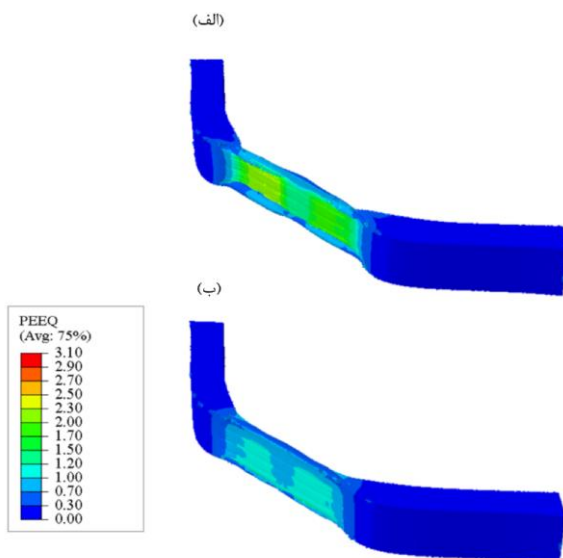


شکل ۹ کرنش پلاستیک معادل؛ (الف) جذب کننده پلیمری، (ب) هسته جذب کننده ساندویچی با ضخامت ۲۵ میلی‌متر و چگالی پوسته ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب

همچنین با بررسی کانتورهای کرنش پلاستیک معادل همه رفتارهایی که در بخش (۵-۲) به آن اشاره شد مجدداً مشاهده گردید. برای نمونه در شکل (۱۲) مقایسه ای بین جذب کننده پلیمری و هسته جذب کننده ساندویچی در زمانی که بیشترین نیروی برخورد حاصل می گردد انجام و در شکل (۱۳) بیشترین کرنش پلاستیک معادل آورده شده است. در جدول (۶) میزان کاهش دو پارامتر مدنظر در حالت ساندویچی نسبت به جذب کننده پلیمری قابل مشاهده می باشد.

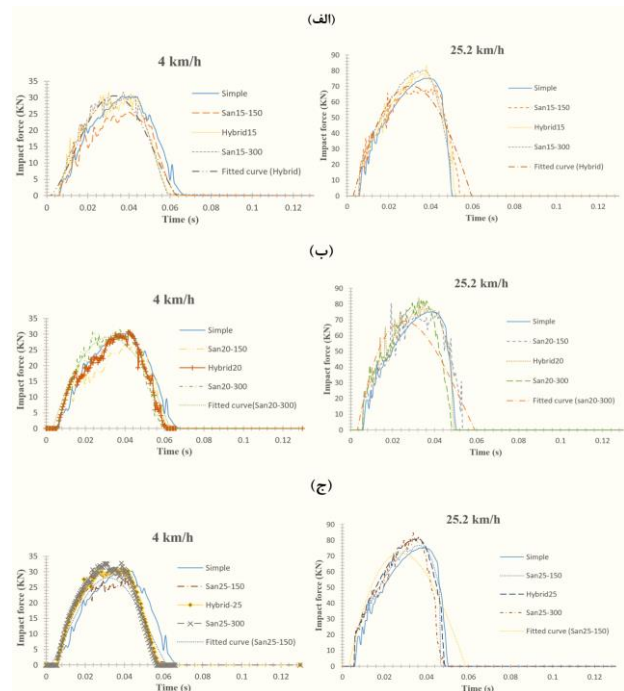


شکل ۱۲ تنش فون مایسس (سرعت ۲۵/۲ کیلومتر بر ساعت)؛ (الف) جذب کننده پلیمری، (ب) هسته جذب کننده ساندویچی با ضخامت ۲۵ میلیمتر و چگالی پوسته ۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب



شکل ۱۳ کرنش پلاستیک معادل (سرعت ۲۵/۲ کیلومتر بر ساعت)؛ (الف) جذب کننده پلیمری، (ب) هسته جذب کننده ساندویچی با ضخامت ۲۵ میلیمتر و چگالی پوسته ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب

بیشترین نیروی برخورد در یک ضخامت برای پوسته با افزایش چگالی، افزایش می یابد. همچنین بیشترین نیروی برخورد در یک چگالی و سرعت برخورد ثابت همیشه روند افزایشی را از خود نشان می دهد اما روند رشد آن نسبت به افزایش چگالی کمتر می باشد.



شکل ۱۱ تغییرات نیرو زمان؛ (الف) مقایسه حالات ساده (Simple) و ($tsc = 0.15$) (ب) مقایسه حالات ساده (Simple) و ($tsc = 0.25$) (ج) مقایسه حالات ساده (Simple) و ($tsc = 0.20$)

۵-۳-۲- پیشینه تنش فون مایسس و پیشینه کرنش پلاستیک معادل

در این بخش به تاثیر پارامتر سرعت بر پیشینه تنش فون مایسس در زمان بروز پیشینه نیروی برخورد و پیشینه کرنش پلاستیک معادل در بازه جدایش پرداخته شده است.

با بررسی کانتورها مشاهده گردید، تنش فون مایسس جذب کننده ساندویچی مانند برخورد در سرعت ۴ کیلومتر بر ساعت کاهش پیدا کرده است، بطوریکه با افزایش چگالی پوسته جذب کننده، مقدار آن کمتر شده است، همچنین می توان عنوان کرد با وجود فشردگی قابل توجهی که در هسته جذب کننده ساندویچی و جذب کننده پلیمری قابل مشاهده می باشد، در همه حالات، بیشترین تنش فون مایسس جذب کننده با ساختار ساندویچی مقدار کمتری نسبت به جذب کننده پلیمری دارد. پیشینه تنش فون مایسس و پیشینه کرنش پلاستیک معادل در جذب کننده پلیمری به ترتیب ۲ مگاپاسکال و ۳/۱۰ می باشد.

جدول ۷ پارامترها و سطوح مرتبط

پارامتر	سطح (واحد)
ضخامت	۱۵ (mm)
	۲۰ (mm)
	۲۵ (mm)
چگالی	۱۵۰ (kg/m ³)
	۲۲۵ (kg/m ³)
	۳۰۰ (kg/m ³)

جدول ۸ آرایه تعامد تاگوچی (L9)

شبه سازی	چگالی (kg/m ³)	ضخامت (mm)	نیروی برخورد (kN)	بیشینه تنش فون مایسس (Mpa)	بیشینه کرنش پلاستیک معادل (Mpa)
۱	۱۵۰	۱۵	۲۵/۴۲	۰/۷۱	۰/۳۰
۲	۱۵۰	۲۰	۳۰/۳۰	۰/۵۹	۰/۲۹
۳	۱۵۰	۲۵	۳۱/۶۴	۰/۵۷	۰/۲۸
۴	۲۲۵	۱۵	۲۶/۵۵	۰/۶۲	۰/۲۹
۵	۲۲۵	۲۰	۳۰/۸۰	۰/۵۶	۰/۲۸
۶	۲۲۵	۲۵	۳۱/۹۲	۰/۵۵	۰/۲۷
۷	۳۰۰	۱۵	۲۷/۹۸	۰/۵۹	۰/۲۶
۸	۳۰۰	۲۰	۳۰/۸۲	۰/۵۶	۰/۲۵
۹	۳۰۰	۲۵	۳۲/۷۷	۰/۵۶	۰/۲۴

جدول ۹ تولید رابطه خاکستری

شبه سازی	رابطه خاکستری		
	بیشینه نیروی برخورد (kN)	بیشینه تنش فون مایسس (Mpa)	ماکزیم کرنش پلاستیک معادل (Mpa)
۱	۱	۰	۰
۲	۰/۳۳۶۱	۰/۷۵۰	۰/۱۶۶۷
۳	۰/۱۵۳۷	۰/۸۷۵	۰/۳۳۳۳
۴	۰/۸۴۶۳	۰/۵۶۲۵	۰/۱۶۶۷
۵	۰/۲۶۸۰	۰/۹۳۷۵	۰/۳۳۳۳
۶	۰/۱۱۵۶	۱	۰/۵۰۰۰
۷	۰/۶۵۱۷	۰/۷۵۰	۰/۱۶۶۷
۸	۰/۲۶۵۳	۰/۹۳۷۵	۰/۸۳۳۳
۹	۰	۰/۹۳۷۵	۱

جدول ۶ میزان کاهش بیشینه تنش فون مایسس و بیشینه کرنش پلاستیک معادل هسته جذب کننده نسبت به جذب کننده پلیمری در سرعت ۲۵/۲ کیلومتر بر ساعت براساس معیار تسلیم فون مایسس و کرنش پلاستیک معادل

مدل	میزان کاهش براساس معیار تسلیم فون مایسس (%)	میزان کاهش براساس کرنش پلاستیک معادل (%)
San15-150	۵/۲	۲۷/۲
Hybrid 15	۱۷/۱	۳۳/۶
San15-300	۱۹/۶	۴۵/۷
San20-150	۱۱/۴	۳۵/۹
Hybrid 20	۱۹/۱	۴۷/۵
San20-300	۲۲/۲	۵۴/۶
San25-150	۱۳/۹	۴۲/۵
Hybrid 25	۲۱/۹	۵۴/۳
San25-300	<u>۲۳/۱</u>	<u>۶۱/۲</u>

۴-۵- بهینه سازی

در مطالعه انجام گرفته با هدف کاهش بیشینه نیروی برخورد، کاهش بیشینه تنش فون مایسس و کاهش کرنش پلاستیک معادل، دو پارامتر کنترل کننده یعنی چگالی و ضخامت پوسته جذب کننده در سرعت برخورد ۴ کیلومتر بر ساعت که مطابق استاندارد می باشد در نظر گرفته شده است که هر کدام دارای ۳ سطح می باشند (جدول (۷)). شایان ذکر است سرعت در این بخش مورد نظر نمی باشد به این دلیل که مطابق استاندارد تست برخورد سرعت پایین، سرعت ضربه زننده می بایست ۴ کیلومتر بر ساعت باشد. لذا در این بخش این پارامتر در نظر گرفته نشده است. روش تاگوچی با اهداف کاهش تعداد محاسبات مبتنی بر تاثیر همزمان پارامترهای مدنظر مورد استفاده قرار گرفته است. نهایتاً با استفاده از آنالیز واریانس^۱ پارامترها بر روی اهداف در نظر گرفته شده بررسی می گردد.

در جدول (۸) آرایه تعامد تاگوچی^۲ و نتایج مربوط به آن قابل مشاهده می باشد.

با بهره گیری از رابطه (۵) ابتدا مقادیر پارامترهای مدنظر، نرمالیزه می گردد. قابل ذکر است هر چقدر مقادیر ۳ پارامتر مدنظر کمتر باشد مطلوب تر می باشد (جدول (۹)).

² Taguchi orthogonal array

¹ Analysis of Variance (ANOVA)

۶- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر، شبیه سازی تست برخورد سپر شامل جذب کننده با ساختار ساندویچی با استفاده از روش اجزا محدود انجام گرفته است. اثر چگالی و ضخامت پوسته به عنوان دو پارامتر تعیین کننده بر عملکرد جذب کننده با ساختار ساندویچی بر مبنای بیشینه نیروی برخورد، بیشینه تنش فون مایسس و بیشینه کرنش پلاستیک معادل مورد بررسی قرار گرفت. براساس نتایج حاصل شده از شبیه سازی ها، افزایش چگالی و ضخامت پوسته جذب کننده رابطه مستقیمی با بیشینه نیروی برخورد جذب کننده دارد. در بررسی ها مشخص گردید در بازه مشخصی از چگالی پوسته مقدار بیشینه نیروی برخورد نسبت به جذب کننده پلیمری کاهش دارد که بیانگر این موضوع می باشد که تمام چگالی ها مجاز به انتخاب نیستند لذا باید مقدار مناسب از محدوده مشخص شده انتخاب گردد. در تمام مدل های ساندویچی بیشینه تنش فون مایسس در لحظه وقوع بیشینه نیروی برخورد که بیشترین فشردگی رخ می دهد و بیشینه کرنش پلاستیک معادل هسته در بازه جدایش برخورد مقدار کمتری نسبت به جذب کننده پلیمری داشتند. همچنین چگالی پوسته نسبت به ضخامت آن تاثیر بیشتری بر موارد بررسی شده از خود نشان داد. جهت بررسی تاثیر پارامتر سرعت بر عملکرد جذب کننده در بازه سرعت پایین مقدار از ۴ به ۲۵/۲ کیلومتر بر ساعت افزایش پیدا کرد. در این حالت، فشردگی قابل توجهی در جذب کننده مشاهده گردید اما با بررسی نتایج بدست آمده تغییری در روند نتایجی که در سرعت ۴ کیلومتر بر ساعت بدست آمد، مشاهده نگردید.

با هدف کاهش بیشینه نیروی برخورد، کاهش بیشینه تنش فون مایسس و کاهش کرنش پلاستیک معادل، دو پارامتر کنترل کننده یعنی چگالی و ضخامت پوسته جذب کننده در سرعت برخورد ۴ کیلومتر بر ساعت که مطابق استاندارد می باشد در نظر گرفته شده است که هر کدام دارای ۳ سطح می باشند. برای چگالی ۱۵۰، ۲۲۵ و ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و برای ضخامت ۱۵، ۲۰ و ۲۵ میلی متر در نظر گرفته شد و با استفاده از روش تاگوچی و تولید رابطه خاکستری و اعمال محدودیت در انتخاب چگالی بهینه ترین حالت بین موارد بررسی شده انتخاب گردید. به این ترتیب بهینه ترین جذب کننده ساندویچی با چگالی و ضخامت ۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب و ضخامت ۲۵ میلیمتر برای پوسته انتخاب گردید.

۷- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

B میزان کشیدگی بیضی تسلیم روی محور قائم (Pa)
 F_{imp} نیروی برخورد (kN)

جدول ۱۰ تولید ضریب و درجه رابطه خاکستری

رتبه سازی	ضریب رابطه خاکستری		
	بیشینه کرنش پلاستیک معادل (Mpa)	بیشینه تنش فون مایسس (Mpa)	بیشینه نیروی برخورد (kN)
۱	۰/۳۳۳۳	۰/۳۳۳۳	۱
۲	۰/۳۷۵۰	۰/۶۶۶۷	۰/۴۲۹۶
۳	۰/۴۲۸۶	۰/۸۰۰۰	۰/۳۷۱۴
۴	۰/۳۷۵۰	۰/۵۳۳۳	۰/۷۶۴۹
۵	۰/۴۲۸۶	۰/۸۸۸۹	۰/۴۰۵۸
۶	۰/۵۰۰۰	۱	۰/۳۶۱۲
۷	۰/۶۰۰۲	۰/۶۶۶۷	۰/۵۸۹۴
۸	۰/۷۵۰۰	۰/۸۸۸۹	۰/۴۰۵۰
۹	۱	۰/۸۸۸۹	۰/۳۳۳۳

جدول ۱۱ میانگین نمره رابطه خاکستری بر اساس سطوح پارامتر

سطح	چگالی	ضخامت
۱	۰/۵۲۶۴	۰/۵۷۷۳
۲	۰/۵۸۴۱	۰/۵۸۲۰
۳	۰/۶۸۰۲	۰/۶۳۱۴

در گام بعد همانطور که در جدول (۱۰) مشخص می باشد، با استفاده از روابط (۶ الف) و (۶ ب) و با در نظر گرفتن $\zeta = 0.5$ و $X_0 = 1$ ضریب رابطه خاکستری برای پارامترها تولید می شود و با بهره گیری از رابطه (۷) درجه رابطه خاکستری محاسبه می گردد. در انتها مطابق جدول (۱۱) میانگین نمره رابطه خاکستری بر اساس سطوح پارامتر محاسبه گردید.

همانطور که در جدول (۱۱) مشخص می گردد، چگالی ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب و ضخامت ۲۵ میلیمتر بیشترین امتیاز را کسب کردند که بهینه ترین حالت بین موارد بررسی شده می باشند اما از آنجا که در بخش های قبل اثبات شد، با در نظر گرفتن پارامتر بیشینه نیروی برخورد در افزایش چگالی، محدودیت وجود دارد و همانطور که مشاهده گردید بیشینه نیروی برخورد در چگالی ۳۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب از حالت اولیه پیشی گرفت که قابل قبول نمی باشد. بنابراین در این مسئله چگالی ۲۲۵ کیلوگرم به عنوان مقدار منتخب در نظر گرفته می شود.

[4] S. S. Cheon, J. H. Choi, and D. G. Lee, "Development of the composite bumper beam for passenger cars," *Composite Structures*, vol. 32, no. 1, pp. 491-499, 1995/01/01/ 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0263-8223\(95\)00078-X](https://doi.org/10.1016/0263-8223(95)00078-X).

[5] S. M. Sapuan, M. A. Maleque, M. Hameedullah, M. N. Suddin, and N. Ismail, "A note on the conceptual design of polymeric composite automotive bumper system," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 159, no. 2, pp. 145-151, 2005/01/30/ 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.01.063>.

[6] Y. Liu and M. L. Day, "Experimental Analysis and Computer Simulation of Automotive Bumper System under Impact Conditions," *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, vol. 9, no. 1, pp. 51-59, 2008/01/01 2008, doi: 10.1080/15502280701759218.

[7] M. M. Davoodi, S. M. Sapuan, and R. Yunus, "Conceptual design of a polymer composite automotive bumper energy absorber," *Materials & Design*, vol. 29, no. 7, pp. 1447-1452, 2008/01/01/ 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.07.011>.

[8] M. M. Davoodi, S. M. Sapuan, D. Ahmad, A. Aidy, A. Khalina, and M. Jonoobi, "Concept selection of car bumper beam with developed hybrid bio-composite material," *Materials & Design*, vol. 32, no. 10, pp. 4857-4865, 2011/12/01/ 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.06.011>.

[9] A. T. Beyene, E. G. Koricho, G. Belingardi, and B. Martorana, "Design and Manufacturing Issues in the Development of Lightweight Solution for a Vehicle Frontal Bumper," *Procedia Engineering*, vol. 88, pp. 77-84, 2014/01/01/ 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.129>.

[10] N. K. Khedkar, C. R. Sonawane, and S. Kumar, "Experimental and static numerical analysis on bumper beam to be proposed for Indian passenger car," *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, pp. 383-387, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.582>.

[11] K. Liu, S.-B. Kang, and S. Gao, "Experimental and analytical study on impact response of stainless steel-aluminium foam-alloy steel sandwich panels," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 179, p. 104661, 2023/09/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104661>.

[12] L. Ying, S. Wang, T. Gao, M. Dai, P. Hu, and Y. Wang, "Crashworthiness analysis and optimization of multi-functional gradient foam-aluminum filled hierarchical thin-walled structures," *Thin-Walled Structures*, vol. 189, p. 110906, 2023/08/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110906>.

F	سطح تسلیم
K	تنش فون مایسس در رفتار پلاستیک فوم ها (Pa)
p	سطح تسلیم
P_c	مقاومت تسلیم در فشار هیدرواستاتیکی (Pa)
q	تنش فون مایسس در رفتار پلاستیک فوم ها (Pa)
R	ضخامت پوسته جذب کننده ساندویچی (mm)
T	چگالی پوسته جذب کننده ساندویچی (kg/m^3)
tSC	نسبت ضخامت
α	ماتریس مقادیر واقعی
γ	ماتریس نرمالیزه مقادیر واقعی

علائم یونانی

δ	فرورفتگی نسبی
α	ضریب شکل
ζ	ضریب تمییز
ξ	ضریب رابطه خاکستری
Δ	قدرمطلق اختلاف مقدار ایده آل نرمالیزه و دیگر مقادیر در هر پارامتر
ρ	چگالی
σ_0^C	تنش تسلیم اولیه در فشار تک محوره (Pa)
p_0^C	تنش تسلیم اولیه در فشار هیدرواستاتیکی (Pa)
β	شکل بیضی جریان پلاستیک

زیرنویس‌ها

B	جسم B
p	پلاستیک
min	کمترین
max	بیشترین
a	فلز پایه فوم
f	فوم

بالانویس‌ها

..	مشقت دوم
----	----------

۸- مراجع

[1] C. R. Sonawane and A. L. Shelar, "Strength Enhancement of Car Front Bumper for Slow Speed Impact by FEA Method as per IIHS Regulation," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 99, no. 5, pp. 599-606, 2018/10/01 2018, doi: 10.1007/s40032-017-0365-y.

[2] T. Wang and Y. Li, "Design and analysis of automotive carbon fiber composite bumper beam based on finite element analysis," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 7, no. 6, p. 1687814015589561, 2015/06/01 2015, doi: 10.1177/1687814015589561.

[3] A. K. Shukla and J. D. Majumdar, "Studies on Microstructure and Mechanical properties of Aluminium Foam prepared by Spray Forming Route," *Procedia Manufacturing*, vol. 35, pp. 861-865, 2019/01/01/ 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.032>.

- [21] C.-P. Fung, C.-H. Huang, and J.-L. Doong, "The study on the optimization of injection molding process parameters with gray relational analysis," *Journal of reinforced plastics and composites*, vol. 22, no. 1, pp. 51-66, 2003.
- [22] T. Hinz and R. Lewkowicz, "Some selected methods and purpose of the low speed tests for estimation of the vehicle bumpers vulnerability to damage," *Mechanik*, vol. 90, pp. 476-479, 05/01 2017, doi: 10.17814/mechanik.2017.5-6.62.
- [23] L. Chang, Y. Patel, H. Wang, and J. Williams, "The partitioning of plastic energy in cutting tests," *Procedia Structural Integrity*, vol. 2, pp. 309-315, 2016.
- [24] N. Alexopoulos and P. Papanikos, "Experimental and theoretical studies of corrosion-induced mechanical properties degradation of aircraft 2024 aluminum alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 498, no. 1-2, pp. 248-257, 2008.
- [25] A. G. Hanssen, Y. Girard, L. Olovsson, T. Berstad, and M. Langseth, "A numerical model for bird strike of aluminium foam-based sandwich panels," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 32, no. 7, pp. 1127-1144, 2006/07/01/ 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.09.004>.
- [26] D. S. Cronin and S. Ouellet, "Low density polyethylene, expanded polystyrene and expanded polypropylene: Strain rate and size effects on mechanical properties," *Polymer Testing*, vol. 53, pp. 40-50, 2016/08/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.04.018>.
- [27] G. Sun, X. Wang, J. Fang, T. Pang, and Q. Li, "Parallelized optimization design of bumper systems under multiple low-speed impact loads," *Thin-Walled Structures*, vol. 167, p. 108197, 2021/10/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108197>.
- [13] W. Hou, M. Li, X. Zhang, Z. Liu, and L. Sang, "Design and optimization of the bumper beam with corrugated core structure of fiber metal laminate subjected to low-velocity impact," *Thin-Walled Structures*, vol. 187, p. 110746, 2023/06/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.110746>.
- [14] W. J. Stronge, *Impact mechanics*. Cambridge university press, 2018.
- [15] S. He, W. Liu, and X. Li, "Prediction of impact force of debris flows based on distribution and size of particles," *Environmental Earth Sciences*, vol. 75, no. 4, p. 298, 2016/02/11 2016, doi: 10.1007/s12665-015-5180-2.
- [16] V. S. Deshpande and N. A. Fleck, "Isotropic constitutive models for metallic foams," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 48, no. 6, pp. 1253-1283, 2000/06/01/ 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-5096\(99\)00082-4](https://doi.org/10.1016/S0022-5096(99)00082-4).
- [17] A. Ghamarian, H. R. Zarei, and M. T. Abadi, "Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes," *Thin-Walled Structures*, vol. 49, no. 10, pp. 1312-1319, 2011/10/01/ 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2011.03.005>.
- [18] Y. Kuo, T. Yang, and G.-W. Huang, "The use of a grey-based Taguchi method for optimizing multi-response simulation problems," *Engineering Optimization*, vol. 40, no. 6, pp. 517-528, 2008/06/01 2008, doi: 10.1080/03052150701857645.
- [19] S. Liu and Y. Lin, "Introduction to Grey Systems Theory," in *Grey Systems: Theory and Applications*, S. Liu and Y. Lin Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 1-18.
- [20] W. Yan, E. Durif, Y. Yamada, and C. Wen, "Crushing Simulation of Foam-Filled Aluminium Tubes," *Materials Transactions - MATER TRANS*, vol. 48, pp. 1901-1906, 07/01 2007, doi: 10.2320/matertrans.MRA2007071.