



تأثیر محرک‌های مختلف لبه بر رفتار تصادم یک جعبه تصادف کامپوزیتی

مهسا جهانی^۱، حمید بهشتی^{۲*}، محمد حیدری رارانی^۳

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان

*اصفهان، صندوق پستی 81746-73441، hamid.beheshti@eng.ui.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>در دهه‌های اخیر، کامپوزیت‌ها به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا کاربردهای گسترده‌ای در صنایع مختلفی از جمله هوافضا و خودروسازی دارند. جعبه تصادف‌ها به عنوان جاذب انرژی برای جلوگیری از صدمه به سرنشینان خودرو، بین سپر و شاسی قرار می‌گیرند. به علت اهمیت حفظ جان سرنشینان، کاهش نیروی بیشینه جعبه تصادف پس از وقوع برخورد بسیار حائز اهمیت است. به طور کلی، یک جعبه تصادف ایده‌آل دارای جذب انرژی مخصوص بالاتر و نیروی بیشینه پایین‌تر است. بنابراین دست‌یابی به ابزار طراحی پیش‌بینی کننده‌ای که بتواند رفتار سازه‌های جدارنازک کامپوزیتی را تحت ضربه و یا بارگذاری فشاری پیش‌بینی کند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، در ابتدا به منظور بررسی صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس، یک جعبه تصادف کامپوزیتی مطابق تحقیق تجربی موجود، شبیه‌سازی شده و منحنی نیرو-جابجایی حاصل از نتایج تحلیل عددی با نتایج تجربی موجود مقایسه شد. پس از اطمینان از صحت روش حل، به منظور ارائه راهکار کلی برای کاهش نیروی بیشینه جعبه تصادف‌ها، یک جعبه تصادف کامپوزیتی مدل‌سازی شد و تأثیرات سه نوع محرک لبه بر رفتار تصادم آن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که وجود محرک لبه در جعبه تصادف‌های شبیه‌سازی شده تأثیر مثبتی در عملکرد آن‌ها داشته است.</p>	<p>دریافت: ۹۵/۱۰/۱۳ پذیرش: ۹۶/۱/۱۶</p> <p>کلیدواژگان: جعبه تصادف جاذب انرژی کامپوزیت محرک لبه</p>

Effect of different triggering on crashworthiness of composite crash box

Mahsa Jahani, Hamid Beheshti*, Mohammad Heidari-Rarani

Department of Mechanical Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran.

* P.O.B. 81746-73441, Isfahan, Iran, hamid.beheshti@eng.ui.ac.ir

Keywords

Crash box
Energy absorber
Composite
Edge trigger

Abstract

In recent decades, composite materials have wide range of applications in different industries such as aerospace and automotive due to their high strength to weight ratio. Crash box uses as energy absorber in automobiles between bumper and chassis to prevent damage to passengers. Due to high importance of passenger's safety, reduction of maximum load of crash box after crash is very important. In general, an ideal crash box has higher specific energy (SEA) and lower maximum load. Therefore, it is very important to have a predictive design tool to be able to simulate the response of thin-walled structures under impact or crash loading. In this study, at first to validate the numerical simulation, a composite crash box is simulated in Abaqus/Explicit, according to available experimental research and extracted force-displacement curve from numerical simulation is compared with available experimental results. After ensuring the solution method, in order to provide an overall strategy to reduce the amount of maximum load of crash boxes, a composite crash box is modelled and the effects of three different triggers on collapse behavior, especially on maximum load is evaluated. Results show that presence of trigger in simulated crash boxes has a positive effects on their performance.

۱-مقدمه

کشورهای منطقه قرمز خطرناک در تصادفات جاده‌ای است و رتبه پنجم دنیا را دارد [2]. بررسی رفتار جذب انرژی مواد کامپوزیتی، ترکیب بی‌نظیری از کاهش وزن سازه و بهبود ایمنی خودرو و یا حداقل ایمنی برابر در مقایسه با سازه‌های فلزی در تصادفات ارائه می‌دهد. به عبارت دیگر به کار بردن کامپوزیت‌ها در جعبه تصادف‌ها^۱، به علت دارا بودن چگالی پایین‌تر از فلزات، جذب انرژی مخصوص^۲ را افزایش می‌دهد. مواد کامپوزیتی با دارا بودن الیاف

در سال‌های اخیر، تصادفات رانندگی یکی از مهم‌ترین عوامل تلفات انسانی در کشورها محسوب می‌شود، به همین دلیل کاهش تصادفات رانندگی از سوی مجامع بین‌المللی برای کشورهای جهان در دستور کار قرار گرفته است. طبق آمار منتشر شده در مهرماه 1394، خبرگزاری مهر [1]، ایران در 14 سال اخیر 315 هزار کشته داشته است و این به معنای مرگ روزانه 61 شهروند ایرانی در تصادفات جاده‌ای است. آمار منتشر شده توسط سازمان بهداشت جهانی نیز نشان می‌دهد، ایران با تعداد 43.8 کشته در هر 100 هزار نفر، جزء

¹ Crash boxes

² Specific energy absorption (SEA)

Please cite this article using:

Jahani, M. Beheshti, H. and Heidari-Rarani, M., "Effect of different triggering on crashworthiness of composite crash box", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 3, pp. 327-336, 2017.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

چیو^{۱۲} و همکارانش [30] تئوری آسیب جدیدی برای بررسی تخریب سازه‌های کامپوزیتی جدارنازک تحت بارگذاری ضربه ارائه دادند.

در شبیه‌سازی جعبه تصادف، سه بخش اصلی به طور مجزا مطابق با شرایط بارگذاری، هندسه و خواص نمونه آزمایشگاهی شبیه‌سازی می‌شوند. این سه بخش شامل جزء پایینی، بدنه اصلی و صفحه بالایی است. در اغلب دستگاه‌های آزمون برخورد، جعبه تصادف از یک سمت ثابت بوده و برخورد از سمت دیگر انجام می‌پذیرد، بنابراین در شبیه‌سازی‌ها درجه آزادی جزء پایینی صفر در نظر گرفته شده و صفحه بالایی نیز به عنوان صفحه ضربه‌زننده در نظر گرفته می‌شود. به طور کلی جعبه تصادفی ایده‌آل‌تر است که جذب انرژی مخصوص بیش‌تر و نیروی بیشینه کم‌تری داشته باشد. استفاده از مواد کامپوزیتی افزایش جذب انرژی مخصوص را فراهم می‌کند اما برای کاهش نیروی بیشینه باید مکانیزم مؤثری طراحی شود. مکانیزم محرک علاوه بر کاهش نیروی بیشینه با ایجاد یک نقص ساختاری می‌تواند باعث تغییر مود تخریب شود. محل ایجاد یک محرک در سازه نحوه فروپاشی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و اندازه و شکل لبه‌های داخلی بر مقدار نیروی بیشینه اثر می‌گذارد. در همین راستا در سال‌های اخیر، کاربرد مکانیزم محرک در جعبه تصادف‌ها مورد توجه برخی محققین قرار گرفته است. سمیر^{۱۳} و همکارانش [31] تأثیر مکانیزم محرک بر جذب انرژی جدارنازک‌های مقطع مربعی را مطالعه کردند. طبق نتایج آن‌ها مکانیزم محرک، جذب انرژی و بازده نیرویی را افزایش می‌دهد. هوانگ^{۱۴} و وانگ^{۱۵} [32] تأثیر وجود دو نوع خاصی از محرک لبه (مورب و تاجی) در جعبه تصادف‌ها را مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج آزمایشگاهی آن‌ها هر دو محرک لبه توانستند نیروی بیشینه را کاهش دهند. اما محرک لبه تاجی در مقایسه با محرک لبه مورب، جذب انرژی مخصوص تقریباً یکسان و بازده نیرویی بالاتری داشت. کاکوگیانیس^{۱۶} و همکارانش [33] اثر جرم و زاویه محرک لبه مثلثی بر پاسخ به ضربه دینامیکی جدارنازک استوانه‌ای کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند و از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی المان محدود استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که جدارنازک استوانه‌ای با محرک لبه مثلثی 30 درجه، جذب انرژی مخصوص بالاتری نسبت به جدارنازک استوانه‌ای با محرک لبه مثلثی 60 درجه داشته و جرم سازه با طول ضربه رابطه مستقیم داشت.

علی‌رغم مطالعات گسترده‌ی صورت گرفته در زمینه جدارنازک‌های کامپوزیتی و تأثیر پارامترهای مختلف هندسی بر عملکرد آن‌ها، اثرات اعمال محرک^{۱۷} لبه بر منحنی نیرو-جابجایی جعبه تصادف‌های کامپوزیتی کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. کاهش نیروی بیشینه در سازه‌های جاذب انرژی وسایل نقلیه، به دلیل اهمیت حفظ جان سرنشینان بسیار مهم می‌باشد. به همین دلیل در ادامه ضمن شبیه‌سازی جعبه تصادف کامپوزیتی و اطمینان از نتایج حاصل، اثر وجود محرک نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. نیروی بیشینه در فروپاشی سازه به لبه‌های آن بستگی دارد. بنابراین به منظور کاهش نیروی بیشینه هندسه لبه‌های سازه می‌بایست تغییر داده شود. آنچه این مطالعه را از سایر پژوهش‌های مشابه متمایز می‌سازد، علاوه بر شبیه‌سازی جعبه تصادف کامپوزیتی و اعتبارسنجی نتایج، تعریف تابع عملکردی است که با در نظر

تقویت‌کننده در راستاهای مختلف امکان جذب مقادیر بیشتری از انرژی را با جرم پایین‌تری نسبت به فلزات فراهم می‌آورند [3]. از طرفی اخیراً در صنایع خودروسازی، رویکرد بهبود رفتار جذب انرژی نسبت به جرم مورد استفاده در قطعات مختلف خودرو، سبب شده است تا مواد کامپوزیتی به عنوان جایگزین بسیار مناسبی در این صنعت، در اجزای مختلف یک خودرو به کار گرفته شوند [4].

در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در زمینه جایگزینی جدارنازک‌های فلزی با جدارنازک‌های کامپوزیتی، به خصوص در زمینه‌ی سازه‌های جدارنازک فولادی، انجام گرفته است. در این راستا، تنگ^۱ و هو^۲ [5] و همچنین سانگ^۳ و همکارانش [6] بهبود رفتار سازه‌های جدارنازک با مقطع دوار توخالی با استحکام‌بخشی از طریق کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف را مورد بررسی قرار دادند. هدر^۴ و همکارانش [7،8]، بهبود رفتار و مزایای جایگزینی فولاد به همراه کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربنی به جای جدارنازک‌های فولادی توخالی با مقطع دوار را در خمش، دوی^۵ و همکارانش [9] در خمش و فشار، جیاو^۶ و ژاو^۷ [10] در کشش، ژاو و همکارانش [11] و شیائو^۸ و همکاران [12] در سازه‌های مقطع دوار پر شده با بتن مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌هایی بر سازه‌های جدارنازک فولادی استحکام‌بخشی شده با کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربنی تحت بارگذاری عرضی و نیروی برشی توسط ژاو و همکارانش [13] و مدل اجزا محدود آن، توسط فرناندو^۹ و همکارانش [14] انجام شد. به منظور بررسی جذب انرژی و مودهای تخریب، تعدادی از پارامترهای هندسی که خواص جذب انرژی (مانند نیروی بیشینه، نیروی متوسط، بازده نیرویی و جذب انرژی مخصوص) را تحت تأثیر قرار می‌دهند، مورد توجه برخی از محققان قرار گرفته‌اند. جدارنازک‌هایی با شکل‌های مختلف، از جمله جدارنازک‌های دوار [15-19]، جدارنازک‌های مربعی [20-22]، جدارنازک‌های مربعی کامپوزیتی [23]، جدارنازک‌های دوار کامپوزیتی چین‌دار [24]، جدارنازک‌هایی با مقاطع شش‌ضلعی و هشت‌ضلعی کامپوزیتی [25،26]، جدارنازک با مقطع بیضوی مخروطی از جنس کامپوزیت [16] و سیستم‌های کامپوزیتی با هندسه مخروط-استوانه-مخروط [27] طراحی شده و مورد آزمایش قرار گرفتند. الگالی^{۱۰} و همکارانش [28] کار آزمایشی وسیعی بر روی جدارنازک‌هایی با مقاطع دوار از جنس شیشه/پوکسی، تحت بارگذاری فشاری شبه استاتیکی و به منظور مطالعه اثر طول بر رفتار مودهای تخریب و قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها انجام دادند. طبق نتایج آن‌ها، رفتار فروپاشی و قابلیت جذب انرژی نمونه‌ها به تغییر طول حساس است. ممیلز^{۱۱} و همکارانش [29] رفتار جذب انرژی و مودهای فروپاشی یک جدارنازک با مقطع دوار از جنس کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن تحت بارگذاری فشاری محوری شبه استاتیکی را مطالعه کردند. آن‌ها تأثیر مهم‌ترین ویژگی‌های هندسی نمونه مانند طول محوری، نسبت ابعادی و ضخامت جداره را بر پاسخ فشاری و مودهای فروپاشی نمونه‌های آزمایشگاهی، بررسی کردند.

¹ Teng
² Hu
³ Song
⁴ Haedir
⁵ Doi
⁶ Jiao
⁷ Zhao
⁸ Xiao
⁹ Fernando
¹⁰ Elgalai
¹¹ Mamalis

¹² Chiu
¹³ Sameer
¹⁴ Huang
¹⁵ Wang
¹⁶ Kakogiannis
¹⁷ Trigger

المان حاصل شد. جنس ماده کامپوزیتی استفاده شده در جعبه تصادف T700/M21 است که خواص آن در جدول 1 آمده است. در جدول 1، ρ چگالی، E_{11} و E_{22} مدول الاستیسیته در راستای الیاف و عمود بر الیاف، G_{12} و G_{23} مدول‌های برشی و ν ضریب پواسون می‌باشد. G_{fc}^c ، G_{ft}^c ، G_{mc}^c و G_{mt}^c به ترتیب انرژی شکست مربوط به موده‌های کشش الیاف، فشار الیاف، کشش زمینه و فشار زمینه می‌باشند. شکل 1 شماتیکی از جعبه تصادف مورد آزمایش قرار گرفته توسط چپو و همکارانش را نشان می‌دهد.

جدول 1 خواص مکانیکی T700/M21 [30]

Table 1 Mechanical properties of T700/M21 [30]

مقدار	مشخصات ماده
1590	ρ (kg/m ³)
142	E_{11} (GPa)
8.4	E_{22} (GPa)
4.8	G_{12} (GPa)
2.9	G_{23} (GPa)
0.32	ν_{12}
2282	X_t (MPa)
1465	X_c (MPa)
65	Y_t (MPa)
290	Y_c (MPa)
108	G_{ft}^c (kJ/m ²)
58.4	G_{fc}^c (kJ/m ²)
0.331	G_{mt}^c (kJ/m ²)
1.1	G_{mc}^c (kJ/m ²)

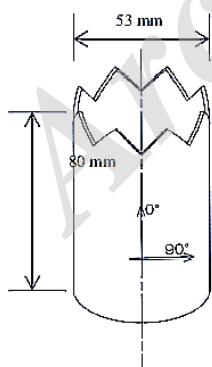


Fig. 1 Schematic of composite crash box tested by Chiu et al [30]
شکل 1 شماتیکی از جعبه تصادف کامپوزیتی مورد آزمایش چپو و همکارانش [30]

در شبیه‌سازی انجام شده، مطابق پژوهش چپو و همکارانش سازه از یک انتها ثابت نگه داشته شده و برخورد از سمت دیگر صورت پذیرفت. صفحه ضربه‌زننده و جزء پایینی به صورت صلب و جدارنازک به صورت پوسته تعریف شد. صفحه ضربه‌زننده دارای سرعتی معادل 0.5 میلی‌متر بر دقیقه در

گرفتن تمامی موارد و پارامترهای مهم یک جعبه تصادف، عملکرد آن را به خوبی ارزیابی می‌کند.

۲- معیارهای ارزیابی عملکرد جعبه تصادف‌ها

پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد جعبه تصادف‌ها به عنوان جاذب انرژی که از منحنی نیرو-جابجایی به دست می‌آیند، به شرح ذیل هستند:

۱-۲ انرژی جذب شده

این پارامتر، کل انرژی جذب شده طی فرآیند برخورد توسط سازه را نشان می‌دهد که برابر با سطح زیر منحنی نیرو-جابجایی می‌باشد [34]:

$$TEA = \int_0^d F dx \quad (1)$$

که F نیروی لحظه‌ای و x جابجایی ضربه‌زننده و یا همان طول لهیدگی^۱ می‌باشد.

۲-۲ جذب انرژی مخصوص

یکی از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی عملکرد جعبه تصادف‌ها، جذب انرژی مخصوص آن‌هاست که به صورت انرژی جذب شده توسط سازه بر واحد جرم تعریف می‌شود [34]:

$$SEA = \frac{1}{m_c} \int_0^d F dx \quad (2)$$

که m_c جرم کل سازه است.

۳-۲ بازده نیرویی

بازده نیرویی نیز امکان مقایسه عملکرد جعبه تصادف‌ها را فراهم می‌آورد و به صورت نسبت نیروی متوسط به نیروی بیشینه تعریف می‌شود [34]:

$$\eta = \frac{F_{mean}}{F_{max}} \quad (3)$$

هرچه سطح نیروی میانگین و نیروی بیشینه به هم نزدیک‌تر باشد، بازده نیرویی افزایش یافته و آن جعبه تصادف کارایی و عملکرد بهتری خواهد داشت.

۳- مدل‌سازی المان محدود

۱-۳ نحوه مدل‌سازی

با توجه به این‌که در سال‌های اخیر خودروسازان استفاده از سازه‌های جانبی سبک‌تر را در اولویت قرار داده‌اند، لذا استفاده از کامپوزیت‌ها در کاربردهای جاذب انرژی به عنوان جعبه تصادف با توجه به چگالی پایین و جذب انرژی مناسب این دسته از مواد، مطلوب به نظر می‌رسد. زیرا منجر به افزایش جذب انرژی مخصوص در مقایسه با فلزات خواهد شد که یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی عملکرد جعبه تصادف محسوب می‌شود. در این مطالعه، جعبه تصادف کامپوزیتی مطابق با پژوهش چپو و همکارانش [30] به صورت یک جدارنازک استوانه‌ای در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس شبیه‌سازی شد. در این مطالعه برای المان‌بندی این سازه در شبیه‌سازی از 5522 المان از نوع پوسته‌ای چهار گره‌ای S4R استفاده شد. پس از ایجاد مدل و تعریف بارگذاری و شرایط مرزی، حساسیت به المان بر اساس نیروی بیشینه و نیروی متوسط مورد بررسی قرار گرفت. بعد از همگرایی حل، با بررسی اندازه‌های مختلف، اندازه مش 1 میلی‌متر نتایج قابل قبولی را ارائه داد و 5522

¹ Collapse length

$$F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 \quad \sigma_{11} \leq 0 \quad (5)$$

$$F_m^t = \left(\frac{\sigma_{22}}{Y_t}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_l}\right)^2 \quad \sigma_{22} \geq 0 \quad (6)$$

$$F_m^c = \left(\frac{\sigma_{22}}{2S_t}\right)^2 + \left[\left(\frac{Y_c}{2S_t}\right)^2 - 1\right] \frac{\sigma_{22}}{Y_c} + \left(\frac{\tau_{12}}{S_l}\right)^2 \quad \sigma_{22} \leq 0 \quad (7)$$

در روابط بالا σ_{11} ، σ_{22} و τ_{12} ، مؤلفه‌های تانسور تنش هستند. X_c و X_t استحکام کششی و فشاری در راستای الیاف، Y_c و Y_t استحکام کششی و فشاری در راستای عمود بر الیاف، S_l استحکام برشی داخل صفحه‌ای و S_t استحکام برشی عرضی می‌باشد. F_f^c ، F_m^t ، F_m^c ، F_f^t از جایگزینی تنش‌ها و استحکام‌ها در روابط بالا هستند که اگر هر یک از این مقادیر برابر و یا بزرگ‌تر از یک باشد، تخریب اتفاق می‌افتد.

تا قبل از شروع آسیب، رفتار ماده الاستیک خطی است و ماتریس سفتی به صورت تنش صفحه‌ای از یک ماده ارتوتروپیک می‌باشد. پس از آن پاسخ رفتاری ماده طبق رابطه (8) محاسبه می‌شود [35]:

$$\sigma = C_d \varepsilon \quad (8)$$

که C_d ماتریس سفتی آسیب دیده است و به شکل زیر تعریف می‌شود [35]:

$$C_d = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} (1-d_f)E_1 & (1-d_f)(1-d_m)v_{21}E_1 & 0 \\ (1-d_f)(1-d_m)v_{12}E_2 & (1-d_m)E_2 & 0 \\ 0 & 0 & (1-d_s)GD \end{bmatrix} \quad (9)$$

که D در آن طبق رابطه (10) تعریف می‌شود [35]:

$$D = 1 - (1-d_f)(1-d_m)v_{12}v_{21} \quad (10)$$

d_f نشان‌دهنده وضعیت فعلی آسیب الیاف، d_m نشان‌دهنده وضعیت فعلی آسیب زمینه و d_s از چهار متغیر آسیب d_f^t ، d_m^c ، d_f^c و d_m^t مربوط به چهار مود شکست که قبلاً بحث شد، به شرح زیر مشتق شده‌اند [35]:

$$d_f = \begin{cases} d_f^t & \text{if } \hat{\sigma}_{11} \geq 0 \\ d_f^c & \text{if } \hat{\sigma}_{11} < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$d_m = \begin{cases} d_m^t & \text{if } \hat{\sigma}_{22} \geq 0 \\ d_m^c & \text{if } \hat{\sigma}_{22} < 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$d_s = 1 - (1-d_f^t)(1-d_f^c)(1-d_m^t)(1-d_m^c) \quad (13)$$

که $\hat{\sigma}_{11}$ و $\hat{\sigma}_{22}$ مؤلفه‌های تانسور تنش مؤثر هستند، تانسور تنش مؤثر همان تانسور تنش استفاده شده در معیار شروع آسیب است. برای کاهش وابستگی به اندازه المان، آباکوس از یک طول مشخصه، استفاده می‌کند که قانون بیان‌کننده آن به صورت یک رابطه تنش-جایابی همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، مطرح می‌شود. معیار رشد آسیب در لایه‌های کامپوزیت در این مدل بر مبنای انرژی است. به محض این که معیار شروع آسیب ارضا شود، بارگذاری بیشتر باعث کاهش ضرایب سفتی ماده می‌شود. کاهش ضرایب سفتی ماده نیز با متغیرهای آسیب کنترل می‌شوند که مقادیری بین صفر (حالت بدون آسیب) و یک (حالت آسیب‌دیده کامل برای مود مرتبط با آن متغیر آسیب) دارند. قانون تکامل متغیر آسیب در فاز پس از آسیب بر پایه‌ی انرژی شکست تلف‌شده در حین فرآیند آسیب (G_c)

راستای طولی سازه است. برای تعریف ضخامت، ماده و جهت‌گیری هر لایه از روش لایه‌چینی کامپوزیت¹ استفاده شد. جهت‌گیری لایه‌ها در چیدمان کامپوزیتی به صورت $[0/90/0/90]_s$ و المان‌بندی به صورت پوسته-معمولی² تعریف شد. در روش لایه‌چینی، مشخصات ماده با استفاده از جهات اصلی مربوط به راستای الیاف (محور 1) و عمود بر الیاف (محور 2) تعریف می‌شود. لذا برای تعیین جهات محورهای 1 و 2 کامپوزیت که جهت‌گیری لایه‌ها با توجه به آن تعیین می‌شود، ابتدا مختصات مورد نظر به صورت مجازی ایجاد شده و سپس به کامپوزیت اختصاص داده شد. شکل 2 جزئیات مدل سه‌بعدی را نشان می‌دهد. تماس صفحه بالایی و جزء پایینی با استوانه به صورت دارای اصطکاک با ضریب اصطکاک 0.1 تعریف شد [30]. از آن‌جا که در هنگام فروپاشی سازه، المان‌های دیواره با یکدیگر تماس پیدا می‌کنند از ویژگی خود تماسی³ برای بدنه پوسته استفاده شد.

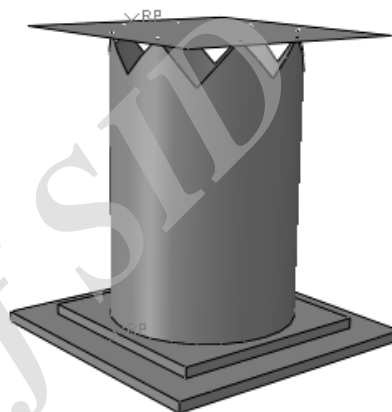


Fig. 2 Three dimensional simulated model

شکل ۲ مدل سه بعدی جعبه تصادف کامپوزیتی

۲-۲- فرآیند مدل‌سازی تخریب پیش‌رونده^۴

معیارهای مختلفی برای پیش‌بینی تخریب کامپوزیت‌ها وجود دارد. اما اکثر آن‌ها تنها قادر به پیش‌بینی شروع تخریب^۵ هستند. بنابراین بیان روشی برای پیش‌بینی پیش‌روی تخریب ضروری به نظر می‌رسد. از بین معیارهای آسیب موجود در نرم‌افزار آباکوس، این نرم‌افزار قادر است با استفاده از معیار آسیب هشین^۶، پس از پیش‌بینی شروع تخریب، با استفاده از انرژی‌های شکست راستاهای مختلف از طریق کوپل کردن معیار هشین با روش کاهش خواص مکانیکی^۷، پیش‌روندگی تخریب را نیز پیش‌بینی کند. شکست کامپوزیت‌ها در حالت‌های مختلف رخ می‌دهد، در نتیجه نمی‌تواند به راحتی توسط یک تابع بررسی شود. شروع آسیب به شروع کاهش در یک نقطه‌ی مادی منسوب است. روابط معیار هشین اصلاح شده برای حالت‌های مختلف فروپاشی که در آباکوس استفاده می‌شود، در روابط (4) تا (7) آمده است [35]:

$$F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \alpha \left(\frac{\tau_{12}}{S_l}\right)^2 \quad \sigma_{11} \geq 0 \quad (4)$$

¹ Composite layup technique

² Conventional shell

³ Self-contact

⁴ Damage evolution

⁵ Damage initiation

⁶ Hashin damage criterion

⁷ Degradation of material properties

آزمایشگاه [30]، نحوه‌ی تغییر شکل نمونه آزمایشگاهی و نمونه شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل‌های 4 و 5 و جدول 2 نشان می‌دهند، نتایج حاصل از شبیه‌سازی قابل قبول بوده و مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. بنابراین روش شبیه‌سازی قابل قبول است.

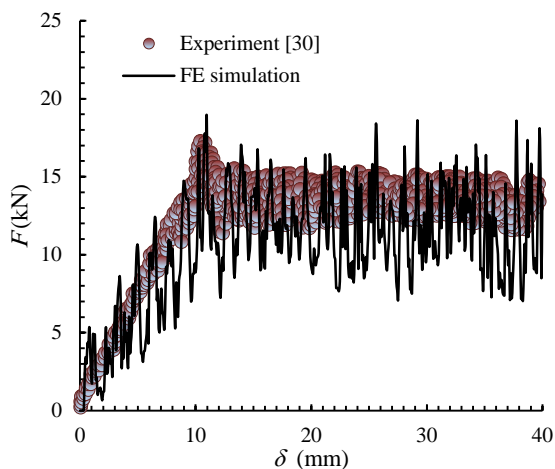


Fig. 4 Force-displacement curve comparison between laboratory sample [30] and simulated model

شکل 4 مقایسه منحنی نیرو-جابجایی نمونه آزمایشگاهی [30] با مدل شبیه‌سازی شده

جدول 2 مقایسه نتایج عددی و تجربی [30] کمیت‌های مهم یک آزمون ضربه حاصل از نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی

Table 2 Important parameter values of experimental results [30] and numerical simulation

محدود	آزمایش [35]	شبیه‌سازی المان
11.7	12.74	F_{mean} (kN)
18.9	17.5	F_{max} (kN)
0.61	0.72	η
17.11	19.05	SEA (J/g)

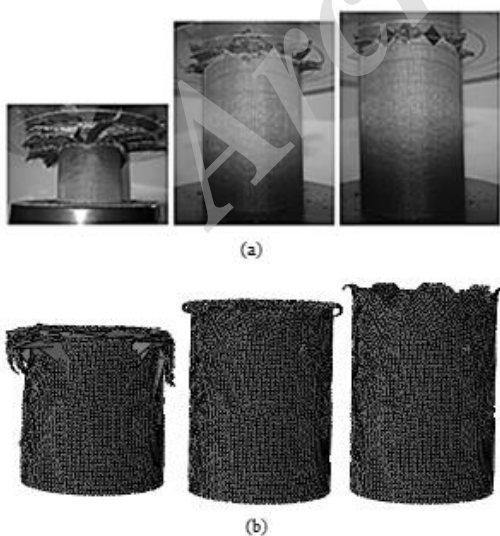


Fig. 5 Collapse behavior of composite crash box: (a) recorded in lab [30], and (b) modelled as shell (with conventional-shell elements)

شکل 5 رفتار فروپاشی جعبه تصادف کامپوزیتی: (a) ثبت شده در آزمایشگاه [30] و (b) مدل شده به صورت پوسته (با المان‌های پوسته-معمولی)

است [36]. شیب مثبت منحنی تنش-جابجایی مربوط به رفتار الاستیک خطی ماده قبل از شروع آسیب و شیب منفی آن مربوط به رفتار ماده پس از شروع آسیب است و بسته به مود شکست، متفاوت است. متغیر آسیب وابسته به جابجایی بوده و بعد از شروع آسیب، طبق رابطه (14) محاسبه می‌شود [35].

$$d = \frac{\delta_{eq}^f (\delta_{eq} - \delta_{eq}^0)}{\delta_{eq} (\delta_{eq}^f - \delta_{eq}^0)} \quad (14)$$

δ_{eq}^0 جابجایی معادل اولیه و δ_{eq}^f جابجایی معادل زمانی است که ماده به طور کامل در هر مود دچار آسیب می‌شود که هر دو در نمودار شکل 3 نشان داده شده‌اند. مقدار δ_{eq}^f در هر مود از انرژی شکست‌های مربوط به آن مود که مطابق جدول 1 به عنوان ورودی نرم‌افزار تعریف می‌شوند، محاسبه می‌گردد.

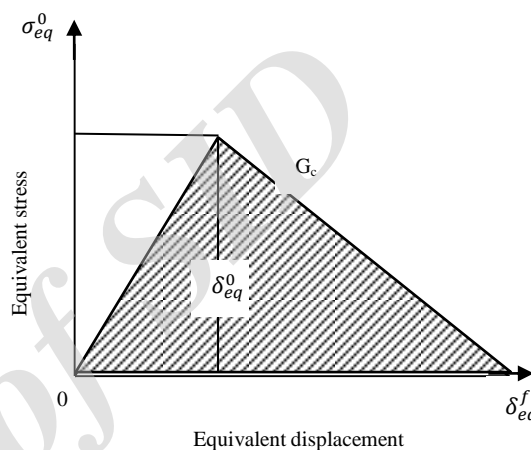


Fig. 3 Equivalent stress-displacement related to progressive damage in Abaqus/Explicit [35]

شکل 3 نمودار تنش-جابجایی معادل مربوط به آسیب پیش‌رونده آباکوس [35]

برای هر مود شکست، باید انرژی شکست، G_c ، مربوط به آن به عنوان ورودی به نرم‌افزار داده شود. G_c همان مساحت سطح زیر نمودار مشخص شده در شکل 3 است. مقدار δ_{eq}^f در هر مود بستگی به مقدار G_c آن دارد. بنابراین آباکوس برای پیش‌بینی و محاسبات مربوط به تخریب به پیش‌رونده به انرژی شکست‌های G_{fc}^f ، G_{ft}^f ، G_{mc}^f و G_{mt}^f به عنوان ورودی نیاز دارد که به ترتیب انرژی شکست مربوط به مودهای کشش الیاف، فشار الیاف، کشش زمینه و فشار زمینه می‌باشند.

۳-۳- اعتبارسنجی

شکل 4 منحنی نیرو-جابجایی حاصل از نتایج تجربی [30] و شبیه‌سازی عددی را نشان می‌دهد. چپو و همکارانش [30] این آزمایش را هفت مرتبه تکرار کردند و هر بار نمودار بار-جابجایی را با کمک دو سنسور نیرو و جابجایی، مجموعه بردهای کنترلی و سایر تجهیزات مربوط به دستگاه آزمون تصادم به دست آوردند. نقاط مشخص شده در نمودار شکل 5 مربوط به محدوده رفتاری نتایج تجربی حاصل از هفت آزمایش می‌باشد. همان‌طور که دیده می‌شود مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از شبیه‌سازی بیانگر مطابقت خوب نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی می‌باشد. بنابراین شبیه‌سازی عددی می‌تواند پیش‌بینی رفتاری مناسبی در زمینه برخورد و فشار محوری ارائه دهد. جدول 2 کمیت‌های مهم یک آزمون ضربه را به صورت عددی مقایسه می‌کند. شکل 5 نیز رفتار فروپاشی ثبت شده در

فروپاشی به لبه‌ها بستگی دارد. بنابراین به منظور کاهش نیروی بیشینه هندسه لبه‌های سازه می‌بایست تغییر داده شود. همان‌طور که در شکل 6 نشان داده شده است، محرک لبه نوع اول به شکل یخ¹، محرک لبه نوع دوم به شکل فیلت² و محرک لبه نوع سوم به شکل نوعی دندان‌گذاری و مشابه محرک لبه مورد استفاده در کار چپو و همکارانش [30] می‌باشد.

۴-۲- تعریف تابع عملکرد جهت ارزیابی کارایی جعبه تصادف

یک جعبه تصادف ایده‌آل جعبه تصادفی است که نیروی بیشینه پایین‌تر و جذب انرژی مخصوص بالاتری داشته باشد. علاوه بر آن هرچه سطح نیروی میانگین و نیروی بیشینه به هم نزدیک‌تر باشد، آن جعبه تصادف کارایی و عملکرد بهتری خواهد داشت. بازده نیروی فشاری این خاصیت را مورد توجه قرار می‌دهد و طبق رابطه (3) به صورت نسبت نیروی میانگین به نیروی بیشینه تعریف می‌شود. هرچه بازدهی نیروی فشاری سازه جاذب انرژی بالاتر باشد، کارایی آن بهتر است.

در این مطالعه، هدف مدنظر قرار دادن هر سه پارامتر نیروی بیشینه، جذب انرژی مخصوص و بازده نیرویی جعبه تصادف به منظور ارزیابی عملکرد آن است. به گونه‌ای که جعبه تصادف برتر دارای نیروی بیشینه کمتر و جذب انرژی مخصوص و بازده نیرویی بیشتر باشد. اما همواره به وقوع پیوستن اثر مثبت هر سه پارامتر شدنی نیست. بنابراین لازم است تابع وزنی‌ای شامل این پارامترها به گونه‌ای تعریف شود که بتواند از یک مجموعه ورودی ناموزون، خروجی‌های موزون و قابل اعتمادی ارائه دهد.

برای تعریف تابع وزنی تعیین کننده عملکرد جعبه تصادف، طبق آنچه گفته شد، حاصل ضرب بازده نیرویی و جذب انرژی مخصوص در صورت و نیروی بیشینه در مخرج قرار داده می‌شود تا از این طریق اثر مثبت هر پارامتر (افزایش جذب انرژی مخصوص و بازده نیرویی و کاهش نیروی بیشینه) منجر به افزایش مقدار این تابع وزنی گردد. برای از بین بردن بعد این تابع و بی-بعدسازی آن و به جهت جلوگیری از ورود متغیرهای دیگر در این تابع، کافی است این تابع در مقدار ثابتی با واحد kg/m ضرب شود. به این منظور این تابع که با W نشان داده می‌شود در جرم پرتابه ضرب و بر طول جعبه تصادف تقسیم می‌شود. در این مطالعه جرم پرتابه و طول جعبه تصادف در تمامی مراحل ثابت هستند. نهایتاً تابع عملکرد به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$W = \frac{\eta_c \times SEA \times M}{F_{max} \times L} = \frac{\eta_c \times E \times M}{F_{max} \times L \times m} \quad (15)$$

که M جرم پرتابه و در این مطالعه برابر با 300 کیلوگرم در نظر گرفته شده است و L طول جعبه تصادف می‌باشد و در تمامی مراحل 200 میلی‌متر در نظر گرفته شد. نسبت وزنی ایجاد شده در این رابطه (M/m)، نسبت وزن پرتابه به وزن سازه است که برخی از محققان اثر آن بر نتایج را مورد بررسی قرار داده بودند [41].

به منظور بررسی موازنه‌ی ابعادی، اگر جذب انرژی مخصوص بر حسب J/g و نیروی بیشینه بر حسب kN در رابطه (15) جایگذاری شوند، لازم است جرم پرتابه بر حسب kg و طول جعبه تصادف بر حسب m قرار داده شوند. موازنه‌ی ابعادی در رابطه (16) قابل مشاهده است.

$$\frac{J \times kg}{kN \times m \times g} = 1 \quad (16)$$

همان‌طور که از نتایج جدول 2 مشخص است، نتایج شبیه‌سازی عددی مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد. درصد اختلاف برای انرژی جذب شده و جذب انرژی مخصوص حدود 9 درصد و برای نیروی بیشینه 8 درصد به دست آمد. بنابراین المان‌های دوبعدی علاوه بر صرفه‌جویی در زمان حل توانستند نتایج قابل قبولی را ارائه دهند.

۴- اثر محرک لبه بر رفتار تصادم یک جعبه تصادف کامپوزیتی

۴-۱- نحوه‌ی مدل‌سازی

با توجه به مراجع و تحقیقات مختلف [38,37] صورت گرفته در زمینه جعبه تصادف و پدیده تصادم، جعبه تصادف با مقطع دوار جز مقاطع مناسب و با نتیجه مطلوب است. در نتیجه مدل نهایی شبیه‌سازی شده جعبه تصادفی با مقطع دایره‌ای است و طبق مراجع [39] و [40] طول 200 میلی‌متر و سرعت برخورد 6 متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است. همچنین جعبه تصادف از جنس کامپوزیت T700/M21 که خواص مکانیکی آن در جدول 1 آمده است، انتخاب شده است. در این شبیه‌سازی همانند اکثر آزمون‌های ارزیابی عملکرد جعبه تصادف، سازه از یک انتها ثابت نگه داشته شده و برخورد از سمت دیگر صورت می‌پذیرد. صفحه ضربه‌زننده و جزء پایینی به صورت صلب و جدارنازک به صورت پوسته تعریف شد. صفحه ضربه‌زننده دارای سرعتی معادل 6 متر بر ثانیه در راستای طولی سازه است به همین جهت از حل گر صریح استفاده شده است. جهت‌گیری لایه‌ها در چیدمان کامپوزیتی به صورت $[0/90/0/90]_s$ و المان‌بندی به صورت پوسته-معمولی تعریف شد. تماس صفحه بالایی و جزء پایینی به صورت سطح به سطح تعریف شده و از ویژگی خود تماسی برای بدنه پوسته استفاده شد.

در جعبه تصادف‌ها، محرک لبه به عنوان یک نوع نقص ساختاری در سازه شناخته می‌شود که با هدف کاهش نیروی بیشینه طراحی می‌شود. در این مطالعه تأثیر سه نوع محرک لبه مختلف برای لبه‌های بالایی مورد بررسی قرار گرفتند. شکل 6 هر سه نوع محرک لبه شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

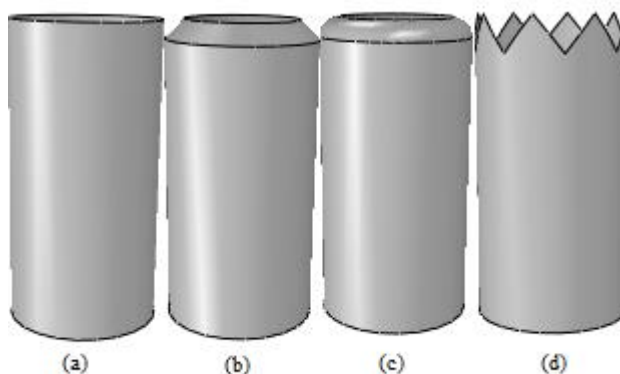


Fig. 6 Types of simulated trigger: (a) without trigger, (b) 1st trigger (chamfer), (c) 2nd trigger (fillet), and (d) 3rd trigger [30]

شکل 6 انواع محرک لبه شبیه‌سازی شده: (a) بدون محرک، (b) محرک لبه نوع اول (یخ)، (c) محرک لبه نوع دوم (فیلت) و (d) محرک لبه نوع سوم [30]

مکانیزم محرک به سازه اجازه تغییر مود فروپاشی می‌دهد و بسته به نوع آن، امکان وقوع تغییر شکل پیش‌رونده را فراهم می‌کند. محل ایجاد یک محرک در سازه نحوه فروپاشی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و اندازه و شکل لبه‌های داخلی بر مقدار نیروی بیشینه اثر می‌گذارد. اکثر نیروی بیشینه در

¹ Chamfer

² Fillet

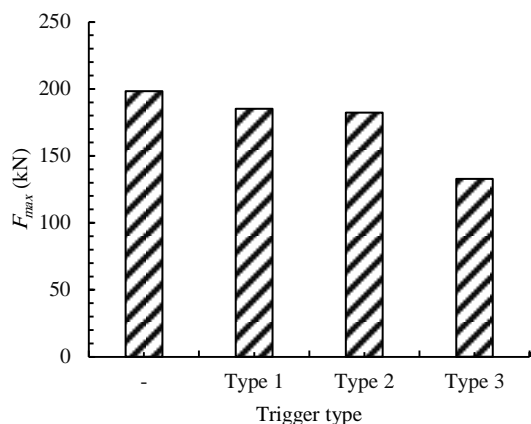


Fig. 8 Maximum force comparison of simulated crash boxes with and without trigger

شکل ۸ مقایسه نیروی بیشینه جعبه تصادف‌های شبیه‌سازی شده دارای محرک لبه و جعبه تصادف فاقد محرک

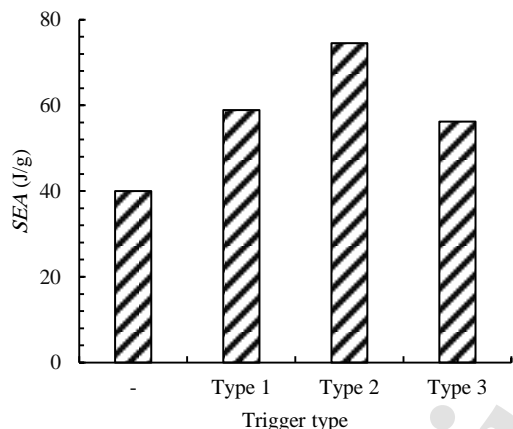


Fig. 9 Specific energy absorption and force efficiency comparison of simulated crash boxes with and without trigger

شکل ۹ مقایسه بازده نیرویی و جذب انرژی مخصوص جعبه تصادف‌های شبیه سازی شده دارای محرک لبه و جعبه تصادف فاقد محرک

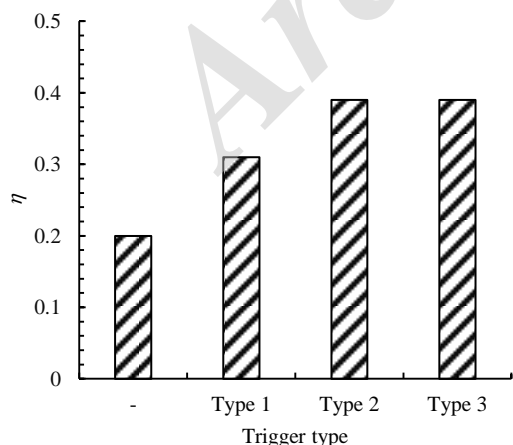


Fig. 10 Force efficiency comparison of simulated crash boxes with and without trigger

شکل ۱۰ مقایسه بازده نیرویی جعبه تصادف‌های شبیه‌سازی شده دارای محرک لبه و جعبه تصادف فاقد محرک

از آنجایی که جرم پرتابه و طول جعبه تصادف در تمامی مراحل این فصل ثابت هستند، کافی است مقادیر عددی آن‌ها در رابطه جایگذاری گردد. بنابراین رابطه‌ی تابع وزنی تعریف شده به صورت رابطه (17) بیان می‌شود.

$$P = 1500 \times \frac{\eta_c \times SEA}{F_{max}} \quad (17)$$

که باید جذب انرژی مخصوص برحسب J/g و نیروی بیشینه بر حسب kN جایگذاری شوند. هرچه مقدار تابع عملکرد (P) برای یک جعبه تصادف بالاتر باشد، عملکرد آن بهتر خواهد بود.

۵- بحث و بررسی نتایج

شکل 7 منحنی نیرو-جابجایی مربوط به جعبه تصادف‌های شبیه‌سازی شده دارای محرک لبه و جعبه تصادف فاقد محرک را نشان می‌دهد. بررسی نمودارهای شکل 8، 9 و 10 تأثیر مثبت وجود محرک لبه در طراحی و ساختار یک جعبه تصادف را با ارائه تغییرات ایجاد شده در مقادیر نیروی بیشینه، جذب انرژی مخصوص و بازده نیرویی نشان می‌دهد.

همچنین نتایج و پارامترهای مهم و مؤثر برخورد جعبه تصادف‌های شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس برای سه حالت دارای محرک‌های لبه مختلف و یک حالت بدون محرک لبه در جدول 3 آورده شده است. نتایج این جدول نشان می‌دهد که وجود محرک لبه توانسته است نیروی بیشینه را کاهش دهد و همچنین تأثیر خوبی در نتایج بازده نیرویی و جذب انرژی مخصوص گذاشته است. بررسی نتایج نشان می‌دهد که از بین سه محرک لبه شبیه‌سازی شده، محرک لبه نوع سوم در بهبود نتایج مؤثرتر است. تمامی اثرات ایجاد شده ناشی از شبیه‌سازی محرک لبه اثرات مثبتی در ارزیابی عملکرد جعبه تصادف‌ها محسوب می‌شود و مهم‌ترین آن نقش محرک لبه در کاهش نیروی بیشینه‌ی جعبه تصادف‌ها می‌باشد.

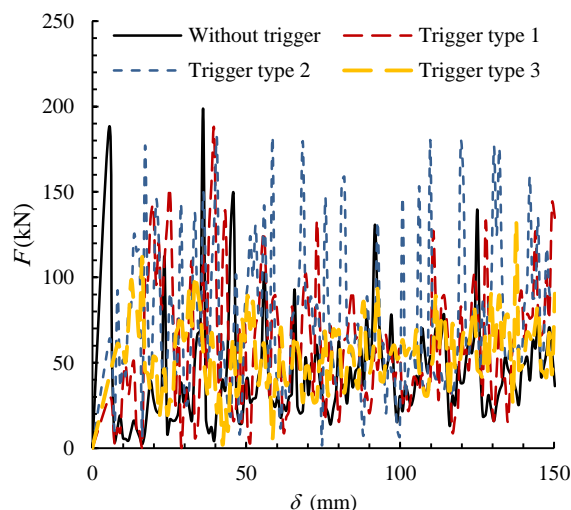


Fig. 7 Force-displacement curve comparison extracted from crash box simulation with the material of T700/M21 and three different types of triggers

شکل ۷ مقایسه منحنی نیرو-جابجایی استخراج‌شده از شبیه‌سازی جعبه تصادف با جنس T700/M21 با سه نوع محرک لبه مختلف

دوم و 309 درصد برای محرک لبه‌ی نوع سوم به دست آمد که حاکی از برتری کارایی محرک لبه‌ی نوع سوم نسبت به دو نوع دیگر است.

جدول ۳ کمیت‌های مهم جعبه تصادف‌های شبیه‌سازی شده دارای محرک لبه و جعبه تصادف فاقد محرک

Table 3 Important parameter values of simulated crash boxes with and without trigger

نوع محرک	-	نوع 1	نوع 2	نوع 3
F_{max} (kN)	198.3	185	182.3	132.7
F_{mean} (kN)	40.7	58.9	72.5	52.7
η	0.2	0.31	0.39	0.39
SEA (J/g)	40	58.9	74.5	56.2
P	60.5	148	127	247.7

همان‌طور که نتایج جدول 3 نشان می‌دهند، محرک لبه تأثیر مثبتی بر هر سه پارامتر نیروی بیشینه، جذب انرژی مخصوص و بازده نیرویی دارد. مکانیزم محرک به گونه‌ای است که با ضعف و نقص ساختاری، نحوه تخریب و فروپاشی را به نحو مطلوب تغییر می‌دهد و منجر به کاهش نیروی بیشینه، افزایش بازده نیرویی، افزایش طول ضربه و نهایتاً افزایش جذب انرژی مخصوص می‌گردد و وجود آن در کاربردهای جاذب انرژی به دلیل اهمیت حفظ جان سرنشینان در وسایل نقلیه بسیار ضروری می‌باشد. مطابق نتایج حاصل از جدول 3، با توجه به مقادیر به دست آمده برای تابع عملکرد، تمامی محرک‌های لبه شبیه‌سازی شده تأثیر مثبتی بر عملکرد جعبه تصادف داشته‌اند اما در این میان محرک لبه‌ی نوع سوم موفق‌تر عمل کرده است.

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پس از بررسی صحت روش شبیه‌سازی المان محدود جعبه تصادف کامپوزیتی از طریق مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی، مدلی کاربردی از جعبه تصادف کامپوزیتی با سه نوع محرک لبه‌ی مختلف و فاقد محرک لبه تحت شرایط یکسان در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی و مطالعه شد. به منظور ارزیابی و مقایسه عملکرد محرک لبه، منحنی نیرو-جابجایی و کمیت‌های مهم شامل نیروی بیشینه، نیروی متوسط، بازده نیرویی و جذب انرژی مخصوص برای هر مدل استخراج شده و مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج مهم حاصل از این تحقیق به صورت زیر می‌باشند:

- 1- با توجه به تطابق قابل قبول بین نتایج شبیه‌سازی عددی و نتایج تجربی، می‌توان گفت که شبیه‌سازی عددی می‌تواند پارامترهای تصادم جعبه تصادف‌های کامپوزیتی را به خوبی برآورد کند.
- 2- نیروی بیشینه‌ی تمامی جعبه تصادف‌های دارای محرک لبه کمتر از نمونه فاقد محرک لبه به دست آمد. از میان سه محرک لبه شبیه‌سازی شده، محرک نوع سوم با کاهش 30 درصدی نیروی بیشینه عملکرد بهتری در کاهش نیروی بیشینه داشته است که مطلوب این پژوهش می‌باشد.
- 3- میزان جذب انرژی مخصوص تمامی جعبه تصادف‌های دارای محرک لبه بالاتر از نمونه فاقد محرک است. در سه نمونه بررسی شده، افزایشی در حدود 40-86 درصد به دست آمده است.
- 4- محرک لبه توانست باعث افزایش راندمان نیرویی شود. این افزایش تا حدود 95 درصد در جعبه تصادف‌های دارای محرک لبه نسبت به نمونه فاقد محرک لبه به دست آمد.
- 5- محرک لبه به‌طور چشم‌گیری سبب افزایش مقدار تابع عملکرد گردید. این افزایش 144 درصد برای محرک نوع اول، 109 درصد برای محرک لبه نوع

۷- فهرست علائم

C_d ماتریس سفتی آسیب‌دیده (GPa)
d پارامتر آسیب
d_f متغیر آسیب در راستای الیاف
d_f^c پارامتر آسیب فشاری در راستای الیاف
d_f^t پارامتر آسیب کششی در راستای الیاف
d_m متغیر آسیب در راستای عمود بر الیاف
d_m^c پارامتر آسیب فشاری در راستای عمود بر الیاف
d_m^t پارامتر آسیب کششی در راستای عمود بر الیاف
d_s متغیر آسیب برشی
E مدول الاستیسیته (GPa)
F نیروی لحظه‌ای (N)
F_f^c مقدار تابع هشین در مود کشش الیاف
F_m مقدار تابع هشین در مود فشار الیاف
F_m^c مقدار تابع هشین در مود کشش زمینه
F_m^t مقدار تابع هشین در مود فشار زمینه
F_{mean} نیروی متوسط (N)
F_{max} نیروی بیشینه (N)
G مدول برشی (GPa)
G_c انرژی شکست (kJ/m^2)
L طول جعبه تصادف (m)
M جرم پرتابه (kg)
m_c جرم کل (kg)
P تابع عملکرد
SEA جذب انرژی مخصوص (J/kg)
S_l استحکام برشی طولی (MPa)
S_t استحکام برشی عرضی (MPa)
TEA انرژی جذب شده (J)
X_c استحکام فشاری طولی (MPa)
X_t استحکام کششی طولی (MPa)
Y_c استحکام فشاری عرضی (MPa)
Y_t استحکام کششی عرضی (MPa)
علائم یونانی
δ_{eq} جابجایی معادل (m)
ε کرنش
η بازده نیرویی
ν ضریب پواسون
ρ چگالی (kg/m^3)
σ تنش (Pa)
σ_{eq} تنش معادل (Pa)
σ_{11} مؤلفه تانسور تنش (Pa)
σ_{22} مؤلفه تانسور تنش (Pa)
τ_{12} مؤلفه برشی تانسور تنش (Pa)

- Composite Tubes”, *Materials & Design*, Vol. 47, pp. 248-257, 2013.
- [23] Eshkooor, R. Ude, A. Oshkovr, S. Sulong, A. B. Zulkifli, R. Ariffin, A. Azhari, C., “Failure Mechanism of Woven Natural Silk/Epoxy Rectangular Composite Tubes Under Axial Quasi-Static Crushing Test Using Trigger Mechanism”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 64, pp. 53-61, 2014.
- [24] Elgalai, A. Mahdi, E. Hamouda, A. Sahari, B., “Crushing Response of Composite Corrugated Tubes to Quasi-Static Axial Loading”, *Composite Structures*, Vol. 66, No. 1, pp. 665-671, 2004.
- [25] Mahdi, E. Sebaey, T., “Crushing Behavior of Hybrid Hexagonal/Octagonal Cellular Composite System: Aramid/Carbon Hybrid Composite”, *Materials & Design*, Vol. 63, pp. 6-13, 2014.
- [26] Mahdi, E. Hamouda, A., “Energy Absorption Capability of Composite Hexagonal Ring Systems”, *Materials & Design*, Vol. 34, pp. 201-210, 2012.
- [27] Mahdi, E. Hamouda, A. Sahari, B. Khalid, Y., “Experimental Quasi-Static Axial Crushing of Cone-Tube-Cone Composite System”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 34, No. 3, pp. 285-302, 2003.
- [28] Elgalai, A. Hamouda, A. Mahdi, E. Sahari, B., “Energy Absorption Capabilities of Woven Roving Glass/Epoxy Composite Tubes: Effect of Tube Length”, *Strength, fracture and complexity*, Vol. 3, No. 1, pp. 15-24, 2005.
- [29] Mamalis, A. Manolakos, D. Ioannidis, M. Papapostolou, D., “Crashworthy Characteristics of Axially Statically Compressed Thin-Walled Square CFRP Composite Tubes: Experimental”, *Composite Structures*, Vol. 63, No. 3, pp. 347-360, 2004.
- [30] Chiu, L. N. Falzon, B. G. Boman, R. Chen, B. Yan, W., “Finite Element Modelling of Composite Structures Under Crushing Load”, *Composite Structures*, Vol. 131, pp. 215-228, 2015.
- [31] Sameer, J. O. Zarooq, O. S. Samer, F., “The effects of Trigger Mechanism on the Energy Absorption of Thin-Walled Rectangular Steel Tubes”, *The 3rd National Conference, Universiti Tenaga Nasional*, 2015.
- [32] Huang, J. Wang, X., “On a New Crush Trigger for Energy Absorption of Composite Tubes”, *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 15, pp. 625-634, 2010.
- [33] Kakogiannis, D. Yuen, S. C. K. Palanivelu, S. Hemelrijck, D. V. Paeppegem, W. V. Wastiels, J. Vantomme, J. Nurick, G. N., “Response of Pultruded Composite Tubes Subjected to Dynamic and Impulsive Axial Loading”, *Composites: Part B*, Vol. 55, pp. 537-547, 2013.
- [34] Chun, P. H., “Numerical and Experimental Crashworthiness Studies of Foam-filled Frusta”, *M.Sc. Thesis, University of Toronto*, 2013.
- [35] Abaqus CAE 6.14 documentation user's manual.
- [36] Shokrieh, M. M. Ghajar, M. Salamattalab, M. Madoliat, R., “Progressive Damage Modelling of Laminated Composites by Considering Simultaneous Effects of Interlaminar and Intralaminar Damage Mechanics”, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 2, pp. 1-8, 2015. (in Persian)
- [37] Reyes, A. Hopperstad, O. S. Langseth, M., “Aluminum foam-filled extrusions subjected to oblique loading: experimental and numerical study”, *Advanced Engineering Materials*, Vol. 2, pp. 223-227, 2000.
- [38] Shariati, M. Allahbakhsh, H. R. Saemi, J. Sedighi, M., “Optimization of foam filled spot-welded column for the crashworthiness design”, *Mechanika*, Vol. 3, pp. 10-16, 2010.
- [39] Mohammadiha, O. Beheshti, H., “Optimization of Functionally Graded Foam-Filled Conical Tubes Under Axial Impact Loading”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, pp. 1741-52, 2013.
- [40] Boria, S. Obradovic, J. Belingardi, G., “Experimental and Numerical Investigations of the Impact Behaviour of Composite Frontal Crash Structures”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 79, pp. 20-27, 2015.
- [41] Langseth, M. Hopperstad, O., “Static And Dynamic Axial Crushing Of Square Thin-Walled Aluminium Extrusions”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18, pp. 949-68, 1996.
- [1] www.mehrnews.com/news/3582776, 2015.
- [2] www.who.int/violence_injury_prevention/road_safety_status/2015.
- [3] Bisagni, C., “Experimental Investigation of the Collapse Modes and Energy Absorption Characteristics of Composite Tubes”, *International Journal of Crashworthiness*, Vol. 14, No. 4, pp. 365-378, 2009.
- [4] Obradovic, J. Boria, S., Belingardi, G., “Lightweight Design and Crash Analysis of Composite Frontal Impact Energy Absorbing Structures”, *Composite Structures*, Vol. 94, No. 2, pp. 423-430, 2012.
- [5] Teng, J. G. Hu, Y. M., “Behaviour of FRP-Jacketed Circular Steel Tubes and Cylindrical Shells Under Axial Compression”, *Construction and Building Materials*, Vol. 21, No. 4, pp. 827-838, 2007.
- [6] Song, H.-W. Wan, Z.-M., Xie, Z.-M., Du, X.-W., “Axial Impact Behavior and Energy Absorption Efficiency of Composite Wrapped Metal Tubes”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 385-401, 2000.
- [7] Haedir, J. Bambach, M., Zhao, X., Grzebieta, R., “Bending Strength of CFRP-Strengthened Circular Hollow Steel Sections”, in *Proceeding of, Florida International University*, pp. 701-704, 2006.
- [8] Haedir, J. Bambach, M., Zhao, X., Grzebieta, R., “Behaviour of Thin-Walled CHS Beams Reinforced by CFRP Sheets”, in *Proceeding of, Taylor and Francis/Balkema*, pp. 701-706, 2007.
- [9] Doi, H., “Deformation Capacity of Circular Tubular Beam-Columns Reinforced with CFRP Subjected to monotonic loading”, *Journal of Constructional Steel*, Vol. 11, pp. 431-8, 2003.
- [10] Jiao, H. Zhao, X. L., “CFRP Strengthened Butt-Welded Very High Strength (VHS) Circular Steel Tubes”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 42, No. 7, pp. 963-978, 2004.
- [11] Zhao, Y. Gu, W. Xu, J. Zhang, H., “The Strength of Concrete Filled CFRP-Steel Tubes Under Axial Compression”, *The 15th International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp. 19-24, 2005.
- [12] Xiao, Y. He, W. Choi, K.-k., “Confined Concrete-Filled Tubular Columns”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 3, pp. 488-497, 2005.
- [13] Zhao, X.-L. Fernando, D. Al-Mahaidi, R., “CFRP Strengthened RHS Subjected to Transverse End Bearing Force”, *Engineering Structures*, Vol. 28, No. 11, pp. 1555-1565, 2006.
- [14] Fernando, N. Teng, J. Yu, T. Zhao, X., “Finite Element Modelling of CFRP Strengthened Rectangular Steel Tubes Subjected to End Bearing Loads”, in *Proceeding of, Asia-Pacific conference of FRP in structures*, pp. 943-950, 2007.
- [15] Bambach, M. Jama, H. Elchalakani, M., “Axial Capacity and Design of Thin-Walled Steel SHS Strengthened with CFRP”, *Thin-Walled Structures*, Vol. 47, No. 10, pp. 1112-1121, 2009.
- [16] Abosbaia, A. Mahdi, E. Hamouda, A. Sahari, B., “Quasi-Static Axial Crushing of Segmented and Non-Segmented Composite Tubes”, *Composite Structures*, Vol. 60, No. 3, pp. 327-343, 2003.
- [17] Hou, T. Pearce, G. Prusty, B. Kelly, D. Thomson, R., “Pressurised Composite Tubes as Variable Load Energy Absorbers”, *Composite Structures*, Vol. 120, pp. 346-357, 2015.
- [18] Priem, C. Othman, R. Rozycki, P. Guillon, D., “Experimental Investigation of the Crash Energy Absorption of 2.5 D-Braided Thermoplastic Composite Tubes”, *Composite structures*, Vol. 116, pp. 814-826, 2014.
- [19] Kim, J.-S. Yoon, H.-J. Shin, K.-B., “A Study on Crushing Behaviors of Composite Circular Tubes with Different Reinforcing Fibers”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 38, No. 4, pp. 198-207, 2011.
- [20] Ataollahi, S. Taher, S. T., Eshkooor, R. A. Ariffin, A. K. Azhari, C. H., “Energy Absorption and Failure Response of Silk/Epoxy Composite Square Tubes: Experimental”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 43, No. 2, pp. 542-548, 2012.
- [21] Othman, A. Abdullah, S. Ariffin, A. Mohamed, N., “Investigating the Quasi-Static Axial Crushing Behavior of Polymeric Foam-Filled Composite Pultrusion Square Tubes”, *Materials & Design*, Vol. 63, pp. 446-459, 2014.
- [22] Eshkooor, R. A. Oshkovr, S. A. Sulong, A. B. Zulkifli, R. Ariffin, A. K. Azhari, C. H., “Comparative Research on the Crashworthiness Characteristics of Woven Natural Silk/Epoxy

Archive of SID