



Original Research Paper

Numerical Simulation of Helicopter Pilot Seat under Crash Impact

Hamid Reza Zarei , Mostafa Livani* , and Meysam Jalalvand 

Department of Aerospace Engineering, Shahid Sattari Aeronautical University of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**Article History:**

Received 10 August 2023

Revised 11 October 2023

Accepted 11 October 2023

Available Online 17 October 2023

Keywords:

Numerical simulation

Seat

Impact

Helicopter

Damage

Honeycomb

ABSTRACT

In this article, to investigate the severity of damage to the helicopter pilot under the crash impact, the numerical simulation of the actual helicopter cockpit seat has been done. To limit the complexity of the problem, a fully vertical impact was considered as a reference scenario for the assembly consisting of a collapsible helicopter seat, an energy absorption section, and a humanoid dummy. For this purpose, the three-dimensional model of the chair in the laboratory was studied in two states with and without the addition of the energy absorption mechanism. A honeycomb structure was used in the seat cushion section. The results of the research showed that the use of UPVC damper to test the crash impact with a certain mass based on biomechanical criteria, an average 80 % decrease in serious injuries to the skull and spine has been achieved. Also, based on the results obtained in this research, although the aluminum honeycomb structure meets the criterion of damage to the head and is within the permissible range, it has rejected the criteria of damage to the spine and permissible acceleration range. However, compared to the case without honeycomb, it has performed much better and has been able to absorb the energy of the crash impact.

* Corresponding Author's E-mail: m.livani@ssau.ac.ir**How to Cite this Article:**H. R. Zarei, M. Livani, and M. Jalalvand, "Numerical Simulation of Helicopter Pilot Seat under Crash Impact," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 13-26, 2024, (in Persian), <http://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.4.2>.**COPYRIGHTS**

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



شبیه‌سازی عددی صندلی خلبان بالگرد تحت ضربه ناشی از سقوط

حمیدرضا زارعی^۱، مصطفی لیوانی^{۲*}، و میثم جلالوند^۳

۱- استاد، دانشکده هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشکده هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران

چکیده

در این مقاله برای بررسی شدت آسیب وارده به خلبان بالگرد تحت ضربه ناشی از سقوط، شبیه‌سازی عددی مدل صندلی واقعی کابین خلبان بالگرد انجام شده است. برای محدود کردن پیچیدگی مسئله، ضربه‌ای کاملاً عمودی به عنوان سناریوی مرجع برای مجموعه‌ای شامل یک صندلی بالگرد قابل سقوط، بخش جذب انرژی و یک آدمک انسان‌نما در نظر گرفته شد. برای این کار مدل سه‌بعدی صندلی موجود در آزمایشگاه در دو حالت با و بدون افزودن مکانیزم جذب انرژی مورد مطالعه قرار گرفت. از سازه لانه‌زنبوری در بخش میراکننده صندلی استفاده شد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد استفاده از جاذب UPVC برای آزمایش سقوط از ارتفاع با جرم مشخص، بر اساس معیارهای بیومکانیکی آسیب‌های وارد شده به جمجمه و ستون فقرات را حدود ۸۰ درصد کاهش داده است. همچنین بر اساس نتایج مستخرجه در این پژوهش، سازه لانه‌زنبوری آلومینیومی با اینکه معیار آسیب وارده به سر را برآورده کرده و در محدوده مجاز قرار می‌گیرد، ولی معیارهای آسیب وارده به ستون فقرات و محدوده شتاب مجاز را رد کرده است؛ باین‌حال نسبت به حالت بدون لانه‌زنبوری عملکرد بسیار بهتری داشته و تا حدود زیادی توانسته انرژی ضربه حاصل از سقوط را جذب نماید.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۹ مرداد ۱۴۰۲

بازنگری ۱۹ مهر ۱۴۰۲

پذیرش ۱۹ مهر ۱۴۰۲

اولین انتشار ۲۵ مهر ۱۴۰۲

واژه‌های کلیدی:

شبیه‌سازی عددی

صندلی

ضربه

بالگرد

آسیب

لانه‌زنبوری

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: m.livani@ssau.ac.ir

How to Cite this Article:

H. R. Zarei, M. Livani, and M. Jalalvand, "Numerical Simulation of Helicopter Pilot Seat under Crash Impact," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 4, pp. 13-26, 2024, (in Persian), <http://doi.org/10.22034/jtae.2024.8.4.2>.

COPYRIGHTS

Authors retain the copyright and full publishing rights.

Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article licensed under the [Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



۱ مقدمه

بالگردها به دلیل داشتن درجه آزادی بالا می‌توانند کاربردهای متعددی مانند مأموریت‌های نظارتی، مأموریت‌های نجات، آمبولانس هوایی، مأموریت‌های نظامی و... انجام دهند. باین وجود، برخی اوقات به دلیل نقص فنی یا خطاهای انسانی سقوط می‌کنند و خسارات جبران‌ناپذیری وارد می‌کنند. براین اساس، طراحی صندلی خلبانان بالگرد، همیشه به‌عنوان یک اولویت اساسی برای جلوگیری از خرابی سازه و حفظ سرنشینان از اهمیت بالایی برخوردار است. می‌توان با مواد و سازه‌های جذب‌کننده انرژی عملکرد خرابی بالگرد در برابر حوادث محیطی را بهبود بخشید. سقوط سخت یکی از سوانح هوایی است که در پی آن بالگرد به‌طور عمود بر سطح زمین سقوط می‌کند. این حادثه می‌تواند صدمات بسیار زیادی بر بالگرد و در نتیجه آن به خلبان وارد کند. اندازه و جهت نیرو دو پارامتر مهمی است که برای ساخت سازه‌های مقاوم‌ترین اهمیت را دارد. یکی از چالش‌های اساسی، طراحی سازه‌های ایمن و مقاوم در برابر صدمات احتمالی است که همیشه مورد توجه دانشمندان قرار گرفته‌است.

ساختار صندلی قابل تصادف با ظرفیت جذب انرژی قابل توجه، یک جزء کلیدی برای بالگرد برای بهبود قابلیت سقوط و بقای سرنشینان در مواقع اضطراری است. طبق مقررات اداره هوانوردی فدرال (FAA)، عملکرد صندلی باید توسط تست تصادف دینامیکی تأیید شود که بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. به همین دلیل، شبیه‌سازی عددی رویکردی کارآمدتر و مقرون‌به‌صرفه‌تر است تا امکان ارزیابی عملکرد صندلی و پیش‌بینی پاسخ سرنشینان را فراهم کند.

هاجر و کمبل [۱]، در سال ۲۰۰۸ پژوهش‌های انجام شده در زمینه برخورد بالگرد با آب از سال ۱۹۸۲ تا ۲۰۰۶ را مورد بحث قرار دادند و خلاصه‌ای از دستاوردهای نظری، تجربی و عددی عمده را ارائه کردند. یک ترکیب کامل از مرتبط‌ترین فعالیت‌ها را در مورد تصادف بالگردها را می‌توان را جکسون در سال ۲۰۱۸ [۲] ارائه داد. او از آمار تصادفات شروع می‌شود و سپس امکانات آزمایش تجربی، ابزارها و تکنیک‌های مدل‌سازی عددی، راه‌حل‌های طراحی و توصیه‌ها را توصیف می‌کند. خواننده به راحتی می‌تواند بسیاری از جنبه‌های مشترک با قابلیت تصادف خودرو را بیابد. بررسی ادبیات جدیدتر توسط یانگ و همکارانش در سال ۲۰۲۰ [۳] خلاصه شده‌است، که همچنین نتایج اصلی به دست آمده در مکانیسم‌های جذب انرژی و راه‌حل‌های طراحی اصلی را بیان می‌کنند. عبدالطیف [۴]، در سال ۲۰۰۸ تحلیل ساختاری و بهینه‌سازی مجموعه صندلی بالگرد را با استفاده از روش اجزای محدود انجام داد. تجزیه و تحلیل المان محدود غیرخطی دینامیکی گذرا، به شناسایی اینکه آیا ساختار صندلی در موقعیت فرود تصادف سالم می‌ماند یا خیر کمک می‌کند و بهینه‌سازی به کاهش وزن صندلی

قابل تصادف کمک می‌کند. او صندلی را با استفاده از ترکیبی از نرم‌افزارهای MATLAB و ANSYS Workbench 11.0 تجزیه و تحلیل کرد. ضعیف‌ترین بخش‌ها و اتصالات در ساختار صندلی مورد تجزیه و تحلیل قرار داد و سپس بهینه‌سازی برای ایمن ساختن آن و همچنین کاهش وزن مجموعه را انجام داد. دایانگ و ژیانگ [۵]، در سال ۲۰۱۲ یک مدل المان محدود سه‌بعدی ساختار صندلی/سرنشین با استفاده از کد المان محدود دینامیکی غیرخطی و صریح LS-DYNA3D توسعه دادند. تطابق بین شبیه‌سازی و آزمایش تجربی آن‌ها نشان داد که شبیه‌سازی عددی توسعه یافته می‌تواند جایگزینی امکان‌پذیر برای تست تصادف دینامیکی باشد. ریبسی و همکاران [۶]، در سال ۲۰۱۳ یک رویداد تصادف عمودی صندلی خلبان بالگرد سیکورسکی S-61 از ارتفاع ۵۰۰ فوتی را شبیه‌سازی و حداکثر نرخ شتاب با استفاده از MSC PATRAN/LS-DYNA را تعیین کردند. بقای خلبان با مقایسه نتیجه با داده‌های معیارهای تحمل انسانی موجود در سایر آثار منتشر شده تعیین کردند. از نتایج به دست آمده توسط آن‌ها مشخص شد که حداکثر شتاب صندلی خلبان ۵۸۴/۴ گرم در ۱۹/۶۳ میلی‌ثانیه است، بنابراین آن‌ها نتیجه گرفتند که این شتاب برای خلبان کشنده است. موراگان و همکاران [۷]، در سال ۲۰۱۴ ارزیابی تحلیلی میراکننده‌های مغناطیسی رئولوژیکی (MR) برای حفاظت از سرنشینان در هنگام فرود عمودی سقوط بالگرد را انجام دادند. صندلی فعلی خدمه بالگرد دارای مکانیسم‌های ایمنی غیرفعال است که به دلیل تفاوت در وزن سرنشین و سطح شدت تصادف، توانایی آن‌ها برای انطباق بهینه با هر نوع سناریوی تصادف بسیار محدود است. هدف آن‌ها از توسعه مدل تحلیلی، توسعه ابزاری برای مطالعه عملکرد سیستم تعلیق صندلی مغناطیسی نیمه‌فعال تطبیقی برای حفاظت از سرنشینان روتورکرافت بود. مطالعه آن‌ها توسعه یک مدل بدن انسان با پارامتر توده‌ای شامل ساق پا در حالت نشسته برای شبیه‌سازی آسیب تصادف روتورکرافت را گزارش می‌داد. معیارهای آسیب و سطوح تحمل برای اثرات بیومکانیکی برای هر یک از مناطق آسیب‌پذیر بدن را بررسی کردند. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که کاهش بار کمری و در نتیجه کاهش آسیب نخاعی را می‌توان برای همه اندازه‌های بزرگسالان در یک تصادف عمودی روتورکرافت با استفاده از یک جاذب انرژی نیمه‌فعال تطبیقی مانند یک جاذب انرژی مغناطیسی با یک جاذب انرژی مناسب به دست آورد. گله‌داری و همکاران [۸]، در سال ۲۰۱۵ رابطه‌ای برای تنش صفحه‌ای سازه لانه زنبوری با رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان و سخت شوندگی توانی به دست آوردند. آن‌ها با استفاده از رابطه کرنش قفل‌شدگی و انرژی کرنشی، رابطه میزان انرژی جذب شده توسط سازه لانه زنبوری مدرج استخراج کردند. آن‌ها برای مقایسه نتایج روابط تحلیلی، جذب انرژی

سازه لانه زنبوری مدرج ساخته شده از پنج نوع آلومینیوم مختلف بر اساس رفتار ماده کشسان - کاملاً مومسان را در محیط نرم افزار آباکوس شبیه سازی کردند. هو و همکاران [۹]، در سال ۲۰۱۶ یک مدل کوپلینگ FE-SPH برای بررسی عملکرد قابلیت سقوط یک کابین خلبان ترکیبی بالگرد (HCC) در معرض برخورد پرنده با استفاده از کد المان محدود غیرخطی ANSYS/LS-DYNA 3D توسعه دادند. پارامترهای مکانیکی مدل سازنده پرنده با آزمایش ضربه پرنده بر روی صفحه مسطح به دست آوردند. آزمایش ضربه پرنده HCC در مقیاس کامل نیز تحت شرایط ضربه مشابه انجام دادند تا الزامات قابلیت پرواز را تأیید کند و همچنین مدل FE را تأیید کند. توافق بالا بین آزمایش و تجزیه و تحلیل عددی باعث ایجاد اطمینان در استفاده آینده از روش FE به عنوان یک ابزار پیش بینی شد. علیصادقی و فضیلتی [۱۰]، در سال ۲۰۱۶ بهینه سازی جاذب انرژی از نوع لانه زنبوری با روش الگوریتم ژنتیک را انجام دادند. آن ها خصوصیات هندسی لانه زنبوری شامل اندازه سلول، ضخامت، ارتفاع و مساحت از متغیرهای طراحی و ظرفیت جذب، حجم و جرم و سطح شوک خروجی بهینه سازی قرار دادند. جعفری و فعلی [۱۱]، در سال ۲۰۱۶

میزان جذب انرژی ورق های ساندویچی آلومینیومی - لانه زنبوری تحت اثر ضربه بالستیکی را با استفاده از مدل جرم و فنر مورد مطالعه قرار دادند. آن ها ضربه زننده را به صورت پرتابه صلب استوانه ای سر تخت در نظر گرفتند. آن ها برای جذب انرژی لانه زنبوری از مدل ویرزیکی^۱ استفاده کردند. بلوک باسی [۱۲] در سال ۲۰۱۸ نتایج تلاش های تحقیق و توسعه را برای زیرسیستم های مختلف با قابلیت تصادف کنترل شده و ادغام آن ها در سطح سیستم روتورکرافت ارائه کرد. او همچنین به مزایای بالقوه زیرسیستم های کنترل شده فعال مانند کیسه های هوای خارجی، صندلی های قابل تصادف، ارابه های فرود و عناصر محدودکننده بار تصادف برای سیستم های گیربکس و روتور با استفاده از شاخص ارزش تصادف (CI) به عنوان یک معیار پرداخت. جکسون [۱۳] در سال ۲۰۱۸، پیشرفت در تحقیق و توسعه قابلیت تصادف روتورکرافت را که در طول چهل سال گذشته محقق شده است، مستند کرد. امکانات و تجهیزات برای انجام تست تصادف، الزامات گواهی تصادف به روز، استفاده از تکنیک های مدل سازی و شبیه سازی تصادف، و طراحی ساختاری روتورکرافت برای بهبود عملکرد تصادف با تمرکز بر کاربرد مواد کامپوزیتی پیشرفته را مورد مطالعه و بررسی قرار داد. خدائی و همکاران [۱۴] در سال ۲۰۱۹، با در نظر گرفتن وابستگی خواص سازه لانه زنبوری به نرخ کرنش بالا، به شبیه سازی المان محدود رفتار ضربه سرعت بالا و تعیین سرعت حد بالستیک این سازه ها در برخورد با پرتابه های

سرنیم کره و سر تخت پرداختند. نتایج آن ها نشان داد که به کارگیری اثرات وابسته به نرخ کرنش موجب افزایش جذب انرژی به صورت انرژی اتلافی پلاستیک و انرژی اتلافی اصطکاکی شد که دقت شبیه سازی عددی را بهبود بخشد. همچنین کاهش ابعاد سلول لانه زنبوری با حفظ وزن آن، در اثر تفاوت در مکانیزم آسیب، به افزایش سرعت حد بالستیک در برخورد پرتابه های با سر نیم کره و کاهش سرعت حد بالستیک در برخورد پرتابه های با سر تخت شد. اینها [۱۵] در سال ۲۰۱۹، یک استراتژی مطالعه سه مرحله ای ارائه داد که شامل فاز اول مروری بر متون علمی و فنی که به اثرات بالقوه سلامتی بالگرد خلبانی یا هواپیمای تیلرئوتور پرداخت، در فاز دوم یک مطالعه اپیدمیولوژی برای مقایسه سلامت خلبانان حرفه ای بالگرد و خلبانان تیلرئوتور با یک جمعیت کنترل مناسب (به رهبری AFHSB) پرداخت و در فاز سوم نتایج مطالعه اپیدمیولوژی را با توجه به مرور ادبیات یکپارچه و مورد بحث قرار داد و نتیجه گیری را فرموله کرد. نتایج مطالعه او موارد زیر را نشان داد: (۱) بر اساس ۳۱ شرایط ارزیابی شده، خلبانان بالگرد نظامی بسیار غربال شده و تحت نظارت نسبت به افسران غیرخلبان شرایط پزشکی کمتری داشتند. (۲) خلبانان بالگرد/تیلرئوتور در مقایسه با گروه کنترل بال ثابت ۲۶ درصد بیشتر در معرض خطر کمردرد بودند. (۳) در یک تحلیل فرعی، خطر تشخیص گردن درد (رگ به رگ شدن و کشیدگی) در میان خلبانان بالگرد/تیلرئوتور نیروی هوایی ایالات متحده ۲۷ درصد بیشتر از خلبانان بال ثابت بود. (۴) در مقایسه با خلبانان بال ثابت، خلبانان بالگرد/تیلرئوتور خطر ابتلا به سندرم متابولیک و هیپرلیپیدمی بیشتری داشتند. این احتمالاً مربوط به غربالگری شدید این جمعیت در طول دوره مطالعه بود. (۵) خلبانان بالگرد/تیلرئوتور نسبت به گروه کنترل غیر خلبان ۱۱ درصد کمتر در معرض خطر کم شنوایی بودند. استوری و همکاران [۱۶] در سال ۲۰۲۰ آزمایش رها کردن نمونه از حداکثر ارتفاع قابل دستیابی در آزمایشگاه تست تصادف را با شرایط سقوط آزاد از ارتفاع ۳/۰۵ متر که منجر به سرعت ضربه ۷/۷ متر بر ثانیه شد، انجام دادند. سیستم ابزار اندازه گیری آن ها شامل یک سیستم داده برداری با نرخ نمونه گیری ۱۲/۵ کیلوهرتز، یک لودسل کمری، یک لودسل زیر بلوک لانه زنبوری کمک فنر صندلی، چهار لودسل در بالای بلوک های لانه زنبوری ضربه گیر زیر کف، یک پتانسیومتر سیمی برای اندازه گیری ضربه صندلی و دو دوربین پرسرعت با سرعت ۱۰۰۰ فریم در ثانیه بود. نتایج آن ها نشان داد جاذب صندلی پس از رسیدن پایه های کف زیرین به جابه جایی نهایی خود شروع به حرکت می کند. پانل کف یک شکل صاف را حفظ کرد و هیچ تغییری شکل پلاستیکی باقیمانده پس از آزمایش مشاهده نشد. آن ها مراحل سقوط لانه زنبوری را در مدل اجزای محدود

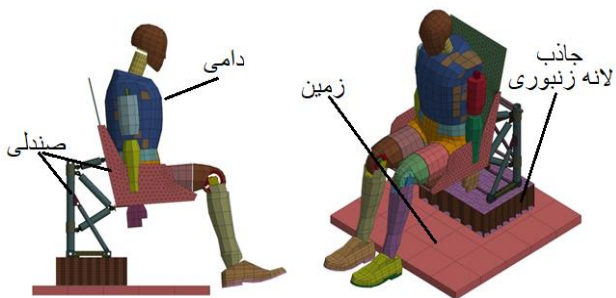
شبیه‌سازی به دست آورد. با انجام این عمل می‌توان تخمین دقیق‌تری از میزان نیروی وارد بر صندلی به دست آورد که برای طراحی محیط تست واقعی بسیار مفید بوده و خطای نتایج تست واقعی را کمینه کند. همچنین یک مدل‌سازی برای سیستم تعلیق صندلی ارائه می‌شود که می‌تواند میزان نیروی وارده را جذب کند. این سیستم جذب نیرو با توجه به مدل واقعی صندلی به کار رفته در آزمایش عملی طراحی می‌شود و از سازه‌های لانه‌زنبوری برای جذب انرژی بهره می‌برد. با توجه به فیزیک صندلی، نحوه قرارگیری این سازه‌ها تعیین می‌گردد.

۲ روش انجام تحقیق

در این بخش روش انجام تحقیق تشریح می‌شود. نوع مدل، خواص مواد، نحوه المان‌بندی، بارگذاری و شرایط مرزی در هر بخش توضیح داده می‌شود.

۲.۱ مدل‌سازی CAD 3D

مدلی که در این مقاله مورد مطالعه قرار می‌گیرد، شامل چهار بخش کلی صندلی، آدمک یا دامی، جاذب لانه‌زنبوری و زمین می‌باشد. هر کدام از بخش‌های اشاره شده، به تنهایی از چندین زیر اجزا تشکیل شده‌اند که در شکل ۱ به خوبی مشخص است. مدل صندلی طراحی شده در نرم‌افزار Solidworks در شکل ۲ نشان داده شده‌است. دامی استفاده شده در این مقاله Hybrid III بوده که خود از جمله دامی‌های تجاری نسل جدید Ls-Dyna می‌باشد [۱۹]. ابعاد لانه‌زنبوری که در این مقاله مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌است، در شکل ۳ نشان داده شده‌است. ابعاد جاذب انرژی همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده‌است، متناسب با نقاط اتصال پایه صندلی به کف کابین و فاصله مناسب نقاط اتصال از لبه‌های آزاد تعیین شده‌است. همچنین ضخامت جاذب انرژی متناسب با فاصله کف کابین تا تقاطع‌های بین تیرک‌های طولی و عرضی کف زیرین کابین انتخاب شده‌است.

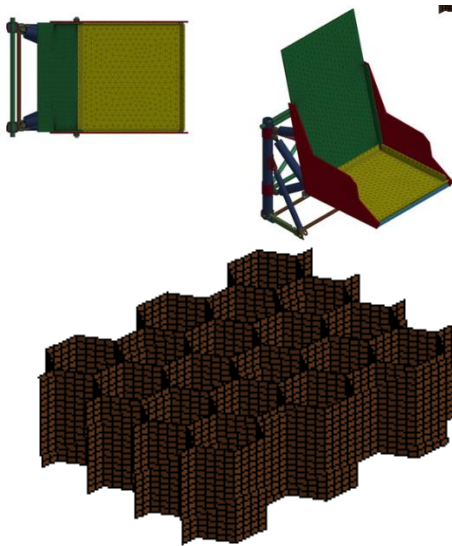


شکل ۱- اجزای کلی مدل

با تیرهای ساده با یک واکنش جابه‌جایی- نیرو الاستیک-پلاستیک مدل کردند. نتایج آن‌ها نشان داد سازه لانه‌زنبوری دارای یک الگوی خردشدن پیچیده است که شامل کمانش، تماس‌های داخلی، وابستگی به قیود و سهم هوای محبوس شده در سلول‌های لانه‌زنبوری و خارج شدن آن در حین له شدن است. کاپوتو و همکاران [۱۷]، در سال ۲۰۲۱ با هدف بررسی قابلیت‌های جذب انرژی یک بخش بدنه کامپوزیتی در مقیاس کامل از یک هواپیمای منطقه‌ای و آسیب‌های بیومکانیکی مربوطه که بر مسافران تأثیر می‌گذارد، یک مدل عددی بهبودیافته بر اساس روش اجزای محدود ارائه دادند. پژوهش آن‌ها شامل آزمایش سقوط یک برل کاملاً مجهز بود که در مرکز تحقیقات هوافضای ایتالیا مطابق با FAR-25 انجام شد. سقوط آزاد از ارتفاع حدود ۴ متر و سرعت برخورد با زمین ۹/۱۴ متر بر ثانیه انجام شد. نتایج آن‌ها نشان داد بار کمتری که از کنار بر دامی از اطراف صندلی وارد می‌شود، حتی اگر روند آزمایشی تقریباً به خوبی پیاده‌سازی شود، عدم تطابق بین مقادیر اوج را نشان می‌دهد. دلایل آن‌ها برای این رفتار شامل چندین تقریب عددی که در مدل‌سازی جاذب انرژی، رفتار مواد و سفتی ساختار صندلی معرفی شده‌اند، بود. داودی و همکاران [۱۸]، در سال ۲۰۲۱ به منظور بهبود محیط ارتعاشی برای خلبان، یک مکانیزم تعلیق با ساختار سختی منفی ارائه دادند. ساختار سختی منفی در ترکیب با ساختارهای سختی مثبت می‌تواند سختی دینامیکی کل سیستم و در نتیجه انتقال‌پذیری ارتعاش را کاهش دهد. آن‌ها پس از ارائه یک مدل یکپارچه از سیستم تعلیق صندلی - سرنشین، روند طراحی پارامترهای سیستم تعلیق به منظور کاهش ارتعاشات انتقالی به سرنشین ارائه دادند. نتایج شبیه‌سازی آن‌ها نشان داد که در صورت طراحی مناسب پارامترهای سیستم تعلیق مبتنی بر ساختار سختی منفی می‌توان ارتعاش انتقالی به سرنشین را تا حدود ۴۰٪ کاهش داد.

در این مقاله به بررسی برخی جنبه‌های مهم مدل‌سازی عددی یک صندلی بالگرد نظامی مجهز به سیستم جذب انرژی پرداخته می‌شود که در شرایط فرود از اهمیت بالاتری برخوردار هستند. برای محدود کردن پیچیدگی این کار، سعی شده تا نیروی وارده فقط به شکل عمودی در نظر گرفته شود. همچنین برای سنجش میزان مقاومت صندلی فقط بخش میرایی آن در نظر گرفته شد، یعنی از قسمت‌های مختلف صندلی مانند اسفنج نشیمنگاه و ... صرف نظر شده‌است.

با سنجش دقیق میزان شتابی که صندلی بالگرد در جهت عمود به زمین دارد و همچنین با در نظر گرفتن وزن بالگرد می‌توان میزان نیروی مذکور را محاسبه نمود. اگر فرض شود این نیرو فقط در جهت عمود به صندلی بالگرد وارد شود، می‌توان به کمک تحلیل اجزای محدود و نرم‌افزار LS DYNA مقادیر شتاب و نیرو را از طریق



شکل ۴- مدل صندلی و بخش لانه‌زنبوری بعد از المان‌بندی

جدول ۱- تعداد المان‌ها و گره‌های کلی مدل

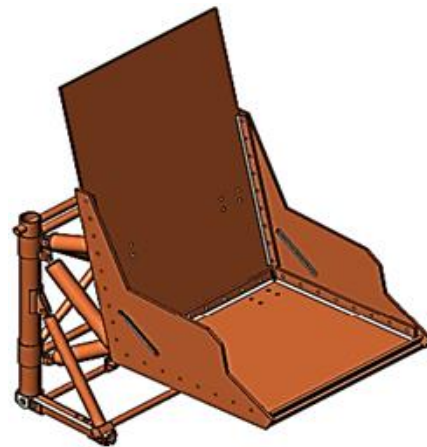
تعداد گره‌ها	تعداد المان‌ها	اجزا
۱۰۶۷۹۸	۱۲۲۷۹۱	صندلی
۷۴۰۴	۴۳۱۳	دامی
۴۵۹۸	۴۵۴۸	لانه‌زنبوری

همان‌طور که از شکل ۴ مشاهده می‌شود، نوع المان‌های صندلی ترکیبی از المان‌های هرمی شکل و مکعبی ۸ گرهی می‌باشند. همچنین از المان پوسته‌ای ۴ گرهی برای جذب لانه‌زنبوری استفاده شده‌است.

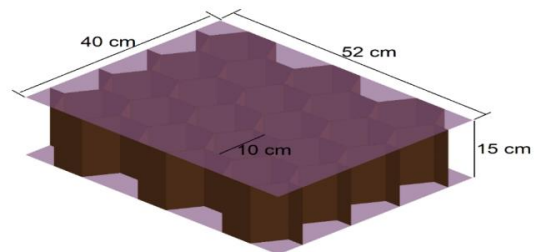
۳.۲ بارگذاری و شرایط مرزی

برای شبیه‌سازی سقوط جهت صرفه‌جویی در زمان تحلیل، به‌جای سقوط از ارتفاع مدنظر، سرعت برخورد در لحظه رسیدن به زمین را محاسبه کرده و با جسم صلب (نقش زمین) مورد اصابت قرار می‌گیرد. این سرعت را می‌توان به دو صورت به مدل اعمال کرد [۱۶]: ۱- سرعت اعمالی به صندلی و دامی، ۲- سرعت اعمالی به زمین در خلاف جهت جاذبه.

در این مقاله از سرعت اعمالی به زمین استفاده شده‌است. مطابق شکل ۵، فاصله اولیه صندلی با زمین ناچیز بوده و جهت شبیه‌سازی سقوط، سرعت معادل سقوط از ارتفاع ۱۰ متری که برابر با ۱۴ متر بر ثانیه است به جسم صلب با وزن بالا (زمین) اعمال شده‌است.



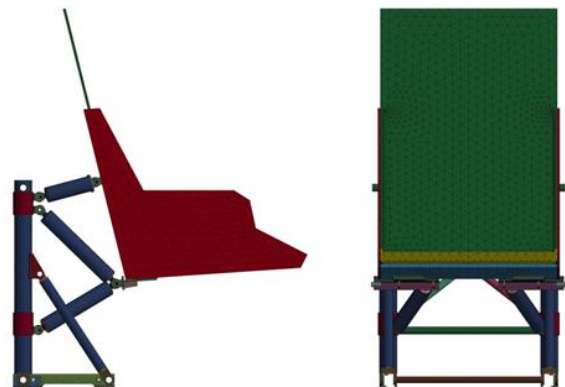
شکل ۲- مدل صندلی در نرم‌افزار Solidworks



شکل ۳- جزئیات ابعادی جاذب لانه‌زنبوری

۲.۲ المان‌بندی

بعد از انجام بررسی استقلال از المان، مدل با مدنظرگرفتن اندازه المان بهینه، تعداد المان‌ها و گره‌های مدل کلی صندلی، دامی و جاذب لانه‌زنبوری در جدول ۱ ارائه شده‌است. شکل ۴ مدل المان‌بندی شده صندلی در زوایای مختلف و المان‌بندی بخش لانه‌زنبوری را نشان می‌دهد. همگرایی نتایج با دقت خطای زیر ۵ درصد برای اندازه المان لحاظ شده‌است. این میزان خطا در حوزه مهندسی قابل قبول می‌باشد.



شکل ۴- مدل صندلی و بخش لانه‌زنبوری بعد از المان‌بندی

می‌باشد؛ لذا شتاب گرانش برابر با $9/81$ متر بر مجذور ثانیه به کل مدل اعمال شده‌است.

۴.۲ خواص مکانیکی مواد

برای همه اجزای صندلی از فولاد با مدول الاستیسیته 200 گیگاپاسکال و ضریب پواسون $0/3$ به همراه چگالی 7800 کیلوگرم بر متر مکعب استفاده شده‌است. از آنجایی که هدف اصلی این کار بررسی نقش جاذب لانه‌زنبوری بوده، لذا بحرانی‌ترین حالت ممکن برای خواص صندلی در نظر گرفته شده‌است، به‌طور مثال، قسمت تماسی صندلی با نشیمنگاه دامی با اینکه دارای فوم نرم می‌باشد که خود نوعی جاذب انرژی است، در شبیه‌سازی حاضر فولاد در نظر گرفته شده‌است. برای ورقه‌های بالا و پایینی لانه‌زنبوری از فولاد با ضخامت 1 میلی‌متر استفاده شده‌است و برای خود لانه‌زنبوری از UPVC با ضخامت 1 میلی‌متر و با مشخصات اشاره شده در جدول ۲ استفاده شده‌است. پارامترهای C و P در جدول ۲، ثوابت رابطه کوپر-سایموندز^۱ هستند:

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C}\right)^{\frac{1}{P}} \quad (1)$$

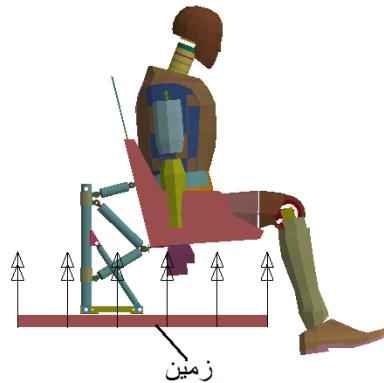
جدول ۲- خواص مکانیکی UPVC [۲۰]

Properties	UPVC
Young's modulus E (GPa)	1.5
Density ρ (kg/m ³)	1400
Poisson ratio ν	0.35
Initial yield stress σ_0 (MPa)	72
Tangent modulus E_{tan} (MPa)	90
Hardening parameter β	0.4
Material constant C (s ⁻¹)	55
Material constant P	8

در این مقاله علاوه بر UPVC از آلومینیوم نیز برای جنس جاذب لانه‌زنبوری استفاده شده و مورد مقایسه قرار گرفته‌است. جدول ۳ خصوصیت مکانیکی آلومینیوم استفاده شده در این مقاله را نشان می‌دهد.

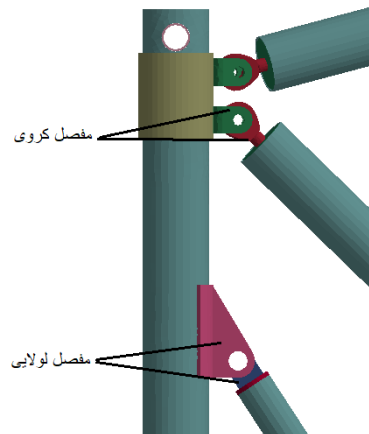
جدول ۳- خواص مکانیکی آلومینیوم

خواص مکانیکی	آلومینیوم
دانسیته	2700 kg/m ³
مدول الاستیسیته	59 GPa
ضریب پواسون	0.3



شکل ۵- نوع بارگذاری با استفاده از اعمال سرعت اولیه به زمین

شرایط مرزی اعمالی فقط به گره‌های زمین اعمال شده‌است، به‌طوری که فقط قابلیت حرکت در راستای شتاب (Z) را دارد و در دو راستای دیگر ثابت شده‌است. علاوه بر این، یک سری قیدها جهت اعمال حرکت‌های لولایی به برخی اجزای صندلی نیز اعمال شده‌است. برای نمونه شکل ۶ محل اعمال دو نوع مفصل در صندلی را نشان می‌دهد.



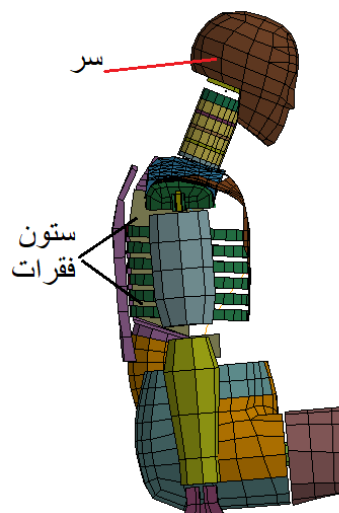
شکل ۶- موقعیت اعمال دو نوع مفصل در صندلی

از دیگر شرایط مرزی، استفاده از ابزار کانتکت جهت اعمال تماس‌های احتمالی بین اجزای مدل با یکدیگر می‌باشد. به این صورت که جهت چسبیدن دو بخش به یکدیگر بین اجزای صندلی که با هم به‌صورت سطح به سطح در تماس بوده‌اند، از ابزار تماس TIED_SURFACE_TO_SURFACE استفاده شده‌است. همچنین برای اجزایی که از هم فاصله داشته و احتمال برخورد با یکدیگر را در مدت‌زمان برخورد دارند از تماس AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE استفاده شده‌است. علاوه بر سرعت اولیه به‌عنوان یکی از شروط بارگذاری، نیاز به اعمال شتاب گرانش به‌عنوان عنصر دیگری از شرایط بارگذاری

1. Cowper – Symonds Relation

۵.۲ خروجی‌های مدنظر

دامی از ۱۳۳ پارت جداگانه تشکیل شده که هدف ما بررسی شتاب وارده به ستون فقرات و سر به همراه نیروی تماسی وارده از طرف صندلی به دامی می‌باشد. شکل ۷ بخش‌هایی که به‌عنوان خروجی مد نظر در دامی مورد تحلیل قرار می‌گیرد را نشان می‌دهد.



شکل ۷- بخش‌های مد نظر از دامی در خروجی‌های شتاب

سازمان ایمنی جاده‌های آمریکا^۳ در سال ۱۹۷۲ این معیار را به عنوان استاندارد برای حفظ سلامت سرنشینان خودرو تعیین کرد. باقی معیارهایی که بعدها معرفی شدند، علی‌رغم افزایش دقت محاسبات نظیر تنش و کرنش، چندان در فعالیت‌های صنعتی مورد استقبال قرار نگرفتند. این معیار بر اساس انتگرال زمانی شتاب خطی وارد به سر معرفی شده و در اندازه‌گیری ایمنی خودروها، کلاه‌های ایمنی و لوازم ورزشی استفاده می‌شود. رابطه زیر فرمول ریاضی مرتبط با این معیار را نشان می‌دهد:

$$HIC = \left\{ \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\}_{Max} \quad (2)$$

در این رابطه t_1 زمان اولیه و t_2 زمان نهایی شتاب‌گیری است. اگر شتاب در بازه‌های مختلفی تکرار شود، برای هر بازه باید این محاسبات تکرار و مقدار بیشینه HIC به دست آید. ترم شتاب در این رابطه بر اساس ضریبی از شتاب گرانش زمین اندازه‌گیری می‌شود. در سال ۱۹۹۸، مرتز^۴ با بررسی داده‌های اجساد، دریافت که در HIC برابر با ۱۰۰۰ احتمال آسیب شدید، کمتر از حدود ۲۰ درصد است [۲۲].

با این حال، سازمان‌های بیمه‌ای و استانداردهای خودروسازی، مقدار مجاز برای خودروها را عدد ۷۰۰ اعلام کرده‌اند. به این ترتیب شانس آسیب‌دیدگی به کمترین مقدار خود می‌رسد [۲۳].

۶.۲ معیار آسیب بیومکانیکی HIC^۱

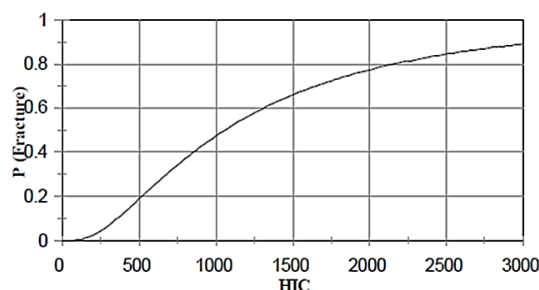
در سال ۱۹۳۹ آزمایشات اولیه‌ای برای بررسی آسیب مغزی بر اثر ضربه در دانشگاه وین استیت^۲ شکل می‌گیرد. این آزمایشات بر روی اجساد و به‌صورت رهاسازی از ارتفاع بوده‌است. بر اساس نتایج حاصل از این آزمایشات و استفاده از محاسبه انتگرال شتاب، منحنی‌های احتمال آسیب ایجاد شده‌اند. شکل ۸ نمونه‌ای از منحنی‌ها را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۸ احتمال شکستگی مجامه با مقدار ۷۰۰ برای HIC تقریباً ۳۱ درصد است.

۷.۲ معیار آسیب بیومکانیکی CSI^۵

معیار آسیب ستون فقرات و قفسه سینه (CSI) نیز مطابق معیار HIC از انتگرال‌گیری در طول زمان برای شتاب وارده به ستون فقرات به دست می‌آید و این شتاب در یک بازه زمانی ۳ میلی‌ثانیه نباید از $60g$ بیشتر باشد و از طرفی مقدار مجاز CSI نیز برابر با ۷۰۰ می‌باشد و مقادیر بالاتر احتمال آسیب جدی ستون فقرات را در پی خواهد داشت [۲۵].

۳ نتایج پژوهش

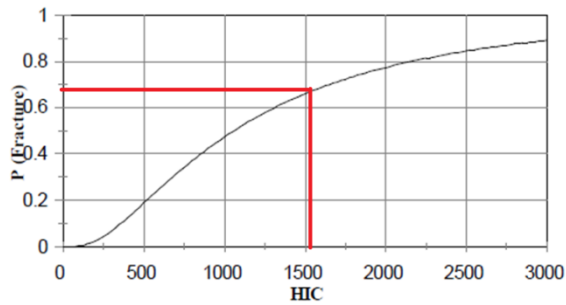
نتایج مورد بررسی شامل شتاب وارده به سر و ستون فقرات به همراه نیروی انتقالی از طرف صندلی به دامی و همچنین مقادیر HIC و CSI است. در ابتدا خروجی‌ها به‌صورت جداگانه برای هر یک از سه حالت بدون لانه‌زنبوری، با لانه‌زنبوری آلومینیومی و با لانه‌زنبوری UPVC ارائه می‌شود و در نهایت هر سه حالت با هم مقایسه خواهند شد.



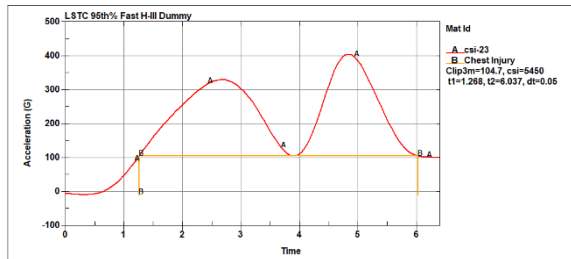
شکل ۸- منحنی ریسک HIC [۲۱]

4. Mertz
5. Chest Severity Index

1. Head Injury Criterion
2. Wayne State
3. NHTSA, National Highway Traffic Safety Administration



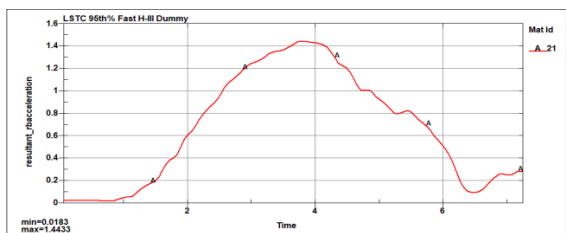
شکل ۱۳- آسیب وارده به سر با منحنی ریسک HIC برای مدل بدون جاذب لانه‌زنبوری
شکل ۱۴ مقدار و محدوده CSI برای حالت بدون لانه‌زنبوری را نشان می‌دهد که برابر با ۵۴۵۰ به دست آمده که بسیار بالاتر از حد مجاز می‌باشد.



شکل ۱۴- مقدار و محدوده CSI با استفاده از انتگرال‌گیری از نمودار شتاب برای مدل بدون جاذب لانه‌زنبوری

۲.۳ نتایج حالت دوم

در این بخش نتایج حالت مدل با جاذب لانه‌زنبوری آلومینیومی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شکل‌های ۱۵، ۱۶، ۱۷ به ترتیب نمودار شتاب وارده به سر، شتاب ستون فقرات و نیروی وارده به دامی در مدل صندلی با جاذب لانه‌زنبوری آلومینیومی را نشان می‌دهند.



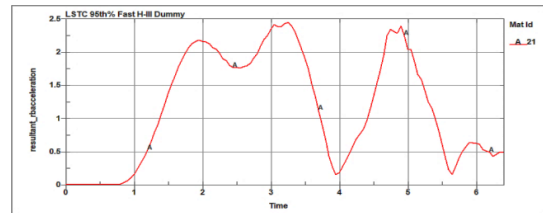
شکل ۱۵- شتاب وارده به سر در مدل با جاذب لانه‌زنبوری آلومینیومی



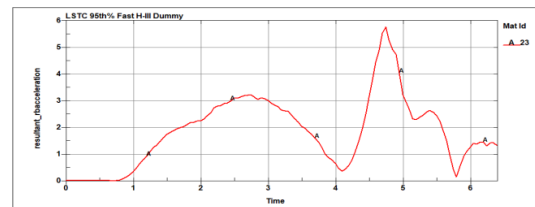
شکل ۱۶- شتاب وارده به ستون فقرات در مدل با جاذب لانه‌زنبوری آلومینیومی

۱.۳ نتایج حالت اول

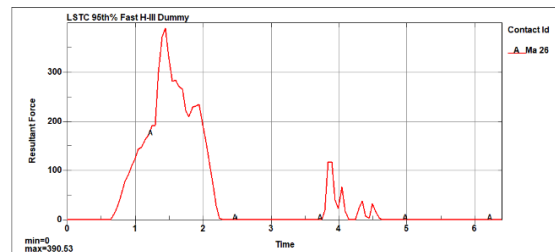
در این بخش نتایج حالت مدل بدون جاذب لانه‌زنبوری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نمودار شتاب وارده به سر، شتاب ستون فقرات و نیروی وارده به دامی را در مدل صندلی بدون جاذب لانه‌زنبوری نشان می‌دهند.



شکل ۹- شتاب وارده به سر در مدل بدون جاذب لانه‌زنبوری

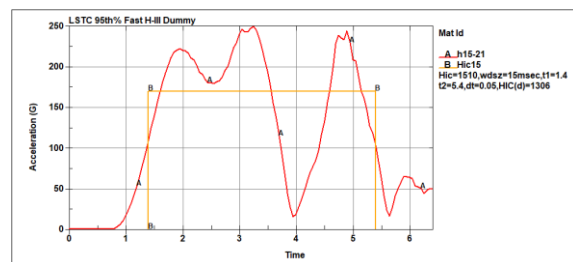


شکل ۱۰- شتاب وارده به ستون فقرات در مدل بدون جاذب لانه‌زنبوری



شکل ۱۱- نیروی وارده به دامی در مدل بدون جاذب لانه‌زنبوری

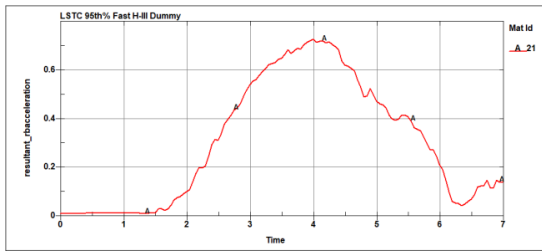
مطابق معیار ذکر شده، مقدار HIC در شبیه‌سازی بدون جاذب لانه‌زنبوری برابر ۱۵۱۰ به دست آمده است (شکل ۱۲). این میزان، از مقدار مجاز ۷۰۰ بالاتر بوده و مطابق منحنی ریسک اشاره شده میزان آسیب جدی با مقدار HIC ۱۵۱۰ تقریباً برابر با ۶۸ درصد می‌باشد که مقدار بسیار بالایی است (شکل ۱۳).



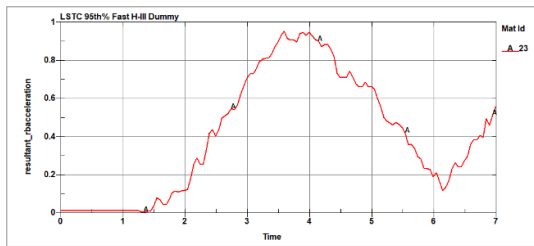
شکل ۱۲- مقدار و محدوده HIC برای مدل بدون جاذب لانه‌زنبوری

۳.۳ نتایج حالت سوم

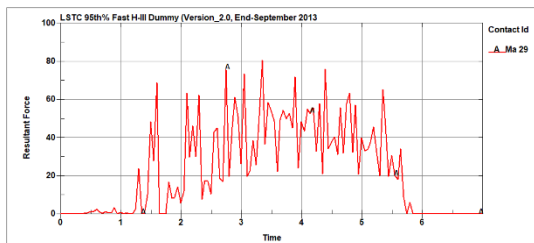
در این بخش نتایج حالت مدل با جاذب لانه‌زنبوری UPVC مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شکل‌های ۲۱، ۲۲ و ۲۳ به ترتیب نمودار شتاب وارده به سر، شتاب ستون فقرات و نیروی وارده به دامی را در مدل صندلی با جاذب لانه‌زنبوری UPVC نشان می‌دهند.



شکل ۲۱- شتاب وارده به سر در مدل با جاذب لانه‌زنبوری UPVC

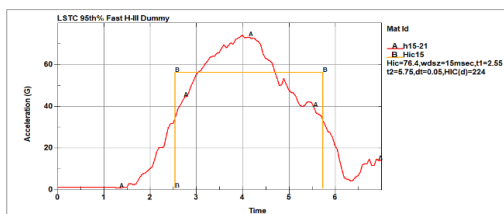


شکل ۲۲- شتاب وارده به ستون فقرات در مدل با جاذب لانه‌زنبوری UPVC

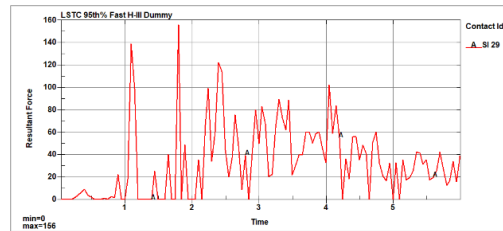


شکل ۲۳- نیروی وارده به دامی در مدل با جاذب لانه‌زنبوری UPVC

مطابق معیار ذکرشده، مقدار HIC در شبیه‌سازی مدل با جاذب لانه‌زنبوری UPVC برابر ۷۶/۴ به دست آمده است (شکل ۲۴) که از مقدار مجاز ۷۰۰ بسیار پایین‌تر است. مطابق منحنی ریسک اشاره شده میزان آسیب جدی با مقدار HIC ۷۶/۴ تقریباً برابر صفر درصد می‌باشد که بسیار رضایت‌بخش است (شکل ۲۵).

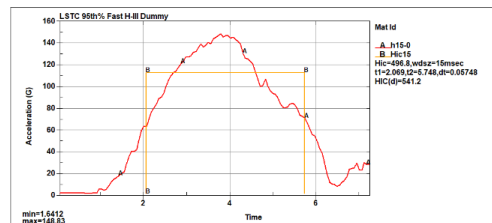


شکل ۲۴- مقدار و محدوده HIC برای مدل با جاذب لانه‌زنبوری UPVC

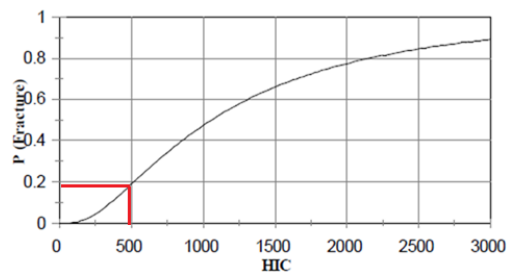


شکل ۱۷- نیروی وارده به دامی در مدل با جاذب لانه‌زنبوری آلومینیومی

مطابق معیار ذکرشده، مقدار HIC در شبیه‌سازی با جاذب لانه‌زنبوری آلومینیومی تقریباً برابر ۴۹۷ به دست آمده است (شکل ۱۸). این میزان، از مقدار مجاز ۷۰۰ پایین‌تر بوده و مطابق منحنی ریسک اشاره شده میزان آسیب جدی با مقدار HIC ۴۹۷ تقریباً برابر با ۱۹ درصد می‌باشد که مقدار قابل‌قبولی از نظر آسیب بیومکانیکی سر است (شکل ۱۹).

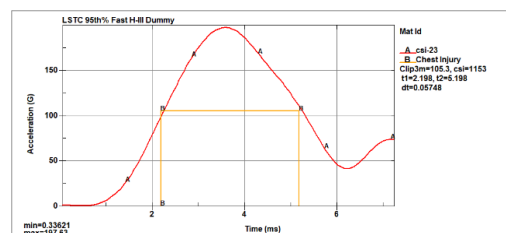


شکل ۱۸- مقدار و محدوده HIC برای مدل با جاذب لانه‌زنبوری آلومینیومی



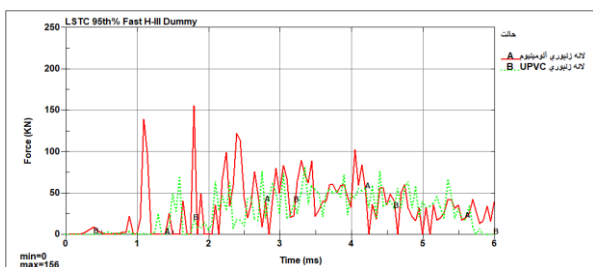
شکل ۱۹- درصد آسیب وارده به سر با منحنی ریسک HIC برای مدل با جاذب لانه‌زنبوری آلومینیومی

شکل ۲۰ نیز مقدار و محدوده CSI برای حالت با لانه‌زنبوری آلومینیومی را نشان می‌دهد که برابر با ۱۱۵۳ به دست آمده که بالاتر از حد مجاز ۷۰۰ می‌باشد.

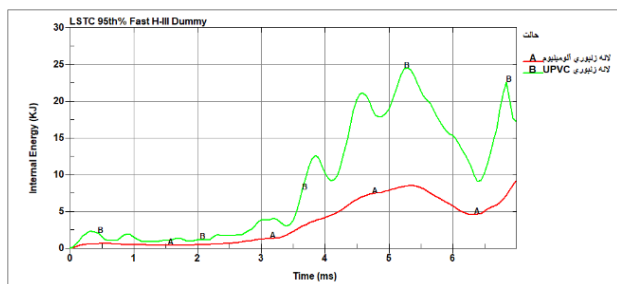


شکل ۲۰- مقدار و محدوده CSI با استفاده از انتگرال گیری از نمودار شتاب برای مدل با جاذب لانه‌زنبوری آلومینیومی

جهت مقایسه جاذب‌های آلومینیومی و UPVC فقط به نمودار شتاب بسنده نکرده و میزان نیروی وارده به دامی و همچنین نمودار جذب انرژی نیز برای این دو حالت معیار قرار گرفته‌است. شکل‌های ۲۹ و ۳۰ به ترتیب نمودارهای نیروی وارده به دامی و میزان جذب انرژی لانه‌زنبوری را در دو حالت اشاره شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است از نظر نیروی وارده بر دامی نیز عملکرد UPVC بهتر بوده‌است. از طرفی میزان جذب انرژی لانه‌زنبوری UPVC نیز بیشتر از آلومینیومی به‌دست آمده‌است.



شکل ۲۹- نمودار نیروی وارده به دامی در دو جاذب آلومینیومی و UPVC

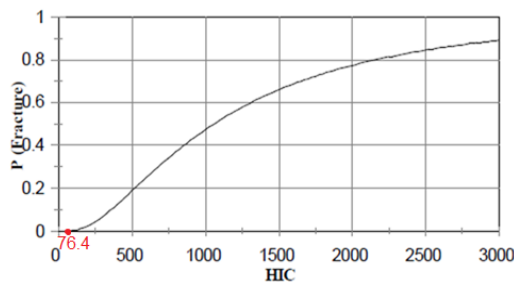


شکل ۳۰- نمودار میزان جذب انرژی (انرژی داخلی بر حسب زمان) در دو جاذب آلومینیومی و UPVC

۳.۵ تغییر شکل‌های لانه‌زنبوری

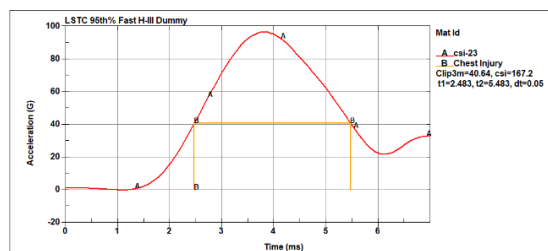
در این بخش، تغییر شکل‌های لانه‌زنبوری برای دو جنس آلومینیومی و UPVC مورد مطالعه قرار می‌گیرد. شکل‌های ۳۱ و ۳۲ تغییر شکل نهایی لانه‌زنبوری را برای دو جنس آلومینیومی و UPVC نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشخص است باتوجه به مقدار اولیه ۱۵ سانتی‌متری، میانگین تغییر شکل (لهیدگی) لانه‌زنبوری آلومینیومی (6mm) کمتر از UPVC (64 mm) به‌دست آمده‌است. باتوجه به تغییر شکل نهایی لانه‌زنبوری آلومینیومی نشان داده شده در شکل ۳۱، مشاهده می‌شود که لانه‌زنبوری آلومینیومی دچار تغییر شکل کمتر از میزان شکست نهایی شده، و در نتیجه دچار فروپاشی نشده‌است، ولی شکل ۳۲ نشان می‌دهد که لانه‌زنبوری

شبه‌سازی عددی صندلی کابین خلبان بالگرد تحت ضربه ناشی از سقوط



شکل ۲۵- درصد آسیب وارده به سر با منحنی ریسک HIC برای مدل با جاذب لانه‌زنبوری UPVC

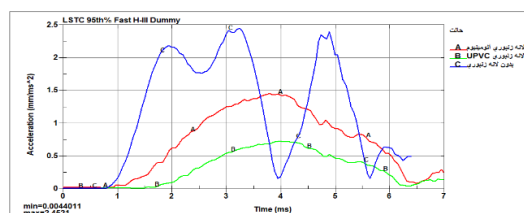
شکل ۲۶ نیز مقدار و محدوده CSI برای حالت با جاذب لانه‌زنبوری UPVC را نشان می‌دهد که تقریباً برابر با ۱۶۷ (بسیار پایین‌تر از حد مجاز ۷۰۰) به‌دست آمده‌است.



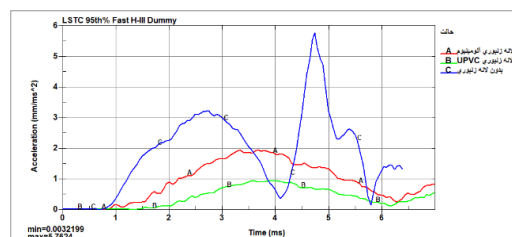
شکل ۲۶- مقدار و محدوده CSI با استفاده از انتگرال‌گیری از نمودار شتاب برای مدل با جاذب لانه‌زنبوری UPVC

۳.۴ مقایسه نتایج سه حالت شبه‌سازی شده

در این بخش برای اینکه درک بهتری از نتایج حاصل شود، هر سه حالت شبه‌سازی به‌صورت هم‌زمان و در یک نمودار ارائه می‌شود. شکل ۲۷ و ۲۸ به ترتیب نمودارهای شتاب وارده به سر و ستون فقرات را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشخص است لانه‌زنبوری UPVC کاهش چشمگیر شتاب را در پی داشته‌است.



شکل ۲۷- نمودار شتاب وارده به سر در حالت‌های مختلف مدل



شکل ۲۸- نمودار شتاب وارده به ستون فقرات در حالت‌های مختلف مدل

۴ نتیجه گیری

مطابق پژوهش انجام شده، سازه لانه زنبوری آلومینیومی با اینکه معیار آسیب وارده به سر را برآورده کرده و در محدوده مجاز قرار می گیرد، ولی معیارهای آسیب وارده به ستون فقرات و محدوده شتاب مجاز را رد کرده است. با این حال نسبت به حالت بدون لانه زنبوری عملکرد بسیار بهتری داشته است و تا حدود زیادی توانسته است انرژی ضربه حاصل از سقوط را جذب نماید. در هر یک از معیارهای HIC، CSI و بیشینه نیروی وارده بر دامی به ترتیب ۶/۸۲ و ۱/۶۷، ۸/۷۸ و ۶/۸۲ درصد بهتر از حالت بدون لانه زنبوری عمل کرده است. از طرفی جاذب UPVC از جاذب آلومینیومی بهتر عمل کرده و هر سه معیار را با موفقیت پشت سر گذاشته است. لانه زنبوری UPVC در هر یک از معیارهای HIC، CSI و بیشینه نیروی وارده بر دامی به ترتیب از معیارهای ۶/۸۴، ۴/۸۵ و ۳/۴۸ درصد نسبت به لانه زنبوری آلومینیومی عملکرد بهتری داشته است. از دیگر مزایای UPVC وزن آن می باشد که در مقایسه با جاذب آلومینیومی در شرایط ضخامتی و تعداد خانه یکسان، تقریباً ۴۸ درصد سبک تر است. در مدل تحلیل شده، وزن لانه زنبوری آلومینیومی ۲/۶۳ کیلوگرم و وزن لانه زنبوری UPVC برابر با ۱/۳۶ کیلوگرم می باشد. در کل این میزان عملکرد جذب انرژی بهتر را می توان با تغییر شکل نهایی (میزان لهیدگی) لانه زنبوری ها در هر دو حالت به خوبی توجیه کرد. به عبارتی UPVC قابلیت بیشتری در ذخیره انرژی وارده داشته و نسبت به آلومینیومی بهتر عمل کرده است. در ادامه این پژوهش، مطالعه اثر هندسه های مختلف سازه لانه زنبوری بر روی نتایج، مطالعه اثر جنس های دیگر برای سازه لانه زنبوری یا حتی استفاده از پنل ساندویچی بر روی نتایج و انجام تست های تجربی پژوهش حاضر پیشنهاد می گردد.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [1] K. Hughes and J. Campbell, "Helicopter crashworthiness: A Chronological Review Of Research Related To Water Impact From 1982 To 2006," *Journal of the American Helicopter Society*, vol. 53, no. 4, pp. 429–441, 2008, <https://doi.org/10.4050/JAHS.53.429>.
- [2] K. E. Jackson, "Advances in rotorcraft crashworthiness: Trends leading to improved

UPVC دچار فروپاشی ناشی از کماتش شده است، دلیل این رفتار متفاوت را می توان در خواص مکانیکی متفاوت UPVC و آلومینیوم به ترتیب ارائه شده در جداول ۲ و ۳ مشاهده کرد، آنجا که مدول الاستیک آلومینیوم به مراتب بزرگتر است از UPVC، در نتیجه نیرویی کماتش لانه زنبوری UPVC کمتر است از لانه زنبوری آلومینیومی و نیرویی که باعث کماتش و فروپاشی لانه زنبوری UPVC شده است، در لانه زنبوری آلومینیومی فقط تغییر شکل ناچیزی ایجاد کرده است.



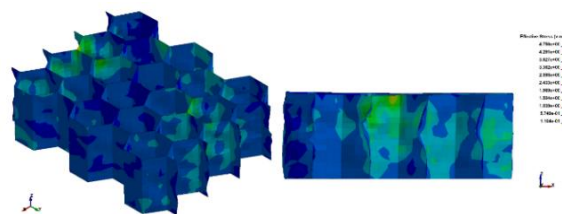
شکل ۳۱- تغییر شکل نهایی لانه زنبوری آلومینیومی



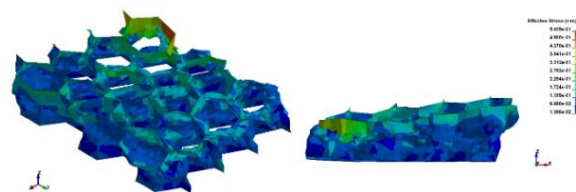
شکل ۳۲- تغییر شکل نهایی لانه زنبوری UPVC

۳.۶ کانتور تنش لانه زنبوری

در این بخش، کانتور تنش لانه زنبوری برای دو جنس آلومینیومی و UPVC مورد مطالعه قرار می گیرد. شکل های ۳۳ و ۳۴ به ترتیب کانتور تنش لانه زنبوری آلومینیومی و UPVC را نشان می دهند.



شکل ۳۳- کانتور تنش لانه زنبوری آلومینیومی



شکل ۳۴- کانتور تنش لانه زنبوری UPVC

- Forum.*, Delft, Netherlands, 2018, pp. 18–21.
- [13] K. E. Jackson, "Advances in rotorcraft crashworthiness-trends leading to improved survivability," *Journal of the American Helicopter Society*, vol. 63, no. 2, pp. 1–25, 2018, <https://doi.org/10.4050/2FJAHS.63.021001>.
- [14] M. Khodaei, M. Safarabadi Farahani, and M. Haghighi Yazdi, "Numerical investigation of the effect of material strain rate dependent properties on high velocity impact behavior and ballistic limit velocity of honeycomb structures," *Journal of Science and Technology of Composites*, vol. 5, no. 4, pp. 511–520, 2019, https://jstc.iust.ac.ir/article_32317.html?lang=en.
- [15] J. M. Inhofe, "Study on health of helicopter and tiltrotor pilots: literature review and epidemiology study," Office of the under Secretary of Defense, Washington, 2019.
- [16] P. Astori, M. Zanella, and M. Bernardini, "Validation of numerical models of a rotorcraft crashworthy seat and subfloor," *Aerospace*, vol. 7, no. 12, 2020. Art. no. 174, pp. 1–17, <https://doi.org/10.3390/aerospace7120174>.
- [17] F. Caputo, G. Lamanna, D. Perfetto, A. Chiariello, F. Di Caprio, and L. Di Palma, "Experimental and numerical crash worthiness study of a full-scale composite fuselage section," *AIAA Journal*, vol. 59, no. 2, 2021, <https://doi.org/10.2514/1.J059216>.
- [18] E. Davoodi, P. Safarpour, M. Pourgholi, and M. Khazaei, "Modeling, design and investigation of seat suspension based on negative stiffness structure to improve the vibration environment for helicopter pilots," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, vol. 53, no. 4, pp. 2516–2538, 2021, (in Persian), <https://doi.org/10.22060/mej.2020.18125.6743>.
- [19] J. O. Hallquist and L. D. T. Manual, "Ls-Dyna Keyword User's Manual," Livermore software technology corporation, Livermore, California, pp. 1–1207, 1998, https://ftp.lstc.com/anonymous/outgoing/jday/manuals/L_S-DYNA_manual_Vol_II_R7.1.pdf.
- [20] S. Wang, K. Zhao, J. Shen, K. Liu, and G. Lu, "Dynamic process of ring systems as energy absorber subjected to lateral impact loading," *International Journal of Crashworthiness*, vol. 15, no. 6, pp. 605–615, 2010, <https://doi.org/10.1080/13588265.2010.484192>.
- [21] E. Hertz, "A note on the head injury criterion (HIC) as a predictor of the risk of skull fracture," in *Association for The Advancement of Automotive Medicine Annual Conference*, Des Plaines, IL, USA, 1993, vol. 37, pp. 303–312.
- [22] J. D. Rosen and H. S. Kassab, *Drugs, Gangs, and survivability 37th alexander a. nikolsky honorary lecture*, " *Journal of the American Helicopter Society*, vol. 63, no. 2, pp. 1–25, 2018, <https://doi.org/10.4050/JAHS.63.021001>.
- [3] X. Yang, J. Ma, D. Wen, and J. Yang, "Crashworthy design and energy absorption mechanisms for helicopter structures: A systematic literature review," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 114, 2020, Art. no. 100618, <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2020.100618>.
- [4] M. N. H. Abdul Latif, "Analysis and optimization of a crashworthy helicopter seat," M.S. thesis, Mechanical engineering at The University of Texas, Arlington, 2008.
- [5] H. Da.Yong and Z. Xiang, "Full-Scale crash test and fem simulation of a crashworthy helicopter seat," *Journal of Aerospace Power*, vol. 27, no. 2, pp. 395–400, 2012.
- [6] M. S. Risby, A. J. Khalid, K. Y. Leong, B. A. Gurunathan, M. N. Sulaiman and M. K. Rahman, "Numerical simulation of helicopter cockpit seat subjected to crash impact," *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 72–78, 2013, <https://doi.org/10.19026/rjaset.5.5086>.
- [7] M. Murugan, J. Yoo, and G. Hiemenz, "Simulation of adaptive seat energy absorber for military rotorcraft crash safety enhancement," US Army Research Laboratory, Aberdeen Proving Ground, Harford County, MD, USA, Rep. ARL-TR-6892, 2014.
- [8] A. Galehdari, M. Kadkhodayan, and S. Hadidi Moud, "Analytical and numerical study of energy absorption of graded honeycomb structure under in-plane impact," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 14, no. 16, pp. 261–271, 2015, (in Persian).
- [9] D. Hu, B. Song, D. Wang, and Z. Chen, "Experiment and numerical simulation of a full-scale helicopter composite cockpit structure subject to a bird strike," *Composite Structures*, vol. 149, pp. 385–397, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.04.035>.
- [10] M. Alisadeghi and J. Fazilati, "Optimization of honeycomb impact attenuator using genetic algorithm based on response surface method and design of experiment; Part I: crashworthiness," (in eng), *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 12, pp. 25–36, 2016, (in Persian).
- [11] S. S. Jafari and S. feli, "Analytical investigation of energy absorption of sandwich panels with honeycomb core," *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering.*, vol. 48, no. 2, pp. 157–168, 2016, (in Persian), <https://doi.org/10.22060/mej.2016.647>.
- [12] A. O. Bolukbasi, "New technologies to enhance rotorcraft crash safety," in *44th European Rotorcraft*

"Validation of finite element crash test dummy models for predicting orion crew member injuries during a simulated vehicle landing," in *10th International LS-DYNA Users Conference*, Dearborn, MI
Country: United States, 2009,
<https://ntrs.nasa.gov/citations/20090018048>.

Violence, Springer International Publishing, 2018,
http://dx.doi.org/10.1007/978-981-99-3057-9_6.

[23] R. T. Hasty *et al.*, "Wikipedia vs peer-reviewed medical literature for information about the 10 most costly medical conditions," *Journal of Osteopathic Medicine*, vol. 114, no. 5, pp. 368–373, 2014,
<http://dx.doi.org/10.7556/jaoa.2014.035>.

[24] A. Tabiei, C. Lawrence, and E. L. Fasanella,