

طراحی و تحلیل کلاه کاسکت با ساختار لانه زنبوری مدرج تحت بار ضربه ای

فرشید خلوصی^۱، سید علی گله داری^{۲*}

۱ و ۲ - گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

خلاصه

با توجه به اهمیت روز افزون ایمنی، جاذب های انرژی سبک از جمله سازه های لانه زنبوری مورد توجه قرار گرفتند. در این تحقیق، به طراحی سازه لانه زنبوری با هدف کاهش نیروهای ضربه ای وارد بر سر، به هنگام تصادفات رانندگی پرداخته شده است. جنس سازه لانه زنبوری پلی پروپیلن در نظر گرفته شده است. این سازه در نرم افزار آباکوس مدل شده و طبق استاندارد ایران، ضربه زننده تخت با سرعت ۵/۸ متر برثانیه و ضربه زننده نیم کره با سرعت ۴/۸ متر برثانیه از بالا به سر برخورد نموده است. سپس به بررسی انرژی جذب شده و مقدار نیروی وارد بر سر و شتاب پرداخته شده است. بر اساس نتایج بدست آمده و مقایسه با استاندارد، این سازه توانایی جذب انرژی را داشته و به خوبی از سر حفاظت می نماید.

کلمات کلیدی: لانه زنبوری مدرج، کلاه ایمنی، ضربه، جذب انرژی

۱. مقدمه

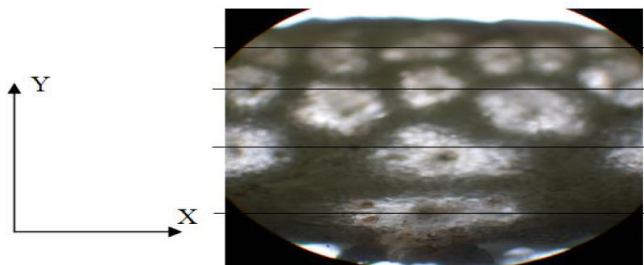
با توسعه سریع صنایع اتومبیل سازی، حمل و نقل و مهندسی هوافضا، بررسی ظرفیت جذب انرژی در وسایل نقلیه و سازه های محافظ به یکی از مهمترین زمینه های تحقیقاتی تبدیل شده است. در دهه گذشته انواع مختلفی از مواد و سازه ها با ظرفیت جذب انرژی ویژه بالا نظیر سازه های لانه زنبوری و سازه های جدار نازک بررسی شده است [۱]. در یک مثال، ساختار داخلی استخوان انسان یک سازه ی بهینه شده از لحاظ وزن در برابر اعمال تنش های اصلی و برشی می باشد [۲].

توضیحات مربوط به نویسنده مسئول یا مکاتبات
آدرس ایمیل: ali.galehdari@pmc.iaun.ac.ir

مکانیک، صنایع و هوافضا

2nd International Conference on New Research Achievements in
Mechanics, Industrial & Aerospace Engineering

محمد علی، بر اساس تحقیقی بر روی پوسته موز انجام داد، متوجه وجود سازه لانه زنبوری بر روی پوسته موز شد (شکل ۱)، او دریافت که وظیفه ی پوست موز حفاظت مغز نرم موز در برابر بارهای ضربه ای خارجی می باشد [۳].



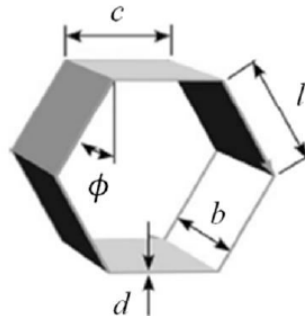
شکل ۱- برش پوسته موز [۳]

گله داری و همکاران به بررسی سازه لانه زنبوری مدرج تحت بارگذاری ضربه ای درون و برون صفحه ای پرداختند. آنها دریافتند که در جهت برون صفحه ای جذب انرژی ضربه ای در سازه های لانه زنبوری به مراتب بالاتر از جهت درون صفحه ای می باشد، اما در جهت درون صفحه ای با جذب مقدار مناسب انرژی جنبشی مقدار نیروی وارد شده به مراتب کاهش می یابد. از طرف دیگر مدرج نمودن سازه به نحوی که سختی سازه از محل اعمال نیرو به سمت پایین باشد باعث افزایش مدت زمان جذب انرژی و انتقال نیرو می گردد [۴]. یکی دیگر از کاربردهای سازه لانه زنبوری در کشتی سازی می باشد، هدف از تحقیق بر روی این نوع سازه، توسعه ساختار لانه زنبوری و بررسی و ارزیابی میزان خسارت می باشد [۵]. گله داری و همکاران در تحقیقی دیگر سازه لانه زنبوری آلومینیومی با پنج ردیف مختلف را در نرم افزار آباکوس مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش به منظور کسب اطمینان از روش شبیه سازی عددی، آزمون ضربه با سرعت کم بر روی سازه لانه زنبوری ساخته شده از جنس ورق آلومینیم انجام شده است. بر اساس نتایج بدست آمده نتایج عددی انطباق مناسبی با نتایج تجربی را نشان داده است [۶]. ایشان در پژوهشی دیگر با استفاده از الگوریتم ژنتیک و روش SQP، یک جاذب شوک صندلی هلیکوپتر بهینه به منظور جذب انرژی و دستیابی به حداقل نیروی عکس العمل انتقالی به لگن طراحی نموده- اند. بررسی جاذب شوک لانه زنبوری در شرایط لهیدگی توسط نرم افزار آباکوس انجام شده است [۷]. طراحی سازه هایی که توانایی مقاومت در برابر ضربه و کاهش اثر ضربه و برخورد را دارند نیازمند دانش دینامیک سازه و فهم خصوصیات و مکانیزم های تغییر شکل مواد هستند [۸-۹]. علاوه بر تمام مزایای این سازه ها، وزن سبک آنها باعث می شود که این سازه- ها در کاربردهای هوایی نیز مقبول افتاده و مورد استفاده قرار گیرند، همچنین ماژول جذب ضربه و انرژی، قسمت مهمی از زیر سیستم بازیابی کپسول بازگشتی است. به عنوان مثال در آپولو ۱۱، سازه لانه زنبوری فلزی به کار گرفته شده است [۱۰]. خان و همکاران، با انجام آزمایش خصوصیات ضربه پذیری سازه های لانه زنبوری در جهات برون و درون صفحه ای را بررسی کردند و نشان دادند که جهت برون صفحه ای از استحکام بالاتری برخوردار است [۱۱]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۴ حساسیت لانه زنبوری های آلومینیومی را با سرعتی در حدود ۲۰ تا ۸۰ متر بر ثانیه بررسی کردند [۱۲]. تانگ و همکاران بر روی تاثیر انطباق سر، کلاه ایمنی و تاثیر مواد تشکیل دهنده آن در مقابل ضربه تحقیق کرده و بر اساس هندسه های واقعی کلاه ایمنی، تست های استاندارد ضربه و شوک را برای ارزیابی پاسخ دینامیکی شبیه سازی کردند [۱۳].

۱۴. وینسنت وهمکاران، کلاه ایمنی با سازه لانه زنبوری را تحت بارگذاری برون صفحه ای قرار داده و سپس به بهینه سازی پارامترها پرداختند [۱۵].

۲. مکانیک سازه لانه زنبوری

دو پارامتر موثر در میزان جذب انرژی سازه لانه زنبوری، چگالی نسبی و تنش مسطح (σ_p) هستند. اگر قسمتی از نمودار دارای تنش ثابتی باشد به آن مقدار، تنش مسطح σ_p گویند. در واقع مقدار تنش مسطح ثابت نیست اما تغییرات آن ناچیز است [۱۶]. جذب انرژی توسط سازه لانه زنبوری در جهت درون صفحه ای با تبدیل انرژی جنبشی به انرژی کرنشی و فشردگی سازه انجام می شود. سلول ساختار لانه زنبوری به همراه پارامترهای آن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- سلول ساختار لانه زنبوری

به دلیل سهولت کار، رفتار مواد کشسان - کاملاً مومسان در نظر گرفته شده است، رابطه تنش مسطح برای رفتار کشسان کاملاً مومسان، مطابق رابطه (۱) قابل محاسبه است [۱۷].

$$\sigma_p = \frac{\sigma_y}{2} \times \frac{d^2}{(c + l \sin \phi)(l - d) \sin \phi} \quad (1)$$

کرنش نظیر فشردگی و یا قفل شدگی بر اساس چگالی نسبی مطابق رابطه (۲) قابل محاسبه است [۱۷].

$$\rho = \frac{\left(\frac{d}{l}\right)\left(\frac{c}{l} + 2\right)}{2\left(\sin \phi + \frac{c}{l}\right) \cos \phi} \rho_s \quad (2)$$

در این رابطه ρ ، چگالی سازه لانه زنبوری و ρ_s ، چگالی مواد سازه لانه زنبوری است. چگالی نسبی ρ^* ، نسبت چگالی بین

ρ و ρ_s ($\rho^* = \frac{\rho}{\rho_s}$) است که طبق رابطه (۳) می توان کرنش نظیر قفل شونده ϵ_d را محاسبه نمود [۱۷].

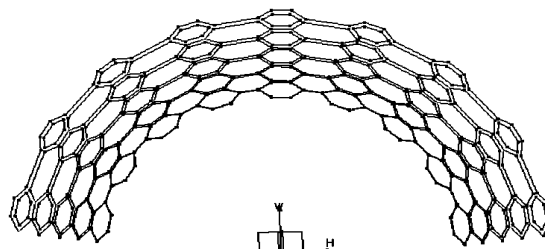
$$\varepsilon_d = 1 - \rho^* = 1 - \frac{\left(\frac{d}{l}\right)\left(\frac{c}{l} + 2\right)}{2\left(\sin \phi + \frac{c}{l}\right) \cos \phi} \quad (3)$$

ε_d کرنش نظیر انتهای تغییر شکل در هر ردیف است که می توان برای هر ردیف مقدار آن را بدست آورد.

۳. طراحی و تحلیل جاذب ضربه کلاه ایمنی

۳-۱. معرفی استاندارد و تعریف مسئله

استانداردهای مختلفی مانند استانداردهای ۲۲.۰۵ ECE-EN، DOT، Snell برای تست کلاه ایمنی پیشنهاد شده است. در این تحقیق از استاندارد ایران استفاده شده است. طبق این استاندارد جرم سر، مطابق با سایز سر، از ۳/۸ - ۶/۱ کیلوگرم، به پنج قسمت A, E, J, M, O تقسیم بندی شده است. در این مسئله، کلاه ایمنی نوع ۱ مورد بررسی قرار گرفته و وزن سر ۴/۷ کیلوگرم (سایز J) انتخاب شده است. آزمون جذب ضربه با دو نوع ضربه زنده انجام شد، ضربه زنده اول از جنس فولاد به صورت تخت با قطر ۱۳ سانتی متر، با سرعت ۵/۸ متر بر ثانیه به یکی از چهار نقطه منتخب بر کلاه ایمنی برخورد می کند. ضربه زنده دوم به صورت نیم کره فولادی با شعاع ۵ سانتی متر، با سرعت ۴/۸ متر بر ثانیه به نقطه منتخب کلاه ایمنی ضربه ای وارد می کند. حداکثر شتاب ضربه ۳۰۰g می باشد، مطابق با این شتاب حداکثر نیروی مجاز وارده به سر طبق رابطه $f = ma$ ، ۱۳۸۳۲ نیوتن محاسبه شده است [۱۸]. مطلوبست ضخامت لایه ضربه گیر در کلاه ایمنی ۲ تا ۵ سانتی متر در نظر گرفته شود [۱۹]. شعاع داخلی کلاه ایمنی ۹ سانتی متر و شعاع خارجی آن در حدود ۱۳ سانتی متر در نظر گرفته شده است. سازه لانه زنبوری ۵ ردیفه ای از جنس پلی پروپیلن طراحی شده و پوسته ای از جنس ABS به ضخامت ۴ میلی متر بر روی آن قرار گرفته است. شکل ۳ نمونه اولیه این سازه را در نرم افزار کتیا نشان می دهد.



شکل ۳- نمونه اولیه سازه لانه زنبوری مدرج

۳-۲. شبیه سازی عددی

سازه لانه زنبوری مطابق شکل ۳ در نرم افزار آباکوس مدل سازی شده است. اندازه پارامترهای این سازه به ترتیب $\phi = 56^\circ$ و $l = 7mm$ $c = 9mm$ می باشد. خواص مواد در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- خواص مواد

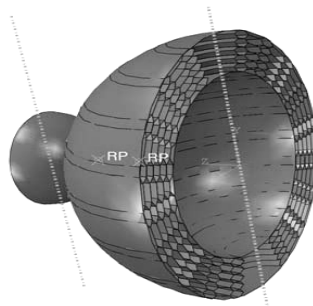
ماده	چگالی $\rho (Kg/m^3)$	مدول یانگ $E (GPa)$	ضریب پواسان ν	تنش تسلیم $\sigma_y (MPa)$
پلی پروپیلن	۹۳۲	$1/35 \times 10^9$	۰/۳۸	25×10^6
ABS	۱۲۰۰	2×10^9	۰/۳۷	$34/3 \times 10^6$

به دلیل مدرج بودن سازه، ضخامت ردیف ها از بالا به پایین مطابق جدول ۲ کاهش می یابد.

جدول ۲- ضخامت لایه ها

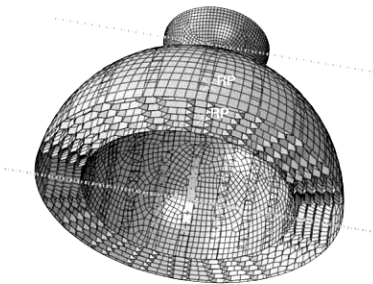
ردیف	ضخامت (m)
۱	۰/۰۰۰۹
۲	۰/۰۰۰۷
۳	۰/۰۰۰۵
۴	۰/۰۰۰۳
۵	۰/۰۰۰۱

ضربه زننده و سر مصنوعی (نیم کره داخلی) در نرم افزار، صلب تعریف می شوند. شکل ۴ نمایی از سازه مدل سازی شده در نرم افزار آباکوس را نشان می دهد.



شکل ۴ - شکل نهایی سازه لانه زنبوری در کلاه ایمنی همراه با ضربه زننده کروی

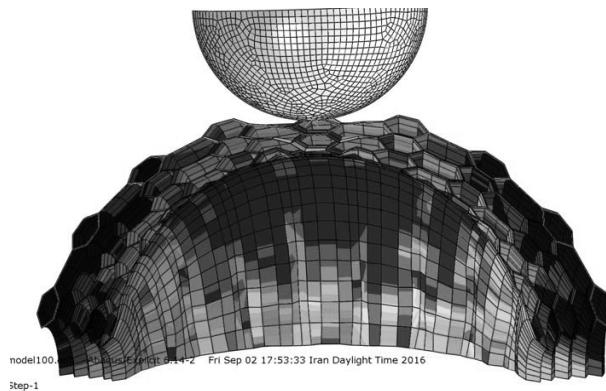
برای برخورد ضربه زننده به کلاه ایمنی و نیز نحوه تماس کلاه به سر مصنوعی، تماس اصطکاکی در نظر گرفته شده است. مقدار ضریب اصطکاک کلاه و ضربه زننده ۰/۵۵ و مقدار بین کلاه و سر مصنوعی ۰/۴۵ می باشد [۲۰]. سرعت برخورد ضربه زننده، همانند استاندارد تعریف می شود. مش بندی سازه، مطابق شکل ۵ می باشد. برای شبکه بندی سازه و پوسته از المان S۴R و برای ضربه زننده و سر مصنوعی از المان R۳D۴ استفاده شده است.



شکل ۵- مش بندی سازه

۴. بحث و بررسی نتایج

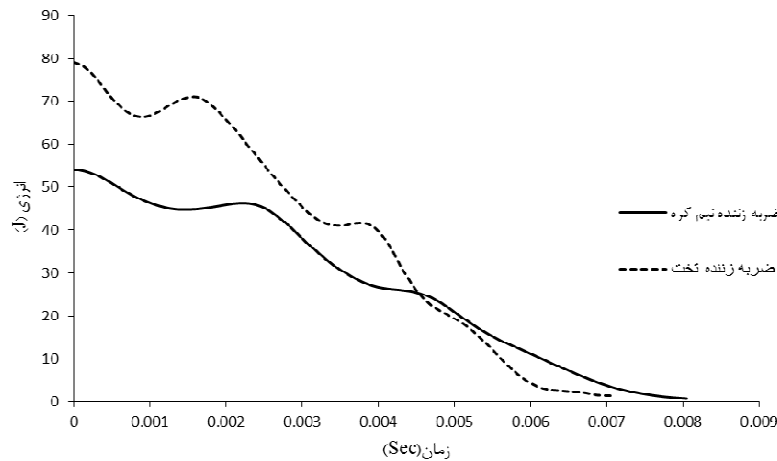
شکل ۶، لهیدگی سازه تحت ضربه را نشان می دهد. طبق این شکل، سه ردیف از پنج ردیف تحت بار ضربه ای له شده و دو ردیف بالایی کمی تغییر شکل پیدا کرده اند. این سازه نیروی وارده را در خود جذب و بار متمرکز وارد شده در لایه زیرین را به بار گسترده تبدیل می کند تا کمترین آسیب به سر وارد شود. در ادامه به بررسی انرژی جنبشی، نیروی عکس العمل و شتاب سازه پرداخته شده است.



شکل ۶- لهیدگی سازه لانه زنبوری تحت بار ضربه ای

۴-۱. انرژی جنبشی

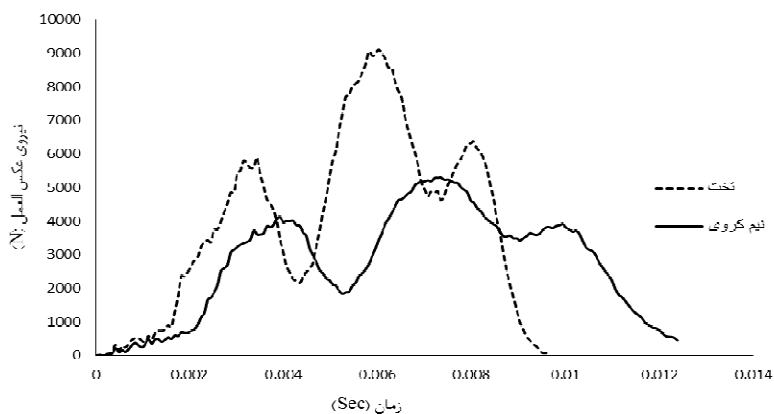
همان طور که در نمودار شکل ۷ مشاهده می شود، ضربه زنده تخت، دارای انرژی جنبشی بیشتری نسبت به ضربه زنده نیم کروی داراست. این سازه توانسته تمام انرژی را در خود جذب کند و حتی قادر به جذب انرژی بیشتری نیز می باشد. از طرف دیگر، در هر دو شرایط انرژی جنبشی اعمال شده به طور کامل جذب شده است.



شکل ۷- جذب انرژی جنبشی ضربه زنده تخت و نیم کره

۴-۲. نیروی عکس العمل

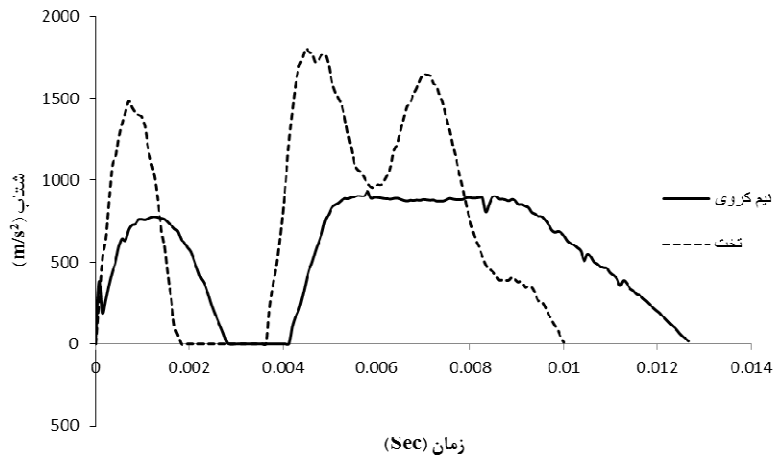
با توجه به استاندارد، نیروی عکس العمل شده از جاذب به سر، باید کمتر از ۱۳۸۳۲ نیوتن باشد که با توجه به نمودار شکل ۸، حداکثر نیروی عکس العمل ضربه زنده تخت و نیم کروی به ترتیب ۸۹۴۵ و ۵۳۰۴ نیوتن است که بسیار کمتر از مقدار تعیین شده در استاندارد است. بنابراین شرط استاندارد را تایید می کند.



شکل ۸- نمودار نیروی عکس العمل زمان

۳-۴. شتاب

مطابق با استاندارد ایران، حداکثر شتاب در بازه زمانی ۴ میلی ثانیه باید کمتر از $\frac{m}{s^2} 2940 \cdot (300g)$ باشد که با توجه به شکل ۹، حداکثر شتاب برای ضربه زنده تخت و نیم کروی به ترتیب برابر با مقادیر ۱۸۰۴ و ۹۰۵ است که کمتر از $g 300$ است. پس سازه این شرط استاندارد را نیز تایید می کند.



شکل ۹ - نمودار شتاب - زمان

۵. نتیجه گیری

بررسی جاذب ضربه در شرایط لهیدگی، با نرم افزار آباکوس انجام شده است. این سازه در تست ضربه، با ضربه زنده تخت و ضربه زنده نیم کره فولادی توانست تمام انرژی جنبشی را در خود جذب نماید. نیروی عکس العمل در این دو ضربه از مقدار معرفی شده در استاندارد کمتر بوده و شتاب وارد به سر، بسیار کمتر از شتاب معرفی شده در استاندارد بدست آمد. بنابراین جاذب ضربه در کلاه ایمنی، برای شرایط تصادف (لهیدگی) کاربردی است و حتی می تواند در سرعت و انرژی بالاتر به کار رود، به عبارت دیگر، می توان نتیجه گرفت که ساختار لانه زنبوری توانایی جذب انرژی درون صفحه ای و کاهش صدمات در برخورد با اجسام را دارد.

۶. منابع

۱. نیک نژاد، ع. لیاقت، غ. (۱۳۸۹)، " بررسی اثر پر کننده فوم پلی اورتان بر روی رفتار لانه زنبوری های شش گوشه تحت بار محوری با نرخ ثابت با روش تجربی " کنفرانس انجمن هوا فضای ایران، دانشگاه تربیت مدرس.
۲. Koch, J.C. (۱۹۱۷), "The laws of bone architecture," American Journal of Anatomy, ۲۱, pp ۱۷۷-۱۹۸.

۳. Muhammad, A. (۲۰۰۷), "Study of a compact energy absorber," PhD Thesis, Iowa State University, USA.

۴. گله داری، س.ع.، کدخدایان، م. (۱۳۹۴)، "مطالعه سازه لانه زنبوری مدرج تحت بارگذاری ضربه ای درون و بیرون صفحه ای" بیست و سومین همایش سالانه بین المللی مهندسی مکانیک ایران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۵. Zenkert, D., Shipsha, A., Bull, P. and Hayman, B. (۲۰۰۵), "Damage tolerance assessment of composite sandwich panels with localized damage," Composites Science and Technology, ۶۵(۹۷-۲۶۱۱).

۶. Galehdari, S.A., Kadkhodayan, M. and Hadidi-Moud, S. (۲۰۱۵), "Analytical, experimental and numerical study of a graded honeycomb structure under in-plane impact load with low velocity," Int. J. Crashworthiness, ۲۰, pp ۳۸۷-۴۰۰.

۷. Galehdari, S.A. and Khodarahmi, H. (۲۰۱۶), "Design and analysis of a graded honeycomb shock absorber for a helicopter seat during a crash condition," International Journal of Crashworthiness, Vol. ۲۱, No. ۳, ۲۳۱-۲۴۱.

۸. Petrone, G., Rao, S., De Rosa, S., Mace, B.R., Franco, F. and. Bhattacharyya, D. (۲۰۱۳), "Behavior of fiber-reinforced honeycomb core under low velocity impact loading," Composite Structures, Vol. ۱۰۰, pp ۳۵۶-۳۶۲.

۹. Li, M., Deng, Z., Guo, H., Liu, R. and Ding, B. (۲۰۱۴), "Optimizing crashworthiness design of square honeycomb structure," Journal of Central South University, Vol ۲۱, pp ۹۱۲-۹۱۹.

۱۰. Li, M., Deng, Z., Liu, R. and Guo, H. (۲۰۱۱), "Crashworthiness design optimization of metal honeycomb energy absorber used in lunar lander," International Journal of Crashworthiness, Vol. ۱۶, No. ۴, pp. ۴۱۱-۴۱۹.

۱۱. Khan, M. K., Baig, T., and Mirza, S. (۲۰۱۲), "Experimental investigation of in-plane and out-of-plane crushing of aluminum honeycomb," Materials Science & Engineering, Vol. ۵۳۹, pp ۱۳۵-۱۴۲.

۱۲. Wang, Z., Tian, H., Lu, Z. and Zhou, W. (۲۰۱۴), "High-speed axial impact of aluminum honeycomb – Experiments and simulations," Composites Part B, ۵۶, pp ۱-۸.

۱۳. Chang, L. T., Chang, C. H. and Chang, G. L. (۲۰۰۱), "Fit effect of motorcycle helmet-A finite element modeling," JSME International journal, Vol. ۴۴, No. ۱.

۱۴. Chang, L. T., Chang, C. H. and Chang, G. L. (۲۰۰۳), "Finite element analysis of the effect of motorcycle helmet materials against impact velocity," Journal of the Chinese institute of engineers, Vol. ۲۶, No. ۶, pp ۸۳۵-۸۴۳.

۱۵. Caccese, V., Ferguson, J. and Edgecomb, M. (۲۰۱۳), "Optimal design of honeycomb material used to mitigate head impact," National Institutes of Health, ۴۰۴-۴۱۲.

۱۶. Lu, G. and Yu, T.X. (۲۰۰۳), "Energy Absorption of structures and materials," Woodhead Publishing Limited & CRC Press, England.

۱۷. Gibson, L.J. and Ashby, M.F. (۱۹۹۷), "*Cellular Solids; Structures and Properties*," Cambridge University Press ۲nd edition, England.

۱۸. سازمان ملی استاندارد ایران. (۱۳۹۲). "خودرو - کلاه های ایمنی برای کاربران وسایل نقلیه موتوری،" تجدید نظر دوم، ایران.

۱۹. Fernandes, F.A.O. and Alves de Sousa, R.J. (۲۰۱۳), "Motorcycle helmets—A state of the art review," *Accident Analysis and prevention* ۵۶, pp ۱-۲۱.

۲۰. Mills, N.J., Wilkes, S., Derler, S. and Flisch, A. (۲۰۰۹), "FEA of oblique impact tests on a motorcycle helmet," *International journal of impact engineering*, No. ۳۶, pp ۹۱۳-۹۲۵.