Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(2) (2021) 171-174
DOI: 10.22060/mej.2020.16512.6379

Numerical Investigation of the Effect of Shell Material and Thickness on the Mechanics of Motorcycle Helmets Impact

M. Ghasemzade Moghaddam, S. A. Hashemian*

Department of Mechanical Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.

ABSTRACT: In motorcycle accidents, the acceleration caused by the collision has a huge risk to the health of the motorcyclists and passengers. In this study, the finite element method was used for dynamic analysis of impact mechanics to predict the effect of the shell material and thickness on the head injury criteria of the helmeted head (including head, shell, foam, comfortable foam and strap). The open-face helmet, including three current market materials, were selected. Head orientation, in most accidents, at the collision moment is oblique. In the simulated impact model, the head is also placed obliquely. The results of this study are validated by the experimental results and valid published data. The simulation results show that there is an optimum thickness for the helmet shell regardless of its material. In order to determine the optimum thickness, there must be compromises between the various parameters such as head injury criteria, shell failure, weight, and price. According to the results obtained for the shell thickness, if the thickness increases, the weight and range of acceleration increase while the probability of shell failure decreases. If the thickness decreases, despite decreasing the acceleration in the head, the stress in the shell increases that leads to failure.

Review History:
Received: Jun. 10, 2019
Revised: Jan. 18, 2020
Accepted: Jan. 19, 2020
Available Online: Feb. 02, 2020

Keywords:
Motorcycle helmet
Finite element method
Oblique impact
Head injury criteria
Impact test

1- INTRODUCTION

Road accidents are one of the most important causes of death in the world. Peden [1], as well as Koornstra et al [2], showed that motorists are 30 times more likely to be injured in a traffic accident than car users because motorists are less safe than other users of vehicles. Mills and Gilchrist [3] shown that oblique impact is the most common type of collision in the world that causes linear and rotational acceleration. Motorcycle helmets protect against head-to-head collisions along with head protection during an accident and have benefits such as protection against wind and dust as well as preventing adverse weather conditions. The helmet consists of two main parts: the outer shell and the foam. The shell is the outermost layer of the helmet to protect against impacts. The shell protects against foam breakage and sharp objects during impact by spreading the impact over a large area of the helmet.

In the present study, the effect of the material and the thickness of the shell and the velocity of impact, on linear and rotational acceleration on the open-face helmet is investigated using the finite element method considering the shell in three modes, including two composites and one thermoplastic material for open-face helmets. The numerical solution results are validated with laboratory results as well as valid articles. By examining the role of shell thickness in helmets and its effect on head injury criterion as well as thickness optimization, not only does helmet play a protective role in the moment of collision, but also the possibility of material savings, weight loss due to the extra thickness and thus convenience in use is also fully available.

*Corresponding author's email: a.hashemian@hsu.ac.ir

2- METHODOLOGY

In this research, ABAQUS software explicit solver has been used to simulate motorcycle impact because loads on the helmet set and the head occur in a very short time and the explicit solvers also simulate instantaneous processes such as impact and shock. The important role of the contact between the layers and their friction that creates tangential force, the thickness of the layers, the complex helmet geometry, the existence of large deformations, as well as the nonlinear and independent behavior of the foam strain rate, are the reasons for using the finite element to obtain the center of mass acceleration. The helmet specimen purchased was measured using laser scanning technology and designed in the SolidWorks software. This model includes all parts of a helmet including shell, foam, comfortable foam, chin-straps, and fabric strap fittings. To simulate the behavior of the foam, we consider the elastic-plastic foam. To simulate the elastic behavior of the foam, we use Hook's law and to simulate the plastic foam behavior we use the crushable foam capability available in the ABAQUS software. The foam behavior used is shown in Fig. 1.

The helmet shell, which is usually 2.5 to 5.5 mm thick, is made of thermoplastic materials such as Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) and polycarbonate or composites such as Glass Fiber Reinforced Polyester (GRP) and Kevlar. The strap keeps the head attached to the set while using the helmet. The helmet chin-strap is made of nylon or PET with a density of 700 kg/m^3, and 1000 Mpa elastic modulus and

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

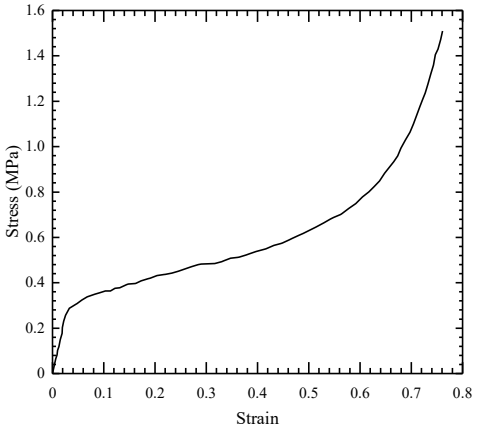


Fig. 1. EPS65 foam stress-strain curve [4]

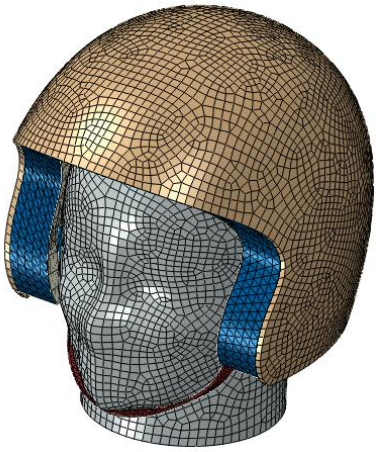


Fig. 2. Finite element helmet set model

Poisson's ratio of 0.2. The chin-strap is intended to prevent head displacement in the helmet, so to simulate the chin-strap as accurately as possible to prevent head movement, before the original model is simulated, a preliminary ABAQUS run pulled the chin-strap ends up through both sides. The shape of this deformed mesh was then imported into the main ABAQUS model.

To simulate the impact mechanics, the penalty algorithm and surface to surface contact is used. The inter-layer contact with the coefficient of friction between the shell and the ground is 0.4, the shell and foam layer is 0.5, and between the head and foam is considered 0.2. To create an integrity of the simulation, between the inner and outer layers of the foam as well as the foam and the comfortable foam, tie constraints have been used.

3- RESULTS

An ABS shell helmet was used to validate the results. This model has been tested in the laboratory under conditions very similar to the finite element model. The acceleration is measured on the head by a connected accelerometer mounted at the center of mass. The collision time in the experimental test is recorded by the accelerometer sensor. The output signal of this sensor is dominated by voltage, which is eventually converted to acceleration-time diagrams based on the transformations. Fig. 3 compares the experimental results with the numerical solution results. By examining the dynamic behavior of the helmet according to Fig. 3, the results of the numerical solution are validated with the real experiment results.

The results show that with increasing shell thickness, the maximum stress on the helmet shell decreases and the linear and rotational acceleration on the head and helmet assembly increases. Also the performance of different materials according to the head injury criteria, for the same thickness (3 mm) is 95, 135 and 150 for Kevlar, ABS, and GPR, respectively.

4- CONCLUSION

In this research, the dynamic behavior of motorcycle helmets was verified using the finite element method with the experimental results to calculate the maximum linear and rotational acceleration applied to the head at the collision moment. The maximum linear acceleration was estimated at

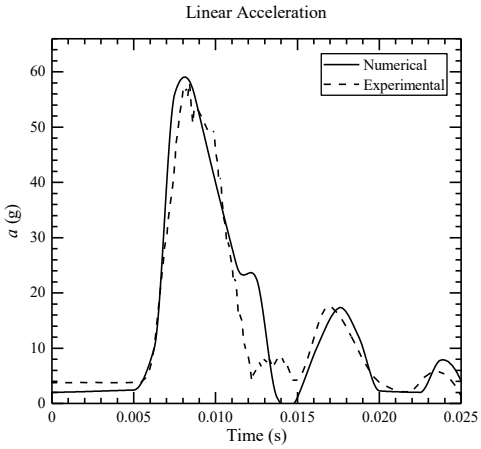


Fig. 3. Experimental and numerical acceleration comparison

70g, which was within the permissible range by calculating and determining the head injury criteria. Also, the maximum angular acceleration of the head was estimated 2.5 krad/s^2. The impact velocity is slightly above 5 m / s to have more reliable results. The results show that the peak head rotational acceleration directly depends on shell thickness at the impact site, impact velocity and the shell material while, it was shown that to be a function of foam material and thickness, the friction coefficient between the shell and road and the head collision direction. Although, in the helmet standards, there is a strong shell to prevent failure, as the research has shown, the thickness of the shell increases the acceleration of the head, leading to damage. Choosing the best thickness from the investigated thicknesses, similar to any case study of the design problem, requires a compromise between different parameters. If the thickness is high, the shell will less tense and protects the head from impact, and if the thickness is low, the acceleration on the head assembly decreases and still retains health. In addition to safety and head protection at collisions, it is important to select the kind of helmet. Therefore, it is best to design the shell thickness by considering the price of different materials, the stress applied to the shell, and the amount of linear and rotational acceleration applied to the head, with a thick shell on impact prone points more than anywhere else, in addition to reducing weight and ease of

use, preventing breakage due to stress on the shell, producing the least linear and rotational acceleration and additionally saving on the cost and consumption of materials.

REFERENCES

[1] M. Peden, R. Scurfield, D. Sleet, D. Mohan, A.A. Hyder, E. Jarawan, C.D. Mathers, World report on road traffic injury prevention, in, World Health Organization Geneva, 2004.

[2] M. Koornstra, J. Broughton, R. Esberger, C. Glansdorp, W. Köppel, F. Taylor, J. Cauzard, A. Evans, L. Hantula, M. Piers, Transport safety performance in the EU: a statistical overview, European Transport Safety Council, Brussels, Belgium, 32 (2003).

[3] N. Mills, A. Gilchrist, The effectiveness of foams in bicycle and motorcycle helmets, Accident Analysis & Prevention, 23(2) (1991) 153-163.

[4] -F.A. Fernandes, R.A. de Sousa, Finite element analysis of helmeted oblique impacts and head injury evaluation with a commercial road helmet, Struct. Eng. Mech, 48(5) (2013) 661-679.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Ghasemzade Moghaddam, S. A. Hashemian, Numerical Investigation of the Effect of Shell Material and Thickness on the Mechanics of Motorcycle Helmets Impact, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(2) (2021) 171-174.

DOI: 10.22060/mej.2020.16512.6379

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ۲، سال ۱۴۰۰، صفحات ۶۸۹ تا ۷۱۰
DOI: 10.22060/mej.2020.16512.6379

بررسی عددی اثر جنس و ضخامت پوسته در مکانیک برخورد کلاه ایمنی موتورسیکلت

مجتبی قاسم‌زاده مقدم، سید علی هاشمیان*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم‌سبزواری، سبزوار، ایران

خلاصه: در تصادفات موتورسیکلت، شتاب وارد بر سر ناشی از برخورد، خطر بسیار زیادی برای سلامتی موتورسوار و سرنشینان دارد. در این پژوهش با استفاده از مدل اجزاء محدود به تحلیل دینامیکی برخورد مجموعه کلاه ایمنی شامل سر، پوسته، فوم، بالشتک و بند پارچه‌ای برای بررسی اثر ضخامت و جنس پوسته بر معیار آسیب سر (اچ‌آی‌سی) پرداخته شده است. کلاه ایمنی از نوع جلوباز با در نظرگرفتن سه جنس رایج انتخاب شد. در بیشتر تصادفات در لحظه برخورد سر با زمین، نحوه قرارگیری سر به‌صورت مایل می‌باشد. در مدل شبیه‌سازی شده این مقاله، در برخورد نیز سر به‌صورت مایل قرار گرفته است. نتایج به‌دست آمده از این تحقیق با نتایج آزمایشات تجربی و مقالات معتبر تایید شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ضخامت بهینه‌ای برای کلاه ایمنی صرف‌نظر از جنس آن وجود دارد. برای تعیین ضخامت بهینه باید مصالحه‌ای بین پارامترهای مختلفی چون معیار آسیب سر، شکست پوسته، وزن و قیمت انجام شود. طبق نتایج به‌دست آمده، در صورتی‌که ضخامت افزایش یابد، وزن کلاه و دامنه تغییرات شتاب وارد بر سر افزایش یافته و همچنین احتمال شکست پوسته کاهش می‌یابد. در صورتی‌که با کاهش ضخامت، علی‌رغم کاهش شتاب وارد بر سر، تنش ایجاد شده در پوسته افزایش یافته و منجر به شکست آن می‌شود

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۲۰
بازنگری: ۱۳۹۸/۱۰/۲۸
پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۱۱/۱۳

کلمات کلیدی:
کلاه ایمنی
روش اجزاء محدود
برخورد مایل
معیار آسیب سر
آزمایش ضربه

۱- مقدمه

تصادفات جاده‌ای از مهم‌ترین دلایل مرگ و میر در جهان است [۱]. با افزایش جمعیت و افزایش استفاده از موتورسیکلت، موضوع سلامتی و ایمنی موتورسواران هنگام تصادف از اهمیت قابل ملاحظه‌ای برخوردار شده است. مطالعات بسیار زیادی بر روی نحوه قرارگیری مجموعه سر هنگام برخورد انجام شده است تا اثر بار اعمال شده به سر بررسی شود. پِدِن و همکاران [۲] و همچنین کرنسترا و همکاران [۳] نشان دادند که خطر آسیب‌دیدگی در تصادفات برای موتورسواران نسبت به سرنشینان خودرو تا ۳۰ برابر بیشتر است، زیرا موتورسواران در مقایسه با سایر استفاده‌کنندگان از وسایل نقلیه از امنیت کمتری برخوردارند. در شکل ۱ بخش‌های مختلف یک کلاه ایمنی رایج که امروزه مورد استفاده قرار می‌گیرد نشان داده شده است. کلاه ایمنی از دو بخش اصلی پوسته خارجی و فوم تشکیل شده است. پوسته، خارجی‌ترین لایه کلاه ایمنی بوده در برابر ضربه اولیه از سایر اجزا محافظت می‌کند. پوسته با پخش ضربه روی ناحیه‌ای بزرگ از کلاه ایمنی، از شکست فوم و نفوذ اشیاء تیز در آن در هنگام برخورد جلوگیری می‌کند. فوم با قابلیت تغییر شکل بزرگ بخش زیادی از انرژی وارد بر سر را جذب نموده و انتقال ضربه به سر به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. سایر بخش‌های کلاه ایمنی عبارتند از بالشتک پارچه‌ای داخلی که جهت ایجاد انطباق کامل سر در کلاه ایمنی بوده و بند که جهت کشش سر و نگهداری آن با مجموعه کلاه ایمنی می‌باشد. صدمات وارد بر سر عمده‌ترین دلیل مرگ و میر در موتورسوارن می‌باشد [۴]. افشاری و رجائی [۵] اهمیت استفاده از کلاه ایمنی را با بررسی برخورد در دو حالت سر بدون کلاه ایمنی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: n@hsu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

Fig. 1. A typical motorcycle helmet [6]

شکل ۱. نوعی کلاه ایمنی موتور سیکلت [۶]

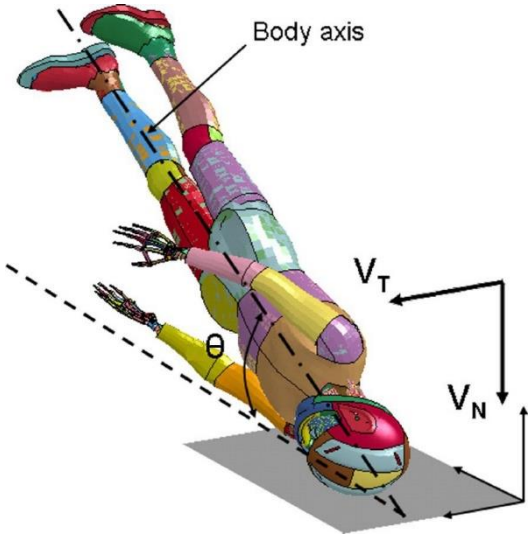


Fig. 2. Simulation of the body at the moment of head collision to the ground in oblique impact [20]

شکل ۲: شبیه‌سازی بدن در لحظه برخورد سر به زمین در برخورد مایل [۲۰]

و همراه با کلاه ایمنی بررسی کردند. آن‌ها نشان دادند که اختلاف زیادی بین دو حالت مذکور وجود دارد، به نحوی که حتی بیشترین تنش وارد بر سر درحالت بدون کلاه ایمنی بیش از ۴ برابر حالت بدون کلاه می‌باشد. اما به دلیل محدودیت در حافظه محاسباتی کامپیوتری مدل آن‌ها شامل شکل ساده‌ای از مغز با تعداد المان متوسط بود.

میلز و گیل‌کریست [۷] نشان دادند که برخوردهای مایل (شکل ۲) رایج‌ترین نوع برخورد در تصادفات در جهان است که عامل به وجود آمدن شتاب خطی و دورانی می‌شود. در صورت تجاوز مقدار شتاب دورانی از $10\frac{krad}{s^2}$ احتمال این‌که آسیب منجر به مرگ شود افزایش می‌یابد [۱۰-۸]. طبق آمار ارائه شده توسط بوردت و همکاران [۱۱] شتاب دورانی عامل اصلی ۶۰ درصد از صدمات جدی به ناحیه سر و همچنین شتاب خطی عامل بیش از ۳۰ درصد صدمات سر شناخته می‌شود. همچنین طبق آمار در اروپا در بیش از ۵۷ درصد تصادفات در هنگام برخورد، زاویه سر با زمین کمتر از 30 درجه بوده است. تمام این نکات بر اهمیت بسیار زیاد بررسی برخورد مایل و آسیب‌های وارد بر سر تاکید دارند.

صلای نادری و همکاران [۱۲] به کمک آزمایش ضربه روشی دقیق برای تعیین مقادیر مقاومت‌های سری و موازی در مدل

مشروح ترانسفورماتور ارائه دادند. به غیر از روش‌های آزمایشگاهی در تحقیقات، از روش‌های عددی نیز برای بررسی برخورد و معیار آسیب استفاده شده است. مدل‌سازی کلاه ایمنی با روش‌های عددی در دو دهه گذشته پیشرفت زیادی داشته است. در سال ۱۹۹۴ گیل‌کریست و میلز [۱۳] مدل یک‌بعدی کلاه ایمنی شامل ۴ جرم، فنر و میراکننده را جهت محاسبه ثوابت فنر توسعه دادند. این روش به‌خاطر داشتن محدودیت‌هایی امروزه منسوخ شده است و به‌جای آن از روش اجزاء محدود استفاده می‌شود. خلیلی و محمدپناه [۱۴] برای اولین بار تاثیر تنش‌های اولیه بر پاسخ صفحات بزرگ کامپوزیت الیافی در برابر ضربه عرضی سرعت کم را به کمک تحلیل دینامیکی با روش تحلیلی بررسی کردند. روش اجزاء محدود توانایی در نظر گرفتن پدیده‌های مکانیکی مختلف از جمله رفتار غیرخطی مواد، تغییرشکل‌های بزرگ و تماس را دارد. صادق‌نیا و همکاران [۱۵] با بررسی عددی و تجربی برخورد با سرعت کم پنل‌های ساندویچی با پوسته کامپوزیتی، دقت بسیار خوب مدل المان محدود برای بررسی آسیب محلی در مدل را نشان دادند.

در سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۳ در هلند یک پروژه برای بهتر کردن طراحی کلاه ایمنی تعریف و اجرا شد. موضوع پیشنهاد شده در این پروژه بهبود مشخصات برای طراحی یک کلاه و فرموله کردن راهنماها برای سرهای مصنوعی مورد استفاده که در تست سر و همچنین بهبود روند تست، در جهت بدست آوردن اطلاعات قابل اعتماد در مورد ظرفیت محافظتی کلاه‌ها بود [۱۶]. در سال ۲۰۰۷ آیلو و همکاران [۱۷] از یک نمونه مدل کلاه ایمنی موجود در صنعت برای شبیه‌سازی استفاده کردند. اما آن‌ها در شبیه‌سازی بر حساسیت اندازه المان و نوع المان تحلیلی نداشتند. این مشکل در سال ۲۰۰۸ توسط سرنیکی و همکاران [۱۸] برطرف شد. اردهارد و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۵ به مطالعه بر روی تاثیر نوع کلاه ایمنی موتورسیکلت در هنگام برخورد و احتمال آسیب در سر براساس مشاهدات تجربی پرداختند.

طبق معیار آسیب سر[1]، شتاب دورانی ناشی از برخورد در سر اندازه‌گیری نمی‌شود [۲۱ و ۲۲] و به محاسبه شتاب خطی برای تعیین محدوده سلامتی کفایت می‌کنند. این درحالی است که تاثیر شتاب دورانی در آسیب‌های سر از نظر علمی کاملاً پذیرفته شده است [۲۳]. و طبیعتاً با در نظر گرفتن شتاب دورانی در معیار سلامتی کلاه ایمنی این استاندارد مطمئن‌تر و کاربردی‌تر خواهد شد [۲۴ و ۲۵]. تینارد و همکاران [۲۶] برای بهبود شرایط، استانداردهای موجود شتاب دورانی را نیز بررسی کردند و آن را گسترش دادند. آن‌ها نشان دادند که به دلیل این‌که در استانداردهای کلاه ایمنی شتاب دورانی نقشی ندارد، احتمال آسیب رسیدن به سر حتی برای کلاه ایمنی تأیید شده با استانداردهای موجود، وجود دارد. آره و همکاران [۲۷] بر اهمیت سینماتیک دورانی تاکید کردند. همچنین نتایج آن‌ها بر تطابق رفتار کرنش بافت‌های مغزی با بیشترین سرعت دورانی استوار می‌باشد. دی‌مارکو و همکاران [۲۸] با در نظرگرفتن تعدادی از کلاه ایمنی‌های موجود، اثر تغییرات ضخامت و جنس فوم را بررسی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان می‌دهد عدم وجود ضخامت یکنواخت برای فوم تاثیر بسیار زیادی بر کاهش شتاب وارد بر سر دارد. در زمینه بهینه‌سازی ساختاری، تقی‌پور و نوری [۲۹] با بررسی و بهینه‌سازی ساختار هندسی تیر تحت بارگذاری عرضی، نشان دادند که امکان افزایش جذب انرژی از ۴۵ درصد تا ۹۴ درصد وجود دارد. شعیب و همکاران [۳۰] با استفاده از اصول جذب انرژی فوم، برای حفظ سلامتی سر، الگوریتمی ارائه کردند که کمترین مقدار ضخامت مورد نیاز فوم براساس جنس مشخص ارائه می‌دهد. تقی‌پور و نوری [۳۱] با بررسی پاسخ تیرهای ساندویچی با هسته صفحات فلزی گسترده، تحت بارگذاری ضربه‌ای نشان دادند که با افزایش ضخامت لایه‌ها تا ۳ برابر، جذب انرژی ۳۳ درصد تا ۶۱ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر اهمیت سلامتی و حفاظت از سر، باید به راحتی و تناسب کلاه هنگام استفاده نیز دقت شود. لیو و چن [۳۲] به بررسی اثر وجود شیارهای تهویه هوا در کلاه ایمنی پرداختند، چرا که در آب و هوای گرم تمایل برای استفاده از کلاه ایمنی کاهش می‌یابد. نتایج آن‌ها نشان داد که کلاه ایمنی جلوباز نسبت به کلاه ایمنی تمام-پوشیده[2] و کلاه ایمنی نیم-پوشیده[3] نتایج بهتری به نسبت وزن کمتر (در مقایسه با تمام-پوشیده) و استحکام بیشتر (در مقایسه با نیم-پوشیده) دارد.

در تحقیق حاضر اثر جنس و ضخامت پوسته و سرعت برخورد بر شتاب خطی و دورانی، بر روی کلاه ایمنی جلوباز[4] با استفاده از روش المان محدود با در نظر گرفتن پوسته در سه حالت شامل دو

1 Head Injury Criteria

2 Full-Face
3 Half-Face
4 Open-Face Helmet

جدول ۱. جرم و لختی دورانی اصلی سر

Table 1. Headform mass and principal inertial moments

جرم(kg)	I_{xx}(kg.m^2)	I_{yy}(kg.m^2)	I_{zz}(kg.m^2)
4/5	0/0370	0/0440	0/0300

Fig. 3. Tested and simulated head comparison

شکل ۳: مقایسه سر واقعی و شبیه‌سازی شده

جنس مرکب (کامپوزیت) و یک ماده ترموپلاستیک برای کلاه ایمنی جلوباز بررسی می‌شود. استفاده از مواد مرکب به دلیل توانایی بالا برای جذب انرژی نسبت به سایر مواد، از بسیاری از ضعف‌های مواد سنتی مانند شکست می‌کاهد. علاوه بر این، مواد مرکب دارای استحکام و سختی بسیار بیشتری نسبت به رزین‌های ترموپلاستیک می‌باشند [۳۳]. نتایج حل عددی با نتایج آزمایشگاهی و همچنین مقالات معتبر صحت‌سنجی می‌شوند. با بررسی نقش ضخامت پوسته در کلاه ایمنی و تأثیر آن در معیار آسیب و همچنین بهینه سازی ضخامت، نه تنها کلاه ایمنی در هنگام تصادف از سر نقش حفاظتی را کاملاً ایفا می‌کند، بلکه امکان صرفه‌جویی در مواد، کاهش وزن ناشی از ضخامت اضافی و در نتیجه راحتی در هنگام استفاده نیز به‌طور کامل میسر می‌شود.

با توجه به این‌که فوم به‌عنوان فنر بدون جرم، غیرخطی عمل می‌کند و همچنین در شرایط مسئله فرض تغییر شکل های بسیار کوچک صحیح نمی‌باشد [۳۴] در تحلیل عددی مکانیزم برخورد از حل‌گر دینامیکی صریح[1] نرم‌افزار آباکوس[2] استفاده خواهد شد. در بخش ۲ به رویه انتخاب و شبیه‌سازی جنس و هندسه کلیه اجزاء کلاه ایمنی پرداخته خواهد شد. بخش ۳ به تشریح شرایط و نحوه انجام آزمایش تجربی و مقایسه نتایج حل عددی با نتایج تجربی اختصاص دارد. در انتها با بررسی عوامل تاثیر گذار در پاسخ سر به برخورد مایل و بررسی معیار آسیب سر در بخش ۴ به بحث و نتیجه‌گیری برای انتخاب جنس و ضخامت پرداخته شده است.

۲- شبیه‌سازی المان محدود

در این تحقیق، برای شبیه‌سازی برخورد کلاه ایمنی موتورسیکلت استفاده از حلگر صریح استفاده شده است زیرا اعمال بار به مجموعه کلاه ایمنی و سر در مدت زمانی بسیار کوتاه اتفاق می‌افتد و حلگر صریح نیز در حوزه شبیه سازی فرآیندهای لحظه‌ای مانند ضربه و انفجار موثر است.

1 Explicit Dynamics
2 ABAQUS CAE

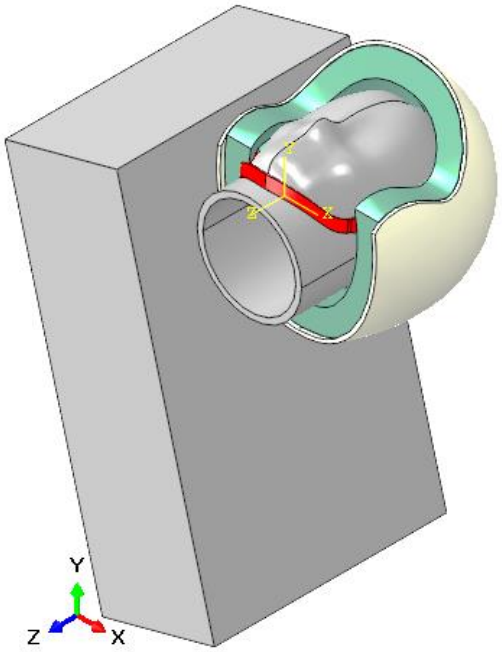


Fig. 4. Simulated helmet model in ABAQUS software

شکل ۴: هندسه کلاه ایمنی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس

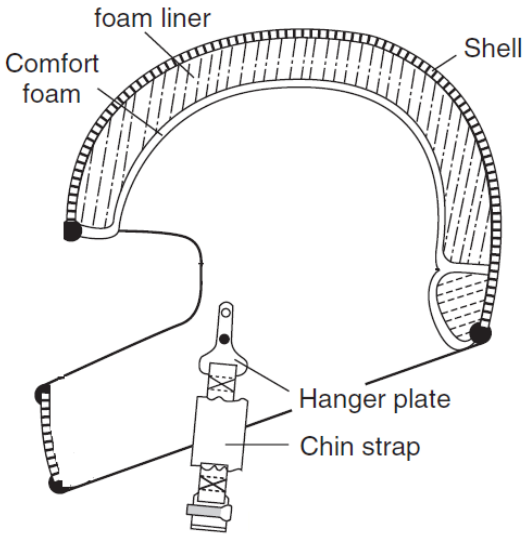


Fig. 5. Helmet layers [35]

شکل ۵: لایه‌های مختلف کلاه ایمنی [۳۵]

۱-۲- هندسه مجموعه کلاه ایمنی و سر

نقش مهم تماس بین لایه‌ها و اصطکاک آن‌ها که نیروی مماسی ایجاد می‌کند، ضخامت لایه‌ها، هندسه پیچیده کلاه ایمنی، وجود تغییر شکل‌های بزرگ و همچنین رفتار غیرخطی و مستقل از نرخ کرنش فوم از دلایل استفاده از المان محدود برای به دست آوردن شتاب مرکز جرم مجموعه می‌باشد. در این شبیه‌سازی سر به‌صورت جسم صلب در نظر گرفته شده و مشخصات آن در جدول ۱ آمده است.

جدول ۲: خواص مکانیکی فوم ای‌پی‌اِس۶۵ [۲۷]

Table 2. Mechanical properties of EPS65 foam [27]

σ_{c0}(MPa)	p_t/p_{c0}	σ_{c0}/p_{c0}
0/31	300	1/5

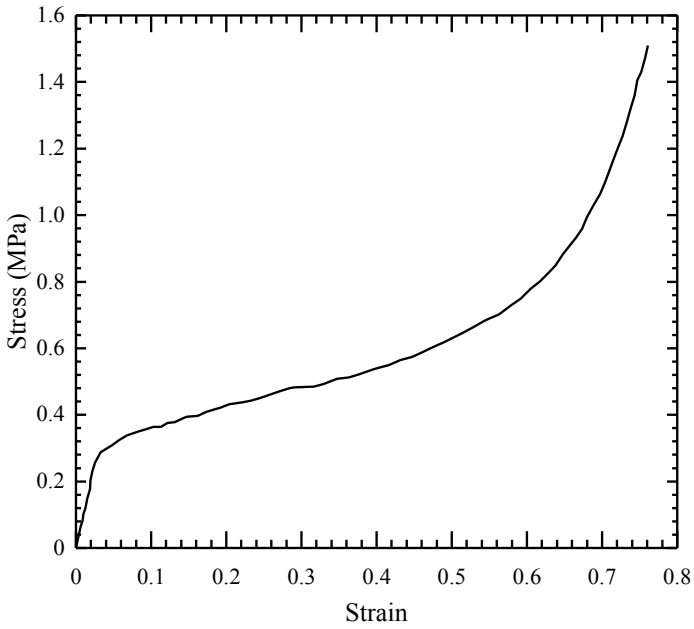


Fig. 6. EPS65 foam stress-strain curve [36]

شکل ۶: منحنی تنش-کرنش فوم ای‌پی‌اس ۶۵ [۳۶]

نمونه کلاه ایمنی خریداری شده، با استفاده تکنولوژی لیزر اسکن اندازه‌برداری شده و به کمک نرم‌افزار سالیدروکس[1] طراحی شده است. مقایسه نمونه سر واقعی با سر شبیه‌سازی شده در شکل ۳ آمده است.

مدل طراحی شده کامل که شامل مجموعه کلاه ایمنی و سکوی برخورد می‌باشد، در شکل ۴ نشان داده شده است. این مدل شامل تمامی بخش‌های یک کلاه ایمنی از جمله: پوسته، فوم، بالشتک‌های داخلی، بند پارچه‌ای و اتصالات بند پارچه‌ای به کلاه می‌باشد.

در شکل ۴ نمای مایل از مدل کامل مجموعه سر و کلاه ایمنی نشان داده شده است. بند از ناحیه خالی فوم به پوسته متصل شده است. به دلیل ضخامت بسیار کم بالشتک داخلی، امکان مشاهده آن در شکل ۴ وجود ندارد. در شکل ۵ ترتیب قرارگیری لایه‌ها (پوسته خارجی، فوم و بالشتک داخلی) و محل اتصال بند به کلاه ایمنی نشان داده شده است.

۲-۲- خواص مکانیکی مواد

۲-۲-۱- فوم

فوم ای.پی.اِس[2] یک ماده سلولی مصنوعی با سلول‌های بسته است که به‌طور گسترده در کاربردهای جذب انرژی به عنوان ابزار محافظتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به همین دلیل و همچنین هزینه کم آن، رایج‌ترین فوم مورد استفاده در کلاه ایمنی موتور سیکلت است. ای.پی.اِس از طریق توانایی خود برای ایجاد تغییر شکل دائمی، انرژی را جذب می‌کند.

رفتار فوم ای.پی.اِس تحت فشار یک طرفه در شکل ۶ دیده می‌شود. جهت شبیه‌سازی رفتار فوم، فوم از جنس الاستو-پلاستیک[3] در نظر می‌گیریم. برای شبیه‌سازی رفتار الاستیک (کشسان) فوم از قانون هوک طبق رابطه (۱) استفاده می‌شود که σ تنش، E مدول یانگ و ε کرنش مهندسی می‌باشد.

1 SolidWorks Software

2 Expanded Polystyrene

3 Elastic-Plastic

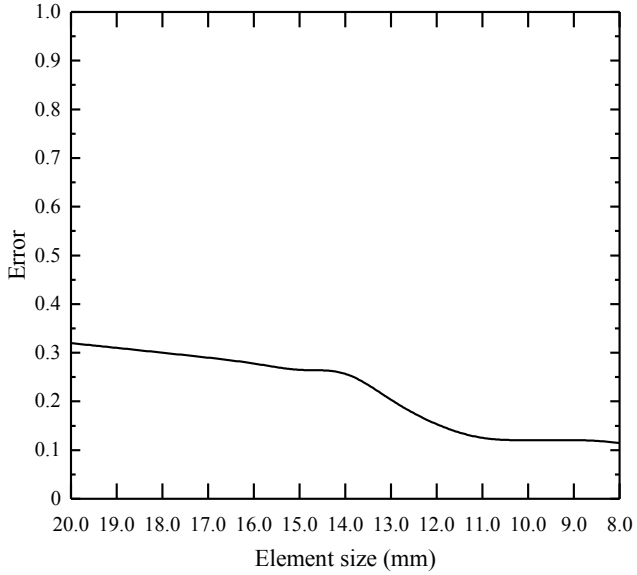


Fig. 7. Error results based on average element size

شکل ۷: بررسی خطای نتایج براساس متوسط اندازه المان‌ها

$$\sigma = E\,\varepsilon \qquad (۱)$$

همچنین برای شبیه‌سازی رفتار پلاستیک فوم نیز از قابلیت فوم فشرده[1] موجود در نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌کنیم. در این مدل‌سازی، ترم تنش هیدرواستاتیک در تابع تسلیم برای محاسبه تغییرات حجمی فوم در نظر گرفته شده است. از این‌رو، مدل‌سازی سخت‌شوندگی فوم، براساس کرنش حجمی و نامتغیر با دما می‌باشد. معادلات پلاستیسیته فوم با سخت‌شوندگی حجمی در پیوست آمده است. فوم برای تعریف فوم فشرده علاوه بر مشخصات ذکر شده در جدول ۴ به نسبت تنش تسلیم فشاری (σ_{c0})، نسبت فشار تسلیم ابتدایی در کشش هیدرواستاتیک (p_t / p_{c0}) و نسبت فشار تسلیم ابتدایی در حالت تراکم هیدرواستاتیک (σ_{c0} / p_{c0}) نیاز داریم که در جدول ۲ آمده است. رفتار مدل فوم فشرده براساس پاسخ بارگذاری فشاری یک-محوره فوم پلیمری سلول-بسته چگالی پایین، طبق رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$\sigma_c = \sigma_{c0} + \frac{P_0 \varepsilon}{1 - \varepsilon - R} \qquad (۲)$$

که در آن σ_c تنش فشاری مهندسی، ε کرنش مهندسی، P_0 فشار گاز مؤثر در سلول و R چگالی نسبی فوم (نسبت چگالی فوم به چگالی پلیمر جامد) می‌باشد.

نمودار شکل ۶ دارای ۳ ناحیه متفاوت می‌باشد. ناحیه اول به رفتار الاستیک خطی که از خمش در سلول‌ها ایجاد می‌شود مربوط شده و در ناحیه دوم که اغلب با نام ناحیه فلات استرس[2] شناخته می‌شود، افزایش کرنش داریم که تقریبا در تنش ثابت صورت می‌پذیرد. ناحیه سوم متناظر با افزایش دانسیته[3] فوم بوده و تنش مرتبا افزایش یافته و فوم قابلیت ذخیره انرژی بیشتر را از دست می‌دهد.

در طراحی‌های اخیر فوم تنها در محل اصابت ضربه می‌شکند و در سایر نقاط آسیب جدی نمی‌بینند، واضح است که مقدار از بین رفتن فوم وابستگی کاملی به سرعت برخورد دارد. همانطور که قبلاً ذکر شد نقش اساسی فوم در جذب انرژی کرنشی و کاهش شتاب‌های خطی و دورانی وارد بر سر می‌باشد. با افزایش مقدار ضخامت فوم شاهد بهبود عملکرد آن هستیم اما محدودیتی که در برابر افزایش ضخامت فوم وجود دارد، محدودیت فیزیکی بخاطر مقاومت هوا در برابر حرکت و در نتیجه خستگی عضلات گردن در هنگام حرکت با سرعت زیاد می‌باشد.

۲-۲-۲- پوسته

1 Crushable Foam

2 Stress Plateau
3 Densification

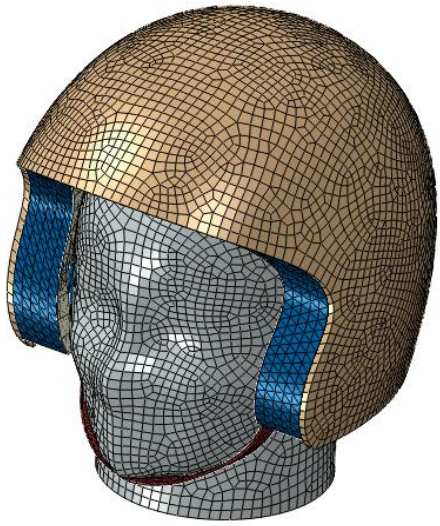


Fig. 8. Finite element helmet set model

شکل ۸: مدل المان‌بندی شده مجموعه سر و کلاه ایمنی

جدول ۳: المان‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی

Table 3. Type of elements used for simulation

جنس	المان	تعداد المان	رفتار	تعداد گره
پوسته	S۳R-S۴R	9045	انعطاف‌پذیر	8913
فوم	C۳D۴	63921	انعطاف‌پذیر	13093
بالشتک پارچه‌ای	S۳R-S۴R	2739	انعطاف‌پذیر	2775
بند	C۳D۴	1117	انعطاف‌پذیر	2608
سر	R۳D۴	4595	صلب	4543
سکوی برخورد	R۳D۴	320	صلب	322

جدول ۴: خواص مواد مختلف شبیه‌سازی [۶، ۳۳، ۴۱]

Table 4. Properties of simulation materials [6, 33, 41]

	لایه خارجی (پوسته)			لایه داخلی (فوم)
خواص مواد	اِی.بی.اِس	جی.آر.پی	کولار	ای.پی.اِس
چگالی (kg/m^3)	1400	2000	1650	65
مدول الاستیسیته 1 (GPa)	4	19/7	32/4	0/00751
مدول الاستیسیته 2 (GPa)		19/7	32/4	
مدول الاستیسیته 3 (GPa)		9/5	9/5	
ضریب پواسون 12	0/37	0/1	0/0484	0
ضریب پواسون 13		0/25	0/3	
ضریب پواسون 23		0/25	0/3	
مدول برشی 12 (GPa)		3/1	1/8	
مدول برشی 13 (GPa)		2/5	1/35	
مدول برشی 23 (GPa)		2/5	1/35	
تنش تسلیم (Mpa)				31

جنس پوسته کلاه ایمنی که معمولا ضخامتی بین ۲/۵ تا ۵/۵ میلی‌متر دارد، از مواد ترموپلاستیک مانند اِی.بی.اِس[1] و پلی‌کربنات و یا کامپوزیت مانند جی.آر.پی[2] و کِولار[3] می‌باشد. پوسته‌های ساخته شده از مواد کامپوزیت عموماً قیمت بیشتری در مقایسه با پوسته‌های ترموپلاستیک دارند و در کلاه ایمنی‌های پیشرفته، مانند کلاه ایمنی مسابقات موتورسواری استفاده می‌شوند. رایج‌ترین مواد مورد استفاده در تولید پوسته کلاه ایمنی جی.آر.پی و اِی.بی.اِس و کِولار می‌باشند. بررسی رفتار جی.آر.پی نشان می‌دهد که خواص مکانیکی آن وابسته به رویه تولید آن می‌باشد. مزیت اصلی کِولار نسبت به اِی.بی.اِس استحکام بیشتر به همراه وزن کمتر می‌باشد، البته قیمت آن در برابر اِی.بی.اِس بیشتر بوده که انتخاب جنس پوسته را دشوار می‌کند.

از آنجایی‌که عامل اصطکاک پوسته تنها برای بررسی تحلیل برخورد کافی نیست [۲۱]، در این تحقیق تغییر جنس و ضخامت پوسته نیز بررسی می‌شود. برای شبیه‌سازی مکانیزم برخورد از پوسته با جنس‌های جی.آر.پی، کِولار و اِی.بی.اِس با ضخامت‌هایی در محدوده ۲ تا ۵/۵ میلی‌متر استفاده شده است. در جدول ۴ مشخصات مکانیکی پوسته‌های مختلف ذکر شده آمده است.

۳-۲-۲- بند پارچه‌ای

بند، در طول مدت استفاده از کلاه ایمنی سر را متصل به مجموعه نگه‌می‌دارد. بند کلاه ایمنی از جنس نایلون و یا پِت[4] با چگالی kg/m^3 ۷۰۰ و مدول الاستیسته Mpa ۱۰۰۰ و نسبت پواسون ۰/۲ می‌باشد. از آنجایی‌که پوسته در فاصله شعاعی زیادی نسبت به مرکز جرم سر قرار می‌گیرد، لختی دورانی کلاه ایمنی تمام-صورت دو برابر لختی دورانی سر می‌باشد [۳۷] و این احتمال خارج شدن کلاه ایمنی از سر در هنگام تصادف را درصورتی‌که بند کاملاً کشیده شده نباشد، افزایش می‌دهد. وظیفه بند جلوگیری از جابجایی سر در کلاه ایمنی می‌باشد، از این‌رو برای شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر بند به نحوی که در حین برخورد در کشش باشد تا از حرکت سر جلوگیری شود، پیش از شبیه‌سازی مدل اصلی، بند به تنهایی از هر دو طرف متصل به کنار کلاه کشیده شده و مدل تغییر شکل یافته آن به مدل شبیه‌سازی اصلی وارد می‌شود.

۴-۲-۲- بالشتک داخلی

بالشتک داخلی عموماً از فوم‌های نرم و انعطاف‌پذیر با چگالی کم تشکیل می‌شود. بالشتک داخلی با فراهم کردن تناسب قرارگیری سر در کلاه راحتی استفاده از کلاه ایمنی را فراهم می‌کند. چانگ و همکاران [۳۸] تاثیر آسیب وارد بر سر را در صورت وجود تناسب بین سر و کلاه ایمنی با بالشتک داخلی نشان دادند. به عنوان نتیجه‌ای از فوم‌های چگالی پایین، تحقیقات [۱۸ و ۳۹] نشان داد که بالشتک داخلی سهم بسیار کمی از انرژی جذب شده دارد، و بنابراین تأثیری در کاهش آسیب وارد بر سر ندارد. علاوه بر این طبق نتایج پینوجی و همکاران [۴۰] بالشتک داخلی برای جذب انرژی بسیار نازک است و تنها برای ایجاد انطباق بین سر و کلاه ایمنی استفاده می‌شود و تأثیری در پاسخ مجموعه سر هنگام برخورد ندارد. اگرچه در این تحقیق بالشتک پارچه‌ای بین لایه‌های کلاه ایمنی شبیه‌سازی شده است، اما می‌توان از شبیه‌سازی آن به دلیل کاهش حجم محاسبات صرف نظر کرد.

۳-۲- مدل اجزاء محدود

در شبیه‌سازی المان محدود ابتدایی، مجموعه با المان‌هایی به اندازه ۱۲ و ۱۵ میلی‌متر دانه‌بندی شده و سپس با اندازه ۸ و ۱۰ میلی‌متر به همگرایی می‌رسد. در شکل ۷ بررسی همگرایی مش نمایش داده شده است. در هر مرحله با کاهش اندازه المان مقدار خطا در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی کاهش یافته و مدت زمان اجرای حل افزایش می‌یابد. در نهایت مقدار ۱۰-۸ میلی‌متر برای متوسط اندازه هر المان برای ادامه حل انتخاب می‌شود.

در شکل ۸ مدل المان‌بندی شده از مجموعه سر و کلاه ایمنی نمایش داده شده است. با توجه به تعداد زیاد المان‌ها جهت کاهش زمان محاسبات در کنار دقت بالا، مجموعه کلاه ایمنی در فاصله بسیار کم با سکوی برخورد در مدل قرار داده شده است. ضمناً هر بخش (عضو) با توجه به ماهیت کاربردی آن در مسئله با نوع المان خاص خود که در جدول ۳ آمده است، مش‌بندی شده است. لازم به ذکر است که سر با نوع المان صلب مدل شده است.

در جدول ۴ خواص مواد مختلف شبیه‌سازی برای پوسته خارجی و فوم آمده است.

۴-۲- پارامترهای حل

در تعریف مکانیزم برخورد از الگوریتم پنالتی[5] و تماس از

1 Acrylonitrile Butadiene Styrene
2 Glass Fiber Reinforced Polyester Resin
3 Kevlar
4 Polyethylene Terephthalate
5 Penalty Algorithm

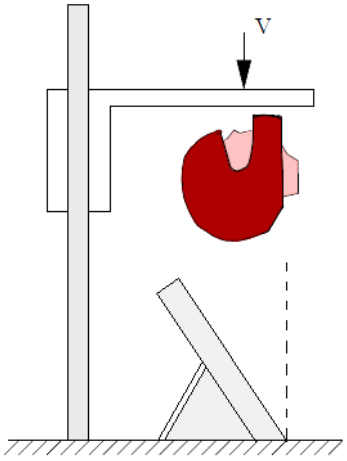


Fig. 9. Schematic of oblique impact

شکل ۹: شماتیک برخورد مایل

نوع صفحه به صفحه[1] استفاده شده است. تماس بین لایه‌ها با ضریب اصطکاک بین پوسته و زمین ۰/۴، پوسته و لایه فوم ۰/۵ و بین سر و فوم مقدار ۰/۲ در نظر گرفته شده است. بین لایه‌های داخلی پوسته و خارجی فوم و همچنین فوم و پارچه نگهدارنده از قید چسب[2] برای ایجاد یکپارچگی و بهم پیوستگی مجموعه استفاده شده است. تطابق بسیارخوب سر با لایه پارچه و همچنین فوم، اصطکاک کافی بین آن‌ها و همچنین لختی دورانی بالای کلاه ایمنی از عواملی هستند که از لغزش در این لایه جلوگیری می‌کنند.

از آنجایی‌که مقایسه سرعت برخورد سر به سکو در دو حالت که در محدوده سرعت استاندارد قرار می‌گیرند مطلوب است، براساس ارتفاع معادل ۱ و ۲ متر طبق رابطه (۳) سرعت در دو حالت مذکور برابر ۴/۴۲۸ متر بر ثانیه و ۶/۲۶۳ متر بر ثانیه به‌دست می‌آید. زاویه برخورد سر برابر 1515 درجه نسبت به محور قائم لحاظ شده است (شکل ۹). همچنین در شبیه‌سازی اثر جاذبه زمین در نظر گرفته شده است. حلگر دینامکی صریح با مدت زمان شبیه‌سازی ۰/۰۲ ثانیه با در نظرگیری تغییر شکل های بزرگ استفاده می‌شود.

$$v = \sqrt{2gh} \qquad (۳)$$

در شکل ۹ شماتیکی از نحوه انجام برخورد مایل در شبیه‌سازی اجزاء محدود نشان داده شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحه‌گذاری نتایج

برای صحه‌گذاری نتایج از یک کلاه ایمنی با جنس پوسته اِی. بی.اِس استفاده شده است. نمونه کلاه مورد استفاده، مدل برش خورده برای اندازه گیری ضخامت پوسته و فوم، و مدل کامل همراه با سر و شتاب‌سنج در شکل ۱۰ نشان داده شده است. کلاه ایمنی در آزمایشگاه، تحت شرایطی کاملاً مشابه با مدل اجزاء محدود مورد آزمایش قرار گرفته است.

کلاه ایمنی از ارتفاع ۲ متر با سرعت ۶/۲۶۳ متر بر ثانیه روی سطح شیبداری که با محور قائم زاویه 15 درجه می‌سازد سقوط آزاد انجام می‌دهد (شکل ۱۱). اندازه‌گیری شتاب وارد بر سر توسط شتاب‌سنج متصل که در مرکز جرم سر کار گذاشته شده صورت می‌گیرد. زمان برخورد در آزمایش تجربی توسط سنسور شتاب‌سنج ثبت می‌شود. سیگنال خروجی این سنسور در غالب ولتاژ می‌باشد که در نهایت بر اساس تبدیلات مربوطه به نمودار شتاب-زمان تبدیل می‌شود.

در شکل ۱۲ مقایسه نتایج آزمایش تجربی با نتایج حل عددی آمده است. با بررسی رفتار دینامیکی کلاه ایمنی با توجه به شکل ۱۲ تطابق بسیار زیاد نتایج حل عددی با آزمایش واقعی مشخص می‌شود. واضح است که مقدار اندازه شتاب خطی و دورانی در لحظه برخورد شدیداً افزایش یافته و بلافاصله کاهش می‌یابد. مقدار بسیار کمی اختلاف بین نتایج حل عددی و نتایج آزمایشگاه وجود دارد که می‌تواند به دلیل عدم تعریف کاملاً دقیق از جنس

1 Surface to Surface
2 Tie Constraint

(a) (b)

Fig. 10. Tested helmet set (a) Helmet and cut model (b) Full model with head and accelerometer

شکل ۱۰: کلاه ایمنی مورد آزمایش (a) نمونه کلاه و مدل برش خورده (b) نمونه کامل همراه با سر و شتاب‌سنج

Fig. 11. Test setup and collision anvil

شکل ۱۱: تجهیزات و سکوی برخورد آزمایشگاه

و ضرایب اصطکاک بین لایه‌ها و یا محل قرارگیری شتاب‌سنج در سر باشد.

شتاب خطی و دورانی وارد بر سر تحتs شرایط مختلف از جمله تغییر شرایط برخورد، جنس و ضخامت لایه‌ها تغییر می‌کنند. برای بررسی نحوه تغییرات و تاثیر عوامل ذکر شده با توجه به آن‌که نتایج حل عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک هستند با ایجاد تغییر در پارامترهای مسئله اثر تغییرات ضخامت، جنس و سرعت بررسی می‌شود.

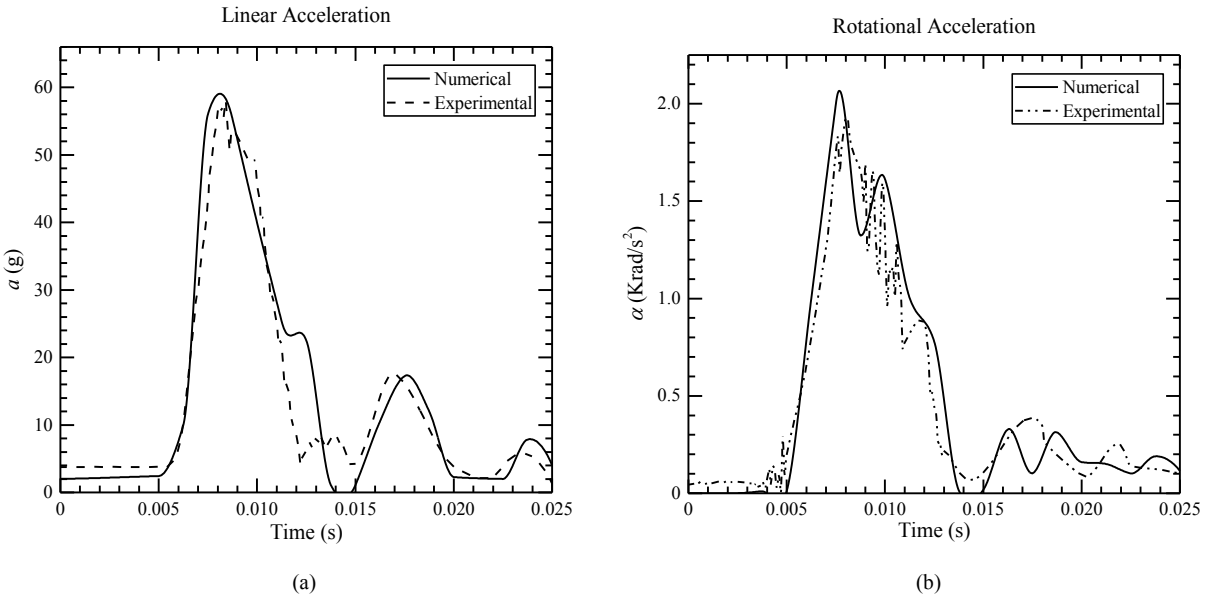


Fig. 12. Experimental and numerical acceleration comparison (a) linear acceleration (b) rotational acceleration

شکل ۱۲: مقایسه نتایج شتاب آزمایش تجربی و حل عددی (a) شتاب خطی (b) شتاب زاویه‌ای

جدول ۵: جرم پوسته برای ضخامت و جنس مختلف (گرم)

Table 5. Shell mass for different materials and thicknesses (gr)

ضخامت (mm)	اِی.بی.اِس	کِولار	جی.آر.پی
2	596	709	596
3	900	1070	1290
5	1670	1970	2250

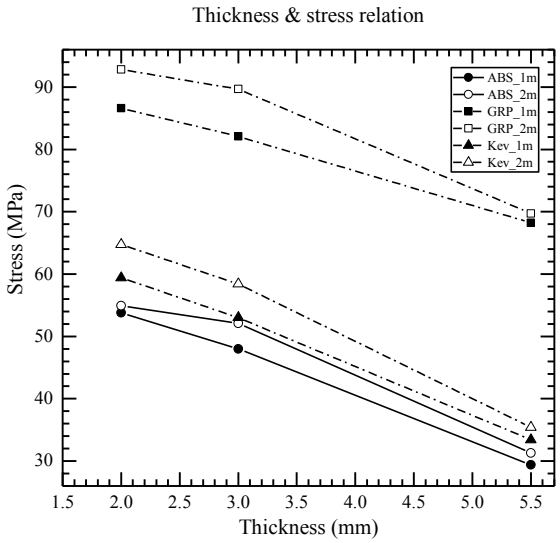


Fig. 13. Maximum stress variation with thickness for common shell materials from 1 and 2 meter height

شکل ۱۳: تغییرات بیشترین تنش پوسته با تغییرات ضخامت برای پوسته‌های مختلف از ارتفاع ۱ و ۲ متر

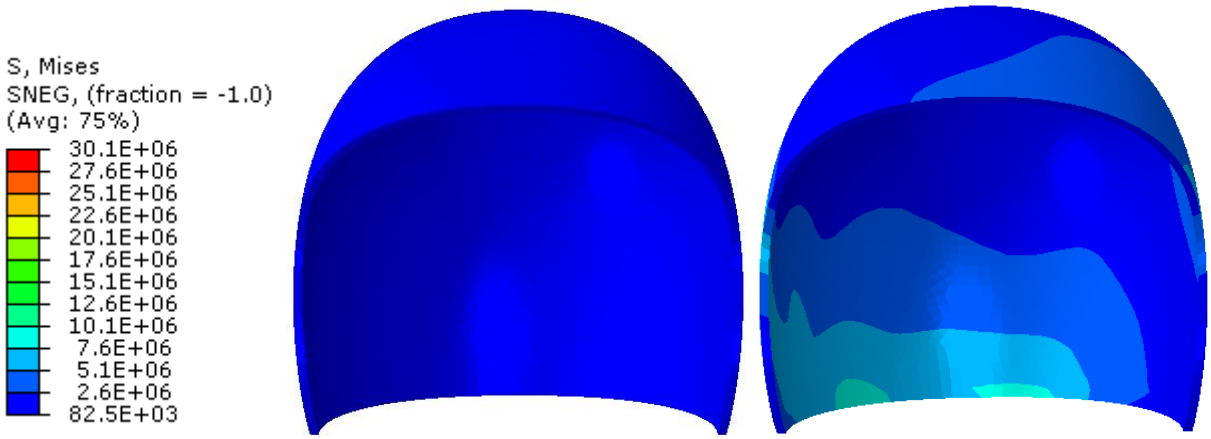
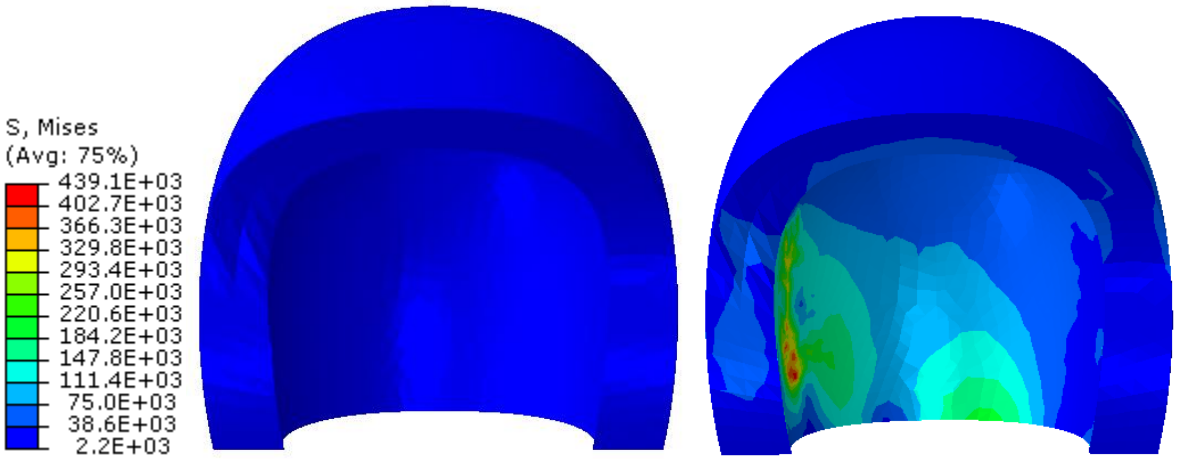


Fig. 14. Stress on outer shell before and after impact comparison

شکل ۱۴: مقایسه تنش در پوسته خارجی قبل و بعد از برخورد



شکل ۱۵: مقایسه تنش در فوم قبل و بعد از برخورد

Fig. 15. Foam stress before and after impact comparison

۲-۳- نتایج تغییرات ضخامت بر بیشترین تنش وارد بر پوسته

با تغییر ضخامت پوسته، وزن کلاه ایمنی تغییر می‌کند. طبق استاندارد ECE۲۲.۰۵ سال ۲۰۰۰ که بیشترین مقدار وزن کلاه ایمنی به همراه سر را ۶ کیلوگرم تعیین می‌کند، با توجه به وزن سایر اجزا میتوان وزن پوسته و سپس باتوجه به چگالی، ضخامت را تعیین کرد. وزن پوسته برای حالت‌های بررسی شده در این مقاله در جدول ۵ آمده است.

در اینجا لازم است اشاره شود وزن کلاه ایمنی پارامتر تأثیر گذار بر روند طراحی می‌باشد، چرا که نه تنها وزن بیشتر از مقدار استاندارد باعث ایجاد خستگی در عضلات گردن شده و عدم استفاده از کلاه ایمنی را در پی دارد، بلکه نتایج افزایش ضخامت به افزایش شتاب وارد بر سر منجر می‌شود. بنابراین در اولین نگاه با توجه به وزن پوسته با ضخامت ۵/۵ میلی‌متر طراحی این ضخامت رد می‌شود (سبک‌ترین پوسته با ضخامت ۵/۵ میلی‌متر ۱۶۷۰ گرم وزن دارد که بدون در نظر گرفتن وزن فوم و بند و تنها با وزن سر به میزان ۶/۰۵۰ کیلوگرم می‌رسد). و این درحالی است که با توجه به شکل ۱۳ که توزیع تنش در برابر ضخامت را نشان می‌دهد، بهترین عملکرد را ضخامت ۵/۵ میلی‌متر دارد.

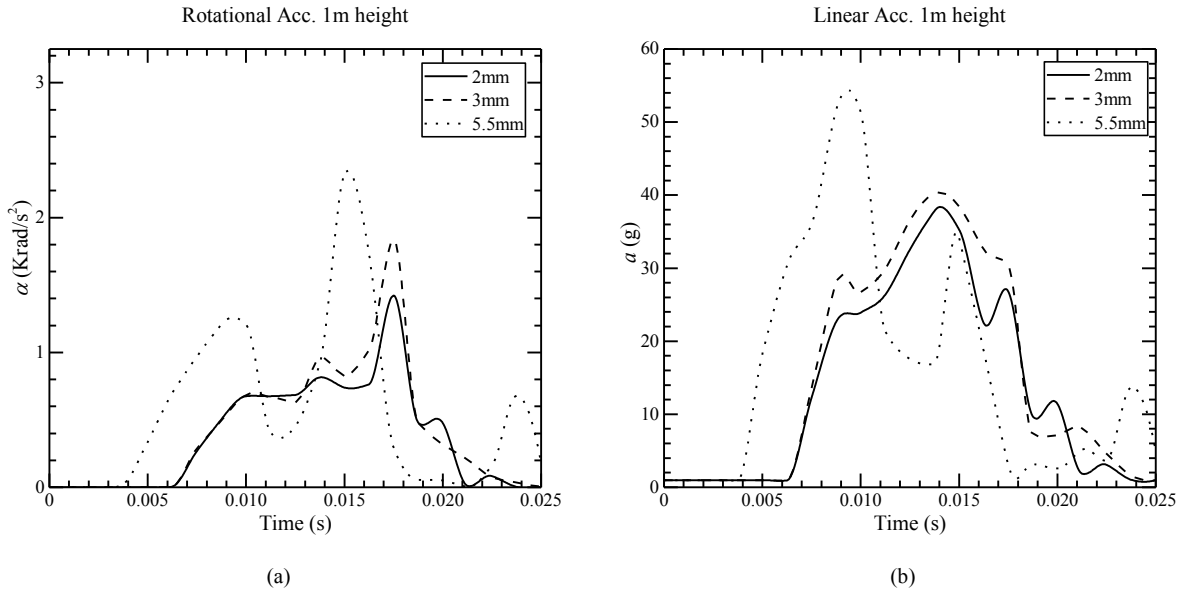


Fig. 16. The effect of the shell thickness on head acceleration of ABS shell from 1m height (a) linear acceleration (b) rotational acceleration

شکل ۱۶: اثر ضخامت پوسته بر شتاب وارد بر سر با پوسته آ.بی.اِس براساس ارتفاع ۱ متر (a) شتاب خطی (b) شتاب زاویه‌ای

لازم به ذکر است که دلیل اصلی اختلاف تنش برای جنس‌های مختلف در شکل ۱۳ اختلاف وزن پوسته می‌باشد و همانطور که مشاهده می‌شود تنش در پوسته با جنس جی.آر.پی بیشترین مقدار را دارد. اگرچه که با افزایش ضخامت جرم پوسته نیز افزایش می‌یابد که منجر به افزایش نیروی برخورد می‌شود اما، در طرف مقابل افزایش ضخامت باعث افزایش سطح اعمال نیرو شده که با توجه به نتایج شکل ۱۳ مشخص می‌شود که برآیند دو عامل فوق، در نهایت منجر به کاهش تنش وارد بر پوسته می‌شود.

نتایج شکل ۱۳ به خوبی با یافته‌های ارائه شده توسط میلز و گیل‌کریست [۷] که تئوری ارائه شده توسط کولار و دولاسکا [۴۲] را گسترش دادند، تطابق دارد. طبق رابطه (۴) تأثیر ضخامت در ایجاد کمانش مشاهده می‌شود. با افزایش ضخامت، بار بحرانی افزایش یافته و منجر به استحکام بیشتر می‌شود.

$$p_{cr} = Ct_s^3 \qquad (۴)$$

پارامتری که حد پایین مقدار ضخامت پوسته کلاه ایمنی در محل برخورد را تعیین می‌کند مقدار حداکثر تنش دینامیکی ایجاد شده در محل برخورد می‌باشد. در شکل ۱۴ تنش ایجاد شده در پوسته خارجی بر اثر ضربه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در ناحیه سمت راست پوسته به‌دلیل برخورد مایل، بیشترین تنش و تغییر شکل ایجاد شده است. با توجه به نتایج کرنش از حل عددی، در این ناحیه بیشترین مقدار کرنش (۰/۰۰۹۵۶) و کمترین مقدار آن (۰/۰۰۰۰۲۰۲) در ناحیه سمت چپ پوسته خارجی اتفاق افتاده است.

پوسته خارجی، ضربه اولیه را روی فوم پخش می‌کند. فوم با تغییر شکل انرژی را جذب کرده تا آسیب کمتری به سر وارد شود. تنش‌های ایجاد شده در فوم پس از ضربه به همراه حالت اولیه آن قبل از برخورد، در شکل ۱۵ نشان داده شده است. نتایج حل عددی بیانگر بیشترین (۰/۰۵۱) و کمترین (۰/۰۰۷۷۱-) مقدار کرنش در ناحیه سمت راست فوم می‌باشد. از مقایسه تغییر شکل پوسته خارجی و فوم براساس نتایج شبیه‌سازی، مشخص می‌شود که تغییر شکل پوسته خارجی متمرکز در ناحیه ضربه بوده در حالی‌که تغییر شکل فوم به کل آن مربوط می‌شود.

سرعت در جهت عمود بر محل برخورد، طبق استاندارد BS ۶۶۵۸ [۴۳] که در آزمایش برخورد بین ۵ تا ۷/۵ متر بر ثانیه می‌باشد، تاثیر زیادی بر تنش و شتاب ایجاد شده در کلاه ایمنی دارد. البته سرعت برخورد بیشتر نیز امکان‌پذیر است ولی سرعت (نسبی) غالب

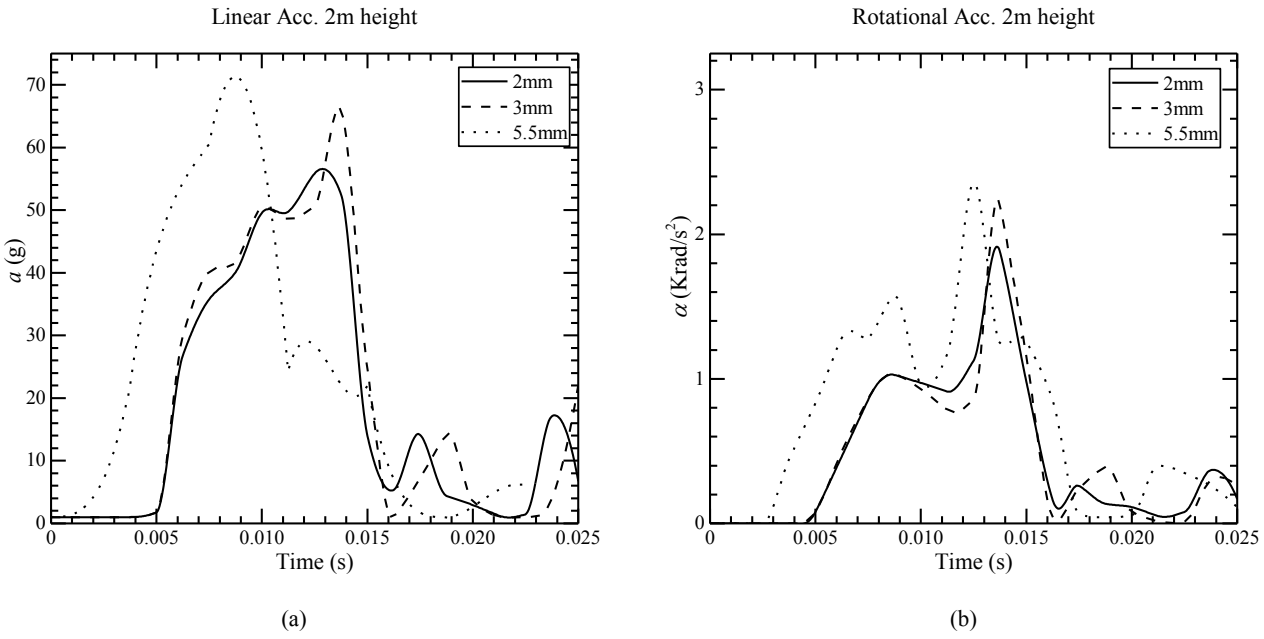


Fig. 17. The effect of the shell thickness on head acceleration of ABS shell from 2m height (a) linear acceleration (b) rotational acceleration

شکل ۱۷: اثر ضخامت پوسته بر شتاب وارد بر سر با پوسته آ.بی.اِس براساس ارتفاع ۲ متر (a) شتاب خطی (b) شتاب زاویه‌ای

جدول ۶: مقادیر معیار آسیب سر برای جنس و ضخامت‌های مختلف براساس ارتفاع ۲ متر ($s.g^{2.5}$)

Table 6. HIC values for different material and thicknesses based on 2-meter height ($s.g^{2.5}$)

ضخامت (mm)	ای بی اِس	جی آر پی	کِولار
2	114	127	70
3	135	150	95
5/5	160	185	122

تصادفات در همین محدوده می‌باشد. از عوامل دیگری که بر تنش تسلیم کلاه تأثیر می‌گذارد میتوان به سرعت در جهت مماس بر محل برخورد (چنانچه این مؤلفه از سرعت بالا باشد منجر به افزایش نیروی اصطکاک شده که خود تاثیر بسیار زیادی در افزایش شتاب دورانی نسبت به سطح برخورد خواهد داشت)، نوع جسم ضربه‌زننده و ناحیه برخورد اشاره کرد.

s

۳-۳- نتایج تغییرات ضخامت بر شتاب ایجاد شده در سر

در شکل ۱۶ تغییرات شتاب‌های خطی و زاویه‌ای برای ضخامت‌های مختلف نمایش داده شده است. علی‌رغم اثر مثبت افزایش ضخامت برای تنش که منجر به کاهش تنش می‌شود، افزایش ضخامت، شتاب دورانی و خطی وارد بر سر را افزایش می‌دهد. مشابه با نتایج شکل ۱۳ که تنش در ضخامت ۲ و۳ میلی‌متر نزدیک و در ضخامت ۵/۵ بسیار کمتر است، در ضخامت ۲ و ۳ میلی‌متر شتاب خطی و دورانی بسیار نزدیک و با ضخامت ۵/۵ میلی‌متر تفاوت زیادی دارند. علاوه بر اختلاف مقدار شتاب در این دو حالت، شکل فاز نمودار نیز تغییر یافته (به این دلیل که فاصله زمانی آن تا محل برخورد کمتر شده و سریع‌تر به سکو برخورد می‌کند) و نوسانات آن در قله و دره به مراتب از حالت ۲ و ۳ میلی‌متر بیشتر است. در اثر افزایش ضخامت مقدار اولین قله افزایش یافته است.

از نتایج تغییرات شتاب خطی و زاویه‌ای استنباط می‌شود که رابطه‌ای مستقیم بین بیشترین شتاب خطی با بیشترین شتاب

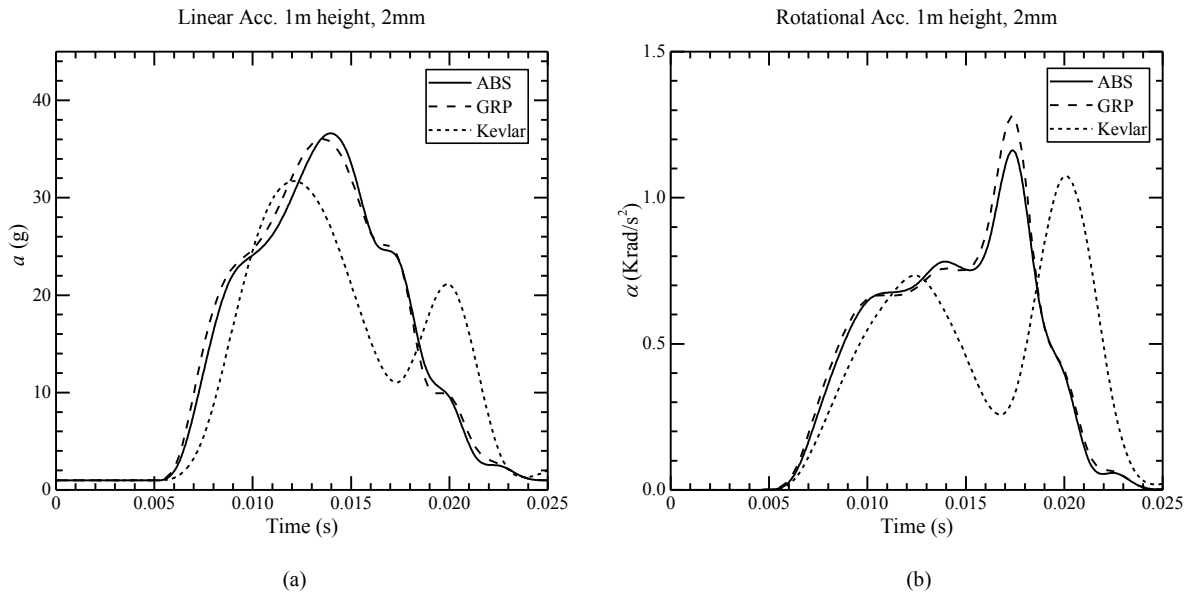


Fig. 18. The effect of the shell material on head acceleration for shell thickness of 2mm (a) linear acceleration (b) rotational acceleration

شکل ۱۸: اثر جنس پوسته بر شتاب وارد بر سر برای پوسته با ضخامت ۲ میلی‌متر (a) شتاب خطی (b) شتاب زاویه‌ای

زاویه‌ای وجود دارد. برای مثال با در نظر گرفتن بیشترین مقادیر شتاب زاویه‌ای و خطی در شکل ۱۶ و نحوه تغییر شتاب با افزایش ضخامت، وجود رابطه‌ای تقریبا خطی بین شتاب خطی و زاویه‌ای مشاهده می‌گردد.

بعد از بررسی اثر ضخامت پوسته در برخورد از ارتفاع ۱ متر (معادل با سرعت ۴/۴۲۸ متر بر ثانیه)، به دلیل این‌که سرعت نسبی برخورد موتورسوار با مانع در برخی از تصادفات بیشتر از ۴/۴۲۸ متر بر ثانیه است، ارتفاع برخورد را به ۲ متر (معادل ۶/۲۶۳ متر بر ثانیه) افزایش می‌دهیم. نتایج در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. بیشترین مقدار شتاب خطی و دورانی با افزایش سرعت افزایش یافته ولی رفتار آن تغییری نداشته است. همچنین باتوجه به افزایش سرعت، با رفتار ثابت رفتار منحنی در شکل ۱۷ نسبت به شکل ۱۶ کمی تغییر در محور زمان ایجاد شده است (کل منحنی با ضریبی مقیاس بزرگتر یافته است).

شرط تأیید معیار آسیب سر داشتن مقدار کمتر از $1000\ s.g^{2.5}$ می‌باشد [۴۴]. چنانچه مقدار معیار آسیب سر طبق رابطه (۵) محاسبه شود، از آنجایی‌که ضخامت‌های بررسی شده در محدوده رایج و استاندارد قرار دارند (بین ۵/۵-۲/۵ میلی‌متر) در این معیار تأیید می‌شوند.

$$HIC = \left\{ \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} a(t)\,dt}{t_2 - t_1} \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\}_{max} \quad (۵)$$

که در آن $a(t)$ شتاب خطی وارد بر سر برحسب g و t_1 ، t_2 بازه زمانی انتخابی دلخواهی هستند به نحوی که مقدار معیار آسیب سر بیشینه شود.

مقادیر محاسبه شده برای معیار آسیب سر در جدول ۶ آمده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده، جنس کِولار عملکرد فوق‌العاده بهتری نسبت به دو جنس دیگر دارد. اگرچه هر ۳ ضخامت تایید می‌شوند، اما عملکرد ضخامت ۲ میلی‌متر بسیار بهتر نسبت به سایر ضخامت‌ها می‌باشد.

در معیارآسیب سر فقط شتاب خطی اندازه‌گیری می‌شود، بنابراین برای بررسی محدوده مجاز شتاب دورانی از تحقیقات[۱۱-۸] استفاده شد و از آنجایی‌که هر ۳ حالت در محدوده مجاز قرار دارند، شتاب دورانی نیز تأیید می‌شود.

۴-۳- نتایج تغییرات جنس بر شتاب ایجاد شده در سر

اثر جنس نیز عامل تأثیرگذاری در طراحی کلاه ایمنی می‌باشد

چرا که علاوه بر چگالی که مستقیماً در وزن تاثیر گذار است، مواد رفتار مختلفی حین برخورد (حالت دینامیکی) از خود نشان می‌دهند. علاوه بر آن ممکن است طبق نتایجی که در شکل ۱۳ ارائه شده است، یک ماده در برابر تنش‌های وارده مقاومت خوبی نشان نداده و در عین حال در تحلیل شتاب نتایج رضایت بخش باشد. نتایج شبیه‌سازی ۳ جنس رایج پوسته کلاه ایمنی در شکل ۱۸ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۱۸ پوسته از جنس جی.آر.پی رفتاری مشابه با ای.بی.اِس در برخورد مایل دارد. پوسته با جنس کِولار دارای مقدار شتاب کمتر می‌باشد. بررسی معیار آسیب سر نیز نشان می‌دهد که عملکرد کِولار بسیار بهتر از دو جنس دیگر است. نتایج جنس کِولار همانند نتایج ارئه شده در مرجع [۳۳] از دو جنس دیگر بهتر است و دلیل آن وجود مکانیزم آسیب در مواد کامپوزیت می‌باشد. در هنگام ضربه مهم‌ترین مکانیزم شکستی که در مواد کامپوزیت رخ می‌دهد، ترکیبی از آسیب‌های بین‌لایه‌ای و برون‌لایه‌ای مانند لایه‌لایه‌شدگی[1] می‌باشد. در مواد کامپوزیت در کنار جذب انرژی با تغییر شکل (مانند سایر مواد) بخشی از انرژی در همین مکانیزم آسیب جذب می‌شود [۶].

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از روش اجزاء محدود، رفتار دینامیکی کلاه ایمنی موتورسیکلت برای محاسبه بیشترین شتاب خطی و دورانی وارد بر سر در برخورد مایل با نتایج آزمایشگاهی تأیید شد. بیشترین شتاب خطی وارد بر سر **70g** تعیین شد که با انجام محاسبه و تعیین معیار آسیب سر در محدوده مجاز قرار می‌گیرد. همچنین بیشترین شتاب زاویه‌ای سر در محدوده ۲/۵ krad/s^2 تخمین زده شد. برای نزدیک‌تر شدن شبیه‌سازی به تصادفات، سرعت برخورد کمی بیشتر از ۵ m/s در نظر گرفته شده است. نتایج نشان می‌دهد بیشترین شتاب دورانی وارد بر سر علاوه بر عواملی چون ضخامت و جنس فوم، اصطکاک پوسته با زمین و جهت برخورد سر، مستقیماً به مقدار ضخامت پوسته در محل برخورد، سرعت برخورد و جنس پوسته نیز بستگی دارد. اگرچه در شروط استانداردهای کلاه ایمنی، وجود پوسته‌ای محکم برای جلوگیری از شکست دیده می‌شود، اما همانطور که در این پژوهش اثبات شد، با افزایش ضخامت پوسته شتاب دروانی وارد بر سر شدیداً افزایش می‌یابد که منجر به آسیب می‌شود. انتخاب بهترین ضخامت از بین ضخامت‌های بررسی شده، مشابه هر مسأله طراحی نیازمند مصالحه بین پارامترهای مختلف می‌باشد. چنانچه ضخامت زیاد باشد پوسته متحمل تنش کمتر شده و هنگام برخورد از سر محافظت می‌کند و اگر ضخامت کم باشد شتاب وارد بر مجموعه سر کاهش پیدا کرده و بازم هم سلامتی را حفظ می‌کند. علاوه بر بحث ایمنی و محافظت از سر در هنگام برخورد باید به راحتی در هنگام پوشیدن کلاه توجه کرد. بنابراین بهتر است با بررسی قیمت جنس‌های مختلف، توجه به تنش وارد بر پوسته و مقدار شتاب خطی و دورانی وارد بر سر، ضخامت پوسته به نحوی طراحی گردد که در نقاط برخورد (عموما تصادفات سر بصورت مایل است) ضخامت آن فقط در نقاط مستعد ضربه نسبت به سایر نقاط بیشتر باشد تا علاوه بر کاهش وزن و راحتی در هنگام استفاده، جلوگیری از شکست بر اثر تنش وارد بر پوسته، کمترین شتاب خطی و دورانی را ایجاد کند و اضافه بر آن در بحث هزینه و مصرف مواد اولیه صرفه جویی شود.

فهرست علائم

a	شتاب مرکز ثقل سر (m/s^2)
E	مدول یانگ (N/m^2)
g	شتاب جاذبه زمین (m/s^2)
h	ارتفاع مدل از سطح زمین (m)
H	معیار آسیب سر (m$^{2.5}$/s^4)
p	فشار (N/m^2)
p_{cr}	بار بحرانی کمانش (N)
P_0	فشار گاز موثر (N/m^2)
RR	چگالی نسبی فوم
tt	زمان(s)
t_s	ضخامت پوسته (m)
vv	سرعت (m/s^1)

علائم یونانی

$\alpha\alpha$	شتاب دورانی(Rad/s^2)
ε	کرنش مهندسی
σ	تنش (N/m^2)
σ_{c0}	تنش تسلیم فشاری اولیه (N/m^2)

تشکر و قدردانی

نویسندگان در اینجا از کمک‌های Head Injury Prevention

1 Delamination

Lab. وابسته به دانشگاه سایمون فریزر کشور کانادا به خاطر انجام آزمایش‌ها تشکر و قدردانی می‌نمایند.

مراجع

[1] W.H.O.D.o. Violence, I. Prevention, W.H.O. Violence, W.H. Organization, Global status report on road safety: time for action, World Health Organization, 2009.

[2] M. Peden, R. Scurfield, D. Sleet, D. Mohan, A.A. Hyder, E. Jarawan, C.D. Mathers, World report on road traffic injury prevention, in, World Health Organization Geneva, 2004.

[3] M. Koornstra, J. Broughton, R. Esberger, C. Glansdorp, W. Köppel, F. Taylor, J. Cauzard, A. Evans, L. Hantula, M. Piers, Transport safety performance in the EU: a statistical overview, European Transport Safety Council, Brussels, Belgium, 2003) 32).

[4] M. Toma, F. Njilie, M. Ghajari, U. Galvanetto, Assessing motorcycle crash-related head injuries using finite element simulations, International Journal of Simulation Modelling, 152-143 (2010) (3)9.

[5] A. Afshari, S. Rajaai, Finite element simulations investigating the role of the helmet in reducing head injuries, International Journal of Simulation Modelling (IJSIMM), 2008) (1)7).

[6] P.K. Pinnoji, P. Mahajan, Analysis of impact-induced damage and delamination in the composite shell of a helmet, Materials & design, 3723-3716 (2010) (8)31.

[7] N.J. Mills, A. Gilchrist, The effectiveness of foams in bicycle and motorcycle helmets, Accident; analysis and prevention, 163-531 (1991) (3-2)23.

[8] A.G. Monea, I. Verpoest, J. Vander Sloten, G. Van der Perre, J. Goffin, B. Depreitere, Assessment of relative brain-skull motion in quasistatic circumstances by magnetic resonance imaging, Journal of neurotrauma, (2012) (13)29 2317-2305.

[9] N. Yoganandan, F.A. Pintar, J. Zhang, T.A. Gennarelli, N. Beuse, Biomechanical aspects of blunt and penentrating head injuries, in: IUTAM Symposium on Impact Biomechanics: From Fundamental Insights to Applications, Springer, 2005, pp. 184-173.

[10] M. Richter, D. Otte, U. Lehmann, B. Chinn, E. Schuller, D. Doyle, K. Sturrock, C. Krettek, Head injury mechanisms in helmet-protected motorcyclists: prospective multicenter study, Journal of Trauma and Acute Care Surgery, (5)51 958-949 (2001).

[11] N. Bourdet, S. Mojumder, S. Piantini, C. Deck, M. Pierini, R. Willinger, Proposal of a new motorcycle helmet test method for tangential impact, in: Proc. of the International IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impacts, 2016, pp. 504-503.

[۱۲] M. Salay Naderi, G.B. Ghare Patian, M. Abedi, An Accurate Method For Estimation of Series and Parallel Resistance in Detailed Model of Power Transformer Using Impulse Test Results, AUT Journal of Mechanical Engineering, 2-2 ,2003 (2)30 (persian)

[13] A. Gilchrist, N. Mills, Modelling of the impact response of motorcycle helmets, International Journal of Impact Engineering, 218-201 (1994) (3)15.

[۱۴] S.M.R Khalili, N. Mohammadpanah, Dyamic Response of Fiber Composite With Pre-Stresses Under Transverse Impact, AUT Journal of Mechanical Engineering, (1)36 38-38 ,2005 (persian)

[15] S. Sadeghnejad, Y. Taraz Jamshidi, M. Sadighi, On the Low-Velocity Impact and Quasi-Static Indentation Studies of Nomex™ Honeycomb Composite Sandwich Panels, AUT Journal of Mechanical Engineering, (2018) -.

[16] H. van den Bosch, M. Leensen, A. Sauren, Modelling and specifications for an improved helmet design, Master thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 1998.

[17] M. Aiello, U. Galvanetto, L. Iannucci, Numerical simulations of motorcycle helmet impact tests, International journal of crashworthiness, 7-1 (2007) (1)12.

[18] A. Cernicchi, U. Galvanetto, L. Iannucci, Virtual modelling of safety helmets: practical problems, International journal of crashworthiness, (2008) (4)13 467-451.

[19] T. Erhardt, T. Rice, L. Troszak, M. Zhu, Motorcycle

(Persian)

[30] F. Shuaeib, A. Hamouda, M. Hamdan, R.R. Umar, M. Hashmi, Motorcycle helmet: Part II. Materials and design issues, Journal of Materials Processing Technology, 431-422 (2002) (3)123.

[31] H. Taghipoor, M.D. Noori, Experimental and numerical study on energy absorption of lattice-core sandwich beam, Steel Compos Struct, 147-135 (2018) 27.

[32] D.-S. Liu, Y.-T. Chen, A Finite Element Investigation into the Impact Performance of an Open-Face Motorcycle Helmet with Ventilation Slots, Applied Sciences, (3)7 279 (2017).

[33] V. Kostopoulos, Y. Markopoulos, G. Giannopoulos, D. Vlachos, Finite element analysis of impact damage response of composite motorcycle safety helmets, Composites Part B: Engineering, 107-99 (2002) (2)33.

[34] N.J. Mills, Polymer foams handbook : engineering and biomechanics applications and design guide, 1st ed., Butterworth Heinemann, Amsterdam ; Boston, 2007.

[35] N. Mills, Finite element models for the viscoelasticity of open-cell polyurethane foam, Cellular polymers, (5)25 316-293 (2006).

[36] F.A. Fernandes, R.A. de Sousa, Finite element analysis of helmeted oblique impacts and head injury evaluation with a commercial road helmet, Struct. Eng. Mech, (5)48 679-661 (2013).

[37] N. Mills, R. Ward, The biomechanics of motorcycle helmet retention, in: Proceedings of the International Research Council on the Biomechanics of Injury conference, International Research Council on Biomechanics of Injury, 1985, pp. 128-117.

[38] L.-T. Chang, C.-H. Chang, G.-L. Chang, Fit effect of motorcycle helmet, JSME International Journal Series A Solid Mechanics and Material Engineering, (2001) (1)44 192-185.

[39] M.C. Beusenberg, R. Happee, An experimental evaluation of crash helmet design and effectiveness in standard impact tests, in: Proceedings of the International Research Council on the Biomechanics of Injury conference, helmet type and the risk of head injury and neck injury during motorcycle collisions in California, Accident Analysis & Prevention, 28-23 (2016) 86.

[20] M. Ghajari, U. Galvanetto, L. Iannucci, R. Willinger, Influence of the body on the response of the helmeted head during impact, International journal of crashworthiness, 295-285 (2011) (3)16.

[21] N.J. Mills, S. Wilkes, S. Derler, A. Flisch, FEA of oblique impact tests on a motorcycle helmet, International Journal of Impact Engineering, 925-913 (2009) (7)36.

[22] T.A. Gennarelli, L.E. Thibault, J.H. Adams, D.I. Graham, C.J. Thompson, R.P. Marcincin, Diffuse axonal injury and traumatic coma in the primate, Annals of Neurology: Official Journal of the American Neurological Association and the Child Neurology Society, 574-564 (1982) (6)12.

[23] F. Fernandes, R.A. De Sousa, Motorcycle helmets—A state of the art review, Accident Analysis & Prevention, 21-1 (2013) 56.

[24] C. Deck, R. Willinger, D. Baumgartner, Helmet optimisation based on head-helmet modelling, WIT Transactions on The Built Environment, 3200) 67).

[25] V.A. Bellora, R. Krauss, L. Van Poolen, Meeting interior head impact requirements: A basic scientific approach, SAE transactions, (408-383 (2001.

[26] V. Tinard, C. Deck, R. Willinger, New methodology for improvement of helmet performances during impacts with regards to biomechanical criteria, Materials & design, 37 88-79 (2012).

[27] M. Aare, S. Kleiven, P. Halldin, Injury tolerances for oblique impact helmet testing, International journal of crashworthiness, 23-51 (2004) (1)9.

[28] A.L. DeMarco, D.D. Chimich, J.C. Gardiner, R.W. Nightingale, G.P. Siegmund, The impact response of motorcycle helmets at different impact severities, Accident Analysis & Prevention, 1784-1778 (2010) (6)42.

[29] H. Taghipoor, M. Damghani Noori, Topology Optimization Study in Energy Absorption of Lattice-core Sandwich Beams under Three-point Bending Test, Modares Mechanical Engineering, 173-163 (2018) (4)18.

International Research Council on Biomechanics of Injury, 1993, pp. 323-307.

[40] P.K. Pinnoji, P. Mahajan, N. Bourdet, C. Deck, R.m. Willinger, Impact dynamics of metal foam shells for motorcycle helmets: Experiments & numerical modeling, International Journal of Impact Engineering, (2010) (3)37 284-274.

[41] M. Holmes, Q. Al-Khayatt, Structural properties of grp, Composites, 165-157 (1975) (4)6.

[42] L. Kollár, E. Dulácska, Buckling of shells for engineers, John Wiley & Sons, 1984.

[43] BS:6658, Institution British Standard, in: Protective helmets for vehicle users, London, 1985.

[44] C.-Y. Chang, C.-H. Ho, S.-Y. Chang, Design of a Helmet, ME Report 2003) 599/499).

[45] J.O. Hallquist, LS-DYNA3D Theoretical Manual, Technology Corp., 1993.

[46] J. Zhang, N. Kikuchi, V. Li, A. Yee, G. Nusholtz, Constitutive modeling of polymeric foam material subjected to dynamic crash loading, International Journal of Impact Engineering, 386-369 (1998) (5)21.

پیوست:

معادلات پلاستیسیته فوم فشرده با سخت‌شوندگی حجمی در این بخش به‌طور خلاصه آمده است (روابط تکمیلی در [۴۵ و ۴۶] آمده است). مدل فوم فشرده با سخت‌شوندگی حجمی از صفحه تسلیمی با وابستگی بیضوی بین تنش انحرافی و فشاری استفاده می‌کند. در این مدل فرض بر این این است که رشد صفحه تسلیم توسط کرنش پلاستیکی فشرده‌کننده حجمی کنترل می‌شود.

صفحه تسلیم در مدل سخت‌شوندگی حجمی به‌صورت (الف-۱) تعریف می‌شود.

$$F=\sqrt{q^2+\alpha^2\left(p-p_0\right)^2}-B=0 \qquad \text{(الف-۱)}$$

که در آن p تنش میانگین (هیدرواستاتیک) و q تنش ون‌میسز می‌باشد.

اگر A و B اندازه قطرهای بیضی تسلیم باشند آنگاه:

$$B=\alpha A=\alpha\frac{p_t+p_c}{2} \qquad \text{(الف-۲)}$$

$$\alpha=\frac{B}{A} \qquad \text{(الف-۳)}$$

که در آن α ضریب شکلی است که نسبت اندازه قطرهای بیضی تسلیم را مشخص میکند.

$$p_0=\frac{p_c-p_t}{2} \qquad \text{(الف-۴)}$$

در رابطه فوق p_0 مرکز بیضی تسلیم می‌باشد که بر روی محور تنش هیدرواستاتیک pp قرار دارد. همچنین p_t و p_c به ترتیب استحکام ماده در برابر کشش و فشار هیدرواستاتیک می‌باشند (مقدار p_c همواره مثبت است).

شکل (الف-۱) صفحه تسلیم دایره میسز را در صفحه تنش انحرافی نشان می‌دهد که به شکل یک بیضی در صفحه تنش طولی می‌باشد.

با توجه به شکل فوق، ضریب α به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\alpha=\frac{3k}{\sqrt{\left(3k_t+k\right)\left(3-k\right)}} \qquad \text{(A-۵)}$$

$$k=\frac{\sigma_c^0}{p_c^0} \qquad \text{(A-۶)}$$

$$k_t=\frac{p_t}{p_c^0} \qquad \text{(A-۷)}$$

در روابط فوق، شرط شبیه‌سازی با توجه به معادله (الف-۵)، $0<k<3$ و $k_t\geq 0$ می‌باشد. همچنین، صفحه تسلیم محور تنش p را در $-p_t$ و p_c قطع می‌کند. در اینجا فرض می‌شود p_t که با وجود هرگونه فرآیند تغییر شکل پلاستیک ثابت می‌ماند و در حقیقت، این مقدار p_cp_c است که به‌دلیل افزایش تراکم و یا کاهش دانسیته ماده

افزایش می‌یابد. تکامل صفحه تسلیم را می‌توان از طریق افزایش اندازه صفحه تسلیم در محور تنش هیدرواستاتیک pp بیان کرد. بدین صورت که $p_c + p_t$ تابعی از کرنش پلاستیک فشرده سازی حجمی $-\varepsilon_{vol}^{pl}$ بیان شود. از طرفی با ثابت بودن p_t تراکم تک‌محوره رابطه زیر به‌دست می‌آید

$$p_c\left(\varepsilon_{vol}^{pl}\right)=\frac{\sigma_c\left(\varepsilon_{axial}^{pl}\right)\left[\sigma_c\left(\varepsilon_{vol}^{pl}\right)\left(\frac{1}{\alpha^2}+\frac{1}{9}\right)+\frac{p_t}{3}\right]}{p_t+\frac{\sigma_c\left(\varepsilon_{axial}^{pl}\right)}{3}} \qquad (الف-۸)$$

نهایتاً درتراکم تک محوره برای مدل سخت‌شوندگی حجمی $\varepsilon_{vol}^{pl}=\varepsilon_{axial}^{pl}$ که به وسیله مدل فوم فشرده با سخت‌شوندگی حجمی شبیه‌سازی می‌شود

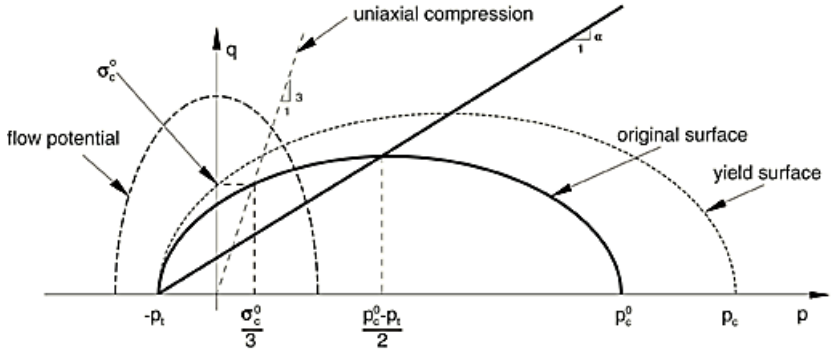


Fig. (A-1). Crushable foam model with volumetric hardening, yield surface [46]

شکل الف-۱: صفحه تسلیم فوم فشرده با سخت‌شوندگی حجمی [۴۶]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

M. Ghasemzade Moghaddam, S. A. Hashemian, Numerical Investigation of the Effect of Shell Material and Thickness on the Mechanics of Motorcycle Helmets Impact, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(2) (2021) 687-708.

DOI: 10.22060/mej.2020.16512.6379

این صفحه عمداً خالی است