



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

مجتبی قاسم‌زاده مقدم، سید علی هاشمیان*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

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

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 جلوپاز با در نظر گرفتن سه جنس رایج انتخاب شد. در بیشتر تصادفات در لحظه برخورد سر با زمین، نحوه قرارگیری سر به صورت مایل می‌باشد. در مدل شبیه‌سازی شده این مقاله، در برخورد نیز سر به صورت مایل قرار گرفته است. نتایج به دست 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 به دست آمده، در صورتی که ضخامت افزایش یابد، وزن کلاه و دامنه تغییرات شتاب وارد بر سر افزایش یافته و همچنین احتمال شکست پوسته کاهش می‌یابد. در صورتی که با کاهش ضخامت، علی‌رغم کاهش شتاب وارد بر سر، تنش ایجاد شده در پوسته افزایش یافته و منجر به شکست آن می‌شود

۱- مقدمه

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 موتورسواران می‌باشد [۴]. افشاری و رجائی [۵] اهمیت استفاده از کلاه ایمنی را با بررسی برخورد در دو حالت سر بدون کلاه ایمنی

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. پدین 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

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





Fig. 1. A typical motorcycle helmet [6]

شکل ۱. نوعی کلاه ایمنی موتور سیکلت [۶]

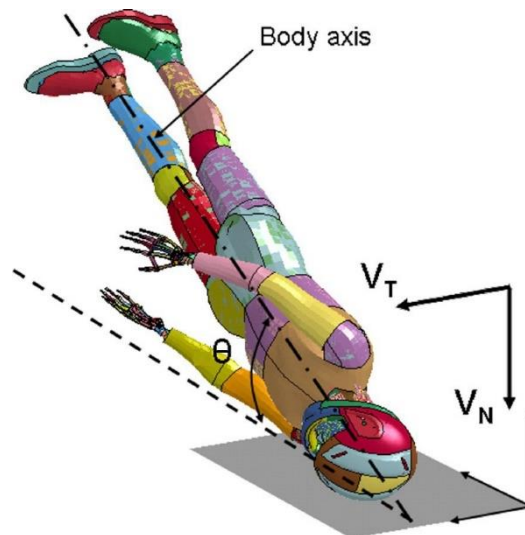


Fig. 2. Simulation of the body at the moment of head collision to the ground in oblique impact [20]

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

افزایش می‌یابد [۸-۱۰]. 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 ۳۰ 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

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 در حالت 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 گیل کریست [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 $10 \frac{\text{krad}}{\text{s}^2}$ احتمال این‌که آسیب منجر به مرگ شود

[۲۳]. و طبیعتاً با در نظر گرفتن شتاب دورانی در معیار سلامتی کلاه ایمنی این استاندارد مطمئن تر و کاربردی تر 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 تأکید کردند. همچنین نتایج آن‌ها بر تطابق رفتار کرنش بافت‌های مغزی با بیشترین سرعت دورانی استوار می‌باشد. دی‌مارکو و همکاران [۲۸] با در نظر گرفتن 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 تأثیر 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 جلو باز نسبت به کلاه ایمنی تمام-پوشیده^۲ و کلاه ایمنی نیم-پوشیده^۳ 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 جلو باز^۴ با استفاده از روش المان محدود با در نظر گرفتن پوسته در سه حالت شامل دو

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 گیل کریست 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 تأثیر 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، تغییر شکل‌های 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 تأثیر نوع کلاه ایمنی موتورسیکلت در هنگام برخورد و احتمال آسیب در سر براساس مشاهدات تجربی پرداختند.

طبق معیار آسیب سر^۱، 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 تأثیر شتاب دورانی در آسیب‌های سر از نظر علمی کاملاً پذیرفته شده است

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

1 Head Injury Criteria

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

کوچک صحیح نمی‌باشد [۳۴] در تحلیل عددی مکانیزم برخورد از حل گر دینامیکی صریح^۱ نرم‌افزار آباکوس^۲ 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 شبیه‌سازی فرآیندهای لحظه‌ای مانند ضربه و انفجار موثر است.

جنس مرکب (کامپوزیت) و یک ماده ترموپلاستیک برای کلاه ایمنی جلو باز 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 بهینه‌سازی 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 فتر بدون جرم، غیرخطی عمل می‌کند و همچنین در شرایط مسئله فرض تغییر شکل‌های بسیار

1 Explicit Dynamics
2 ABAQUS CAE

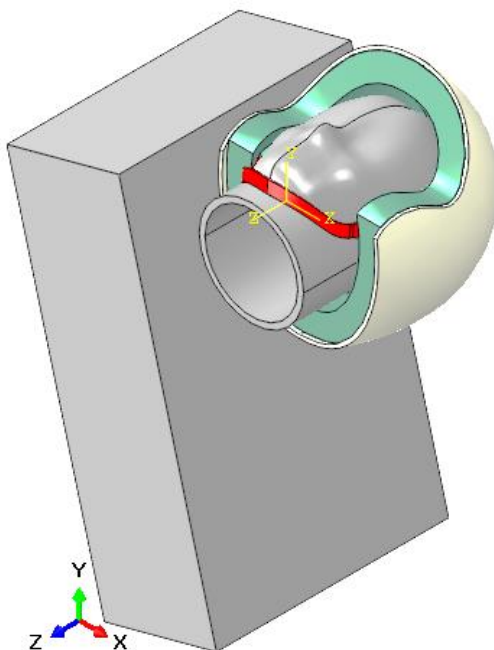


Fig. 4. Simulated helmet model in ABAQUS software

شکل ۴: هندسه کلاه ایمنی شبیه‌سازی شده در نرم‌افزار آباکوس

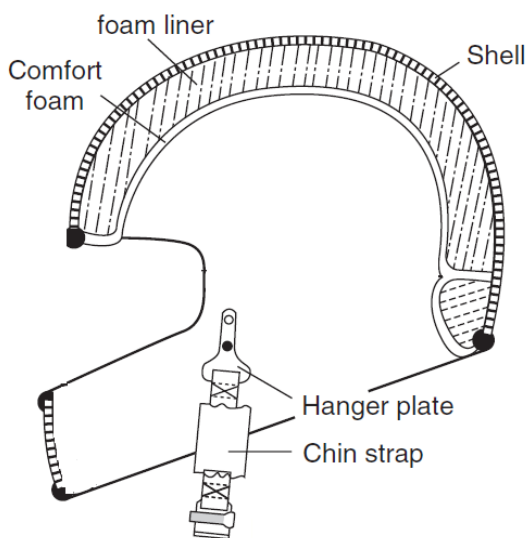


Fig. 5. Helmet layers [35]

شکل ۵: لایه‌های مختلف کلاه ایمنی [۳۵]

کرنش فوم از دلایل استفاده از المان محدود برای به دست آوردن شتاب مرکز جرم مجموعه می‌باشد. در این شبیه‌سازی سر به صورت جسم صلب در نظر گرفته شده و مشخصات آن در جدول ۱ آمده است.

۲-۱- 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

جدول ۲: خواص مکانیکی فوم ای.پی.اس ۶۵ [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

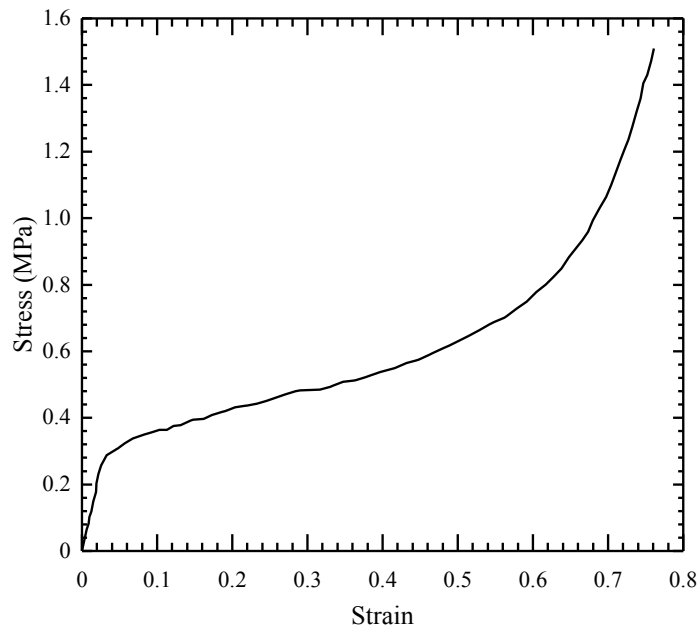


Fig. 6. EPS65 foam stress-strain curve [36]

شکل ۶: منحنی تنش-کرنش فوم ای.پی.اس ۶۵ [۳۶]

۲-۲- خواص مکانیکی مواد

۲-۲-۱- فوم

فوم ای.پی.اس^۲ 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.اس از طریق توانایی خود برای ایجاد تغییر شکل دائمی، انرژی را جذب می‌کند.

رفتار فوم ای.پی.اس تحت فشار یک طرفه در شکل ۶ دیده می‌شود. جهت شبیه‌سازی رفتار فوم، فوم از جنس الاستو-پلاستیک^۳ 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.

نمونه کلاه ایمنی خریداری شده، با استفاده تکنولوژی لیزر اسکن اندازه‌برداری شده و به کمک نرم‌افزار سالیدروکس^۱ 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.

2 Expanded Polystyrene

3 Elastic-Plastic

1 SolidWorks Software

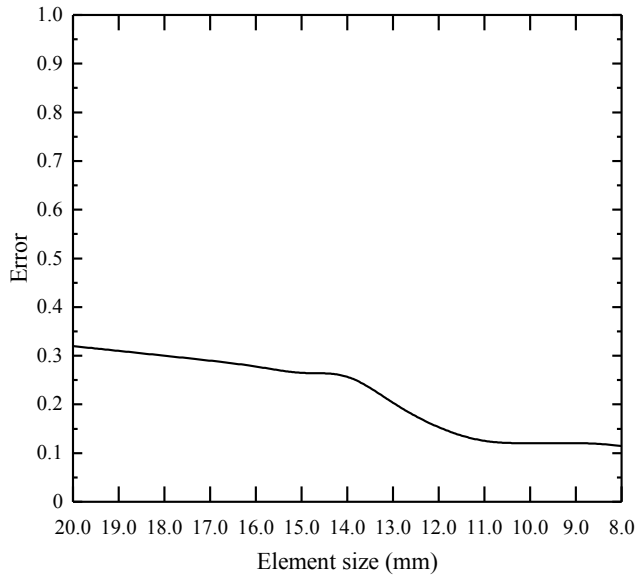


Fig. 7. Error results based on average element size

شکل ۷: بررسی خطای نتایج براساس متوسط اندازه المان‌ها

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^۲ شناخته می‌شود، افزایش کرنش داریم که تقریباً در تنش ثابت صورت می‌پذیرد. ناحیه سوم متناظر با افزایش دانسیته^۳ فوم بوده و تنش مرتباً 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 نمی‌بیند، 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 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

$$\sigma = E \varepsilon \quad (1)$$

همچنین برای شبیه‌سازی رفتار پلاستیک فوم نیز از قابلیت فوم فشرده^۱ 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.

$$\sigma_c = \sigma_{c0} + \frac{P_0 \varepsilon}{1 - \varepsilon - R} \quad (2)$$

که در آن σ_c تنش فشاری مهندسی، ε کرنش مهندسی، P_0 فشار

2 Stress Plateau
3 Densification

1 Crushable Foam

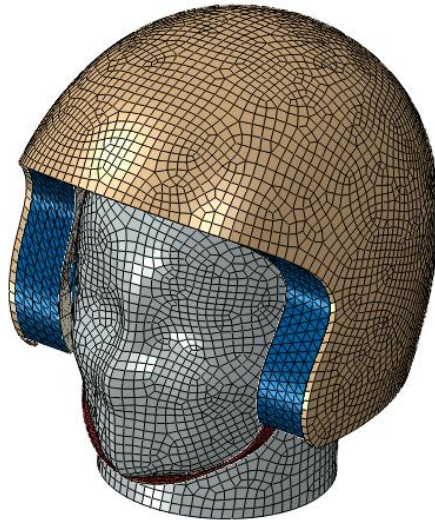


Fig. 8. Finite element helmet set model

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

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

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

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

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

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 پینوچی 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.

۲-۳-۲- 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.

۲-۴- پارامترهای حل

در تعریف مکانیزم برخورد از الگوریتم پنالنتی^۵ و تماس از

جنس پوسته کلاه ایمنی که معمولاً ضخامتی بین ۲/۵ تا ۵/۵ میلی‌متر دارد، از مواد ترموپلاستیک مانند ای.بی.اس^۱ و پلی‌کربنات و یا کامپوزیت مانند جی.آر.پی^۲ و کولار^۳ 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 ای.بی.اس و کولار می‌باشند. بررسی رفتار جی.آر.پی نشان می‌دهد که خواص مکانیکی آن وابسته به رویه تولید آن می‌باشد. مزیت اصلی کولار نسبت به ای.بی.اس استحکام بیشتر به همراه وزن کمتر می‌باشد، البته قیمت آن در برابر ای.بی.اس بیشتر بوده که انتخاب جنس پوسته را دشوار می‌کند.

از آنجایی که 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، کولار و ای.بی.اس با ضخامت‌هایی در محدوده ۲ تا ۵/۵ میلی‌متر استفاده شده است. در جدول ۴ مشخصات مکانیکی پوسته‌های مختلف ذکر شده آمده است.

۲-۲-۳- بند پارچه‌ای

بند، در طول مدت استفاده از کلاه ایمنی سر را متصل به مجموعه نگه می‌دارد. بند کلاه ایمنی از جنس نایلون و یا پت^۴ با چگالی kg/m^3 ۷۰۰ و مدول الاستیسته ۱۰۰۰ Mpa و نسبت پواسون ۰/۲ می‌باشد. از آنجایی که پوسته در فاصله شعاعی زیادی نسبت به مرکز جرم سر قرار می‌گیرد، لختی دورانی کلاه ایمنی تمام‌صورت دو برابر لختی دورانی سر می‌باشد [۳۷] و این احتمال خارج شدن کلاه ایمنی از سر در هنگام تصادف را در صورتی که بند کاملاً کشیده شده نباشد، افزایش می‌دهد. وظیفه بند جلوگیری از جابجایی سر در کلاه ایمنی می‌باشد، از این رو برای شبیه‌سازی هرچه دقیق‌تر بند به نحوی که در جبین 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.

۲-۲-۴- بالشتک داخلی

بالشتک داخلی عموماً از فوم‌های نرم و انعطاف‌پذیر با چگالی کم

5 Penalty Algorithm

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

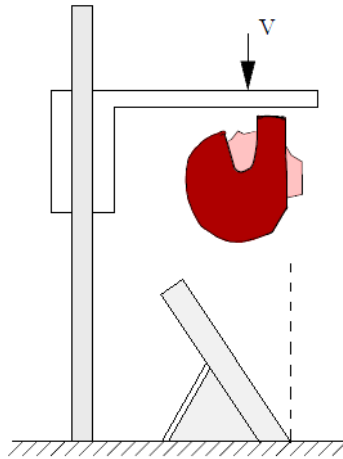


Fig. 9. Schematic of oblique impact

شکل ۹: شماتیک برخورد مایل

۳- نتایج و بحث

۳-۱- صحنه‌گذاری نتایج

برای صحنه‌گذاری نتایج از یک کلاه ایمنی با جنس پوسته ای. بی.اس استفاده شده است. نمونه کلاه مورد استفاده، مدل برش خورده برای اندازه‌گیری 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 ۱۵ 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

نوع صفحه به صفحه^۱ 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^۲ برای ایجاد یکپارچگی و بهم پیوستگی مجموعه استفاده شده است. تطابق بسیار خوب 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 آنجایی که 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 به دست می‌آید. زاویه برخورد سر برابر ۱۵۱۵ درجه نسبت به محور قائم لحاظ شده است (شکل ۹). همچنین در شبیه‌سازی اثر جاذبه زمین در نظر گرفته شده است. حلگر دینامیکی صریح با مدت زمان شبیه‌سازی ۰/۰۲ ثانیه با در نظرگیری تغییر شکل‌های بزرگ استفاده می‌شود.

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3)$$

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

-
- 1 Surface to Surface
 - 2 Tie Constraint



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

بررسی نحوه تغییرات و تاثیر عوامل ذکر شده با توجه به آن که نتایج حل عددی به نتایج آزمایشگاهی نزدیک هستند با ایجاد تغییر در پارامترهای مسئله اثر تغییرات ضخامت، جنس و سرعت بررسی می شود.

و ضرایب اصطکاک بین لایه ها و یا محل قرارگیری شتابسنج در سر باشد. شتاب خطی و دورانی وارد بر سر تحت شرایط مختلف از جمله تغییر شرایط برخورد، جنس و ضخامت لایه ها تغییر می کنند. برای

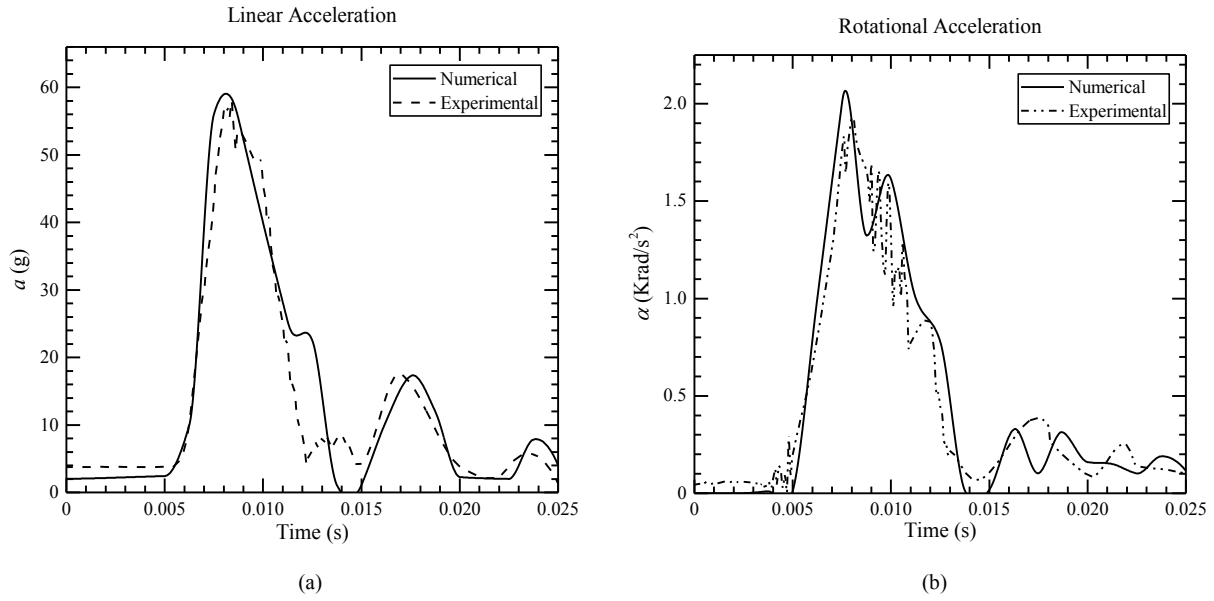


Fig. 12. Experimental and numerical acceleration comparison (a) linear acceleration (b) rotational acceleration

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)

جنس آریبی	کولار	ای.بی.اس	ضخامت (mm)
596	709	596	2
1290	1070	900	3
2250	1970	1670	5

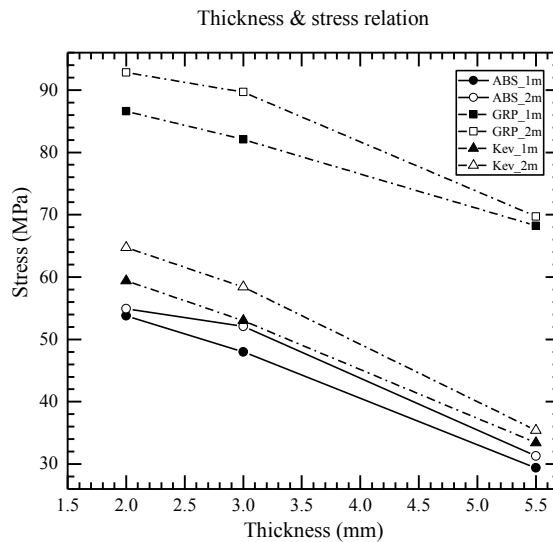


Fig. 13. Maximum stress variation with thickness for common shell materials from 1 and 2 meter height

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

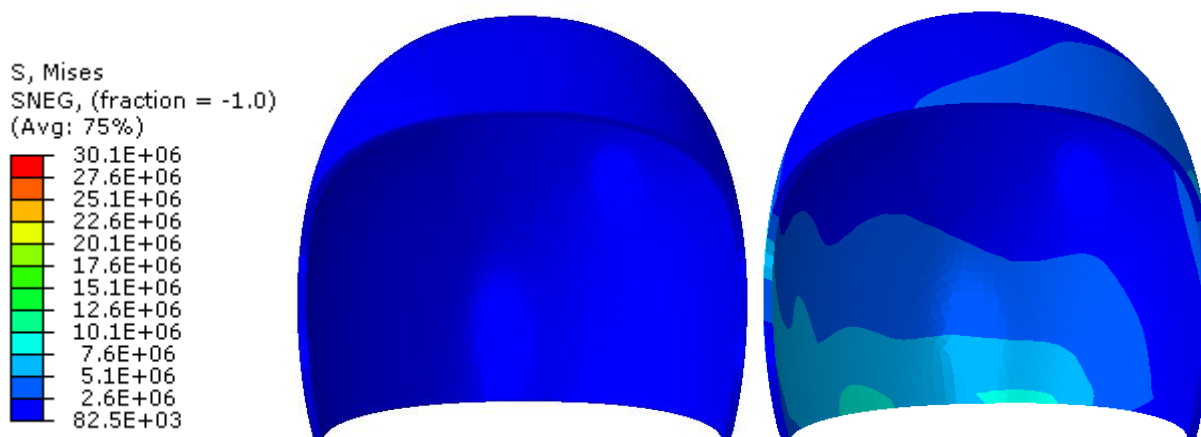
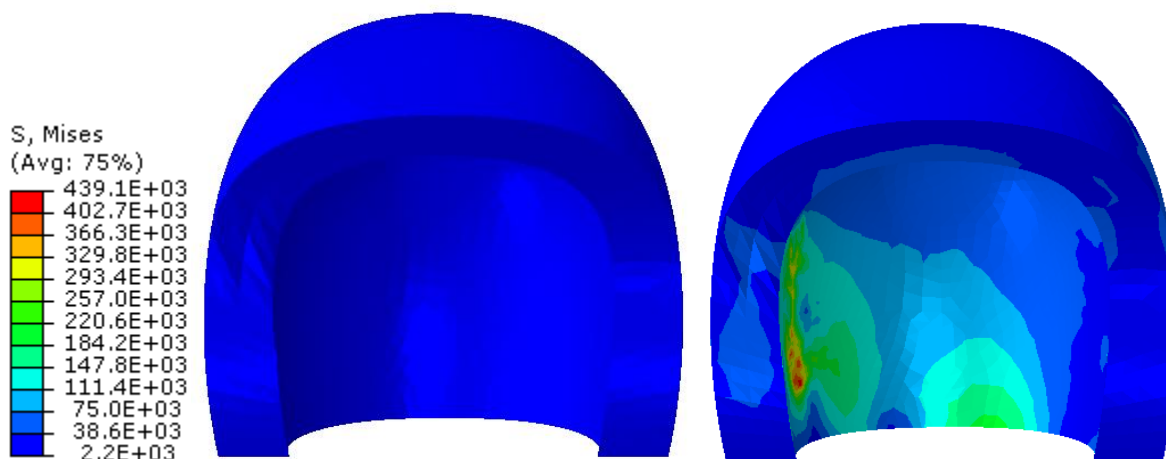


Fig. 14. Stress on outer shell before and after impact comparison

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

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.

۲-۳- نتایج تغییرات ضخامت بر بیشترین تنش وارد بر پوسته با تغییر ضخامت پوسته، وزن کلاه ایمنی تغییر می‌کند. طبق استاندارد ECE ۲۲.۰۵ 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

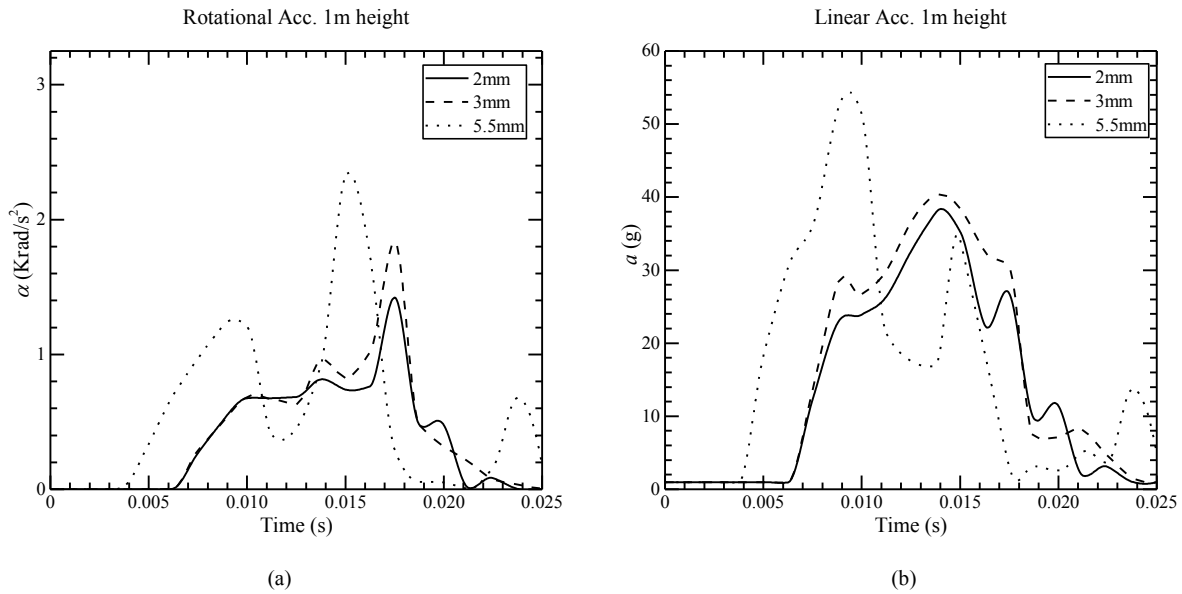


Fig. 16. The effect of the shell thickness on head acceleration of ABS shell from 1m height (a) linear acceleration (b) rotational acceleration

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

پوسته خارجی بر اثر ضربه نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در ناحیه سمت راست پوسته به دلیل 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 (۰/۰۰۰۲۰۲) 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 حالی که 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

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 گیل کریست [۷] که تئوری ارائه شده توسط کولار و دولاسکا [۴۲] را گسترش دادند، تطابق دارد. طبق رابطه (۴) تأثیر ضخامت در ایجاد کماتش مشاهده می‌شود. با افزایش ضخامت، بار بحرانی افزایش یافته و منجر به استحکام بیشتر می‌شود.

$$p_{cr} = Ct_s^3 \quad (4)$$

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

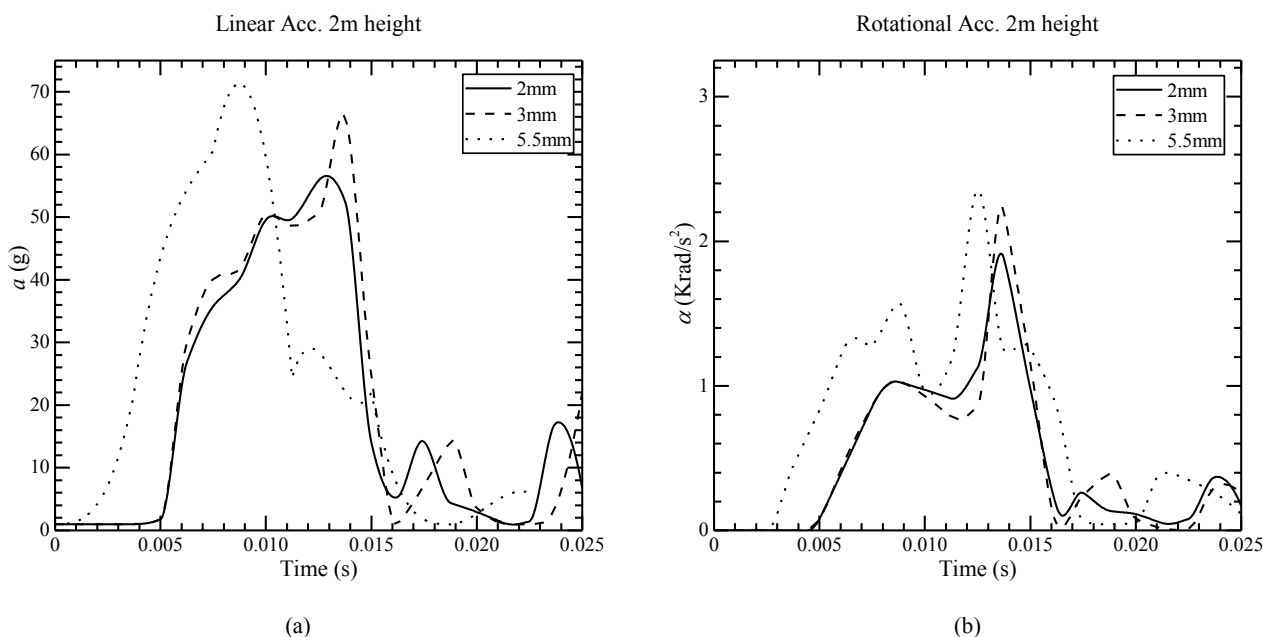


Fig. 17. The effect of the shell thickness on head acceleration of ABS shell from 2m height (a) linear acceleration (b) rotational acceleration

شکل ۱۷: اثر ضخامت پوسته بر شتاب وارد بر سر با پوسته آبی-اس 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 اس	جی آر بی	کولار
2	114	127	70
3	135	150	95
5/5	160	185	122

دورانی و خطی وارد بر سر را افزایش می‌دهد. مشابه با نتایج شکل ۱۳ که تنش در ضخامت ۲ و ۳ 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

تصادفات در همین محدوده می‌باشد. از عوامل دیگری که بر تنش تسلیم کلاه تأثیر می‌گذارد میتوان به سرعت در جهت تماس بر محل برخورد (چنانچه این مؤلفه از سرعت بالا باشد منجر به افزایش نیروی اصطکاک شده که خود تأثیر 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

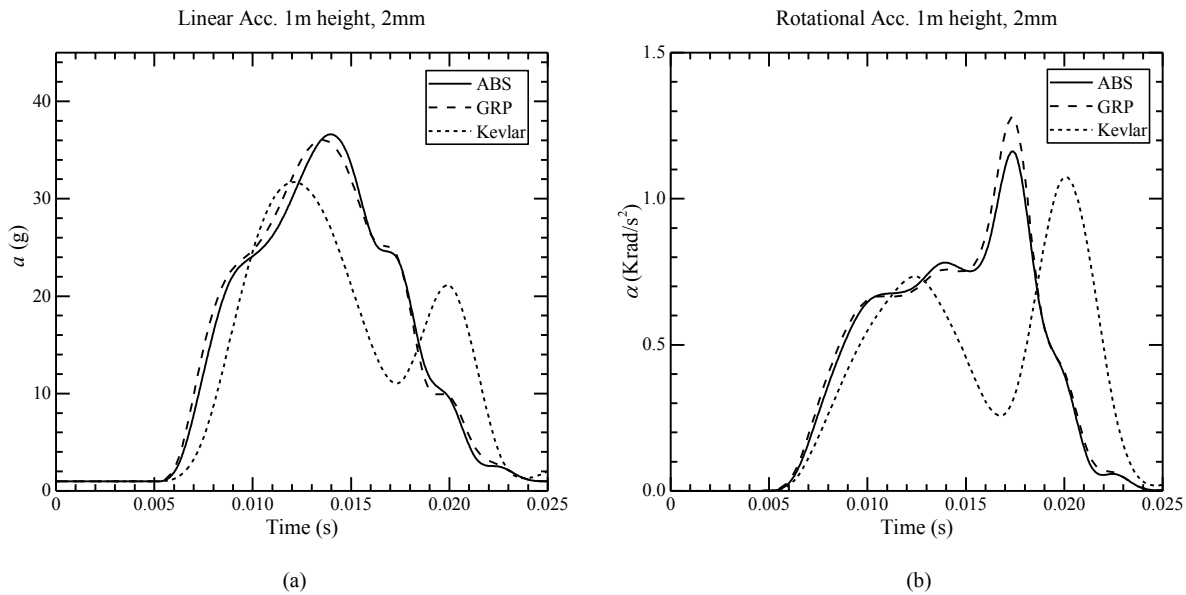


Fig. 18. The effect of the shell material on head acceleration for shell thickness of 2mm (a) linear acceleration (b) rotational acceleration

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

$$HIC = \left\{ \left[\frac{\int_{t_1}^{t_2} a(t) dt}{t_2 - t_1} \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \right\}_{max} \quad (5)$$

که در آن $a(t)$ شتاب خطی وارد بر سر برحسب g و t_1 و 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 به دست آمده، جنس کولار عملکرد فوق‌العاده‌تری نسبت به دو جنس دیگر دارد. اگرچه هر ۳ ضخامت تأیید می‌شوند، اما عملکرد ضخامت ۲ میلی‌متر بسیار بهتر نسبت به سایر ضخامت‌ها می‌باشد.

در معیار آسیب سر فقط شتاب خطی اندازه‌گیری می‌شود، بنابراین برای بررسی محدوده مجاز شتاب دورانی از تحقیقات [۱۱-۸] استفاده شد و از آنجایی که 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

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 تقریباً 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 این که 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 با توجه 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 $51000 \text{ s.g}^{2.5}$ می‌باشد [۴۴]. چنانچه مقدار معیار آسیب سر طبق رابطه (۵) محاسبه شود، از آنجایی که ضخامت‌های بررسی شده در محدوده رایج و استاندارد قرار دارند (بین ۵/۵-۲/۵ میلی‌متر) در این معیار تأیید می‌شوند.

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

شتاب مرکز ثقل سر (m/s^2)	a
مدول یانگ (N/m^2)	E
شتاب جاذبه زمین (m/s^2)	g
ارتفاع مدل از سطح زمین (m)	h
معیار آسیب سر ($m^{2.5}/s^4$)	H
فشار (N/m^2)	p
بار بحرانی کمانش (N)	P_{cr}
فشار گاز موثر (N/m^2)	P_0
چگالی نسبی فوم	RR
زمان (s)	tt
ضخامت پوسته (m)	t_s
سرعت (m/s^1)	vv
علائم یونانی	
شتاب دورانی (Rad/s^2)	$\alpha\alpha$
کرنش مهندسی	ε
تنش (N/m^2)	σ
تنش تسلیم فشاری اولیه (N/m^2)	σ_{c0}

تشکر و قدردانی

نویسندگان در اینجا از کمک‌های Head Injury Prevention

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.اس در برخورد مایل دارد. پوسته با جنس کولار دارای مقدار شتاب کمتر می‌باشد. بررسی معیار آسیب سر نیز نشان می‌دهد که عملکرد کولار بسیار بهتر از دو جنس دیگر است. نتایج جنس کولار همانند نتایج ارائه 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^۱ 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 $2/5 \text{ krad/s}^2$ تخمین زده شد. برای نزدیک‌تر شدن شبیه‌سازی به تصادفات، سرعت برخورد کمی بیشتر از 5 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 دورانی وارد بر سر شدیداً افزایش می‌یابد که منجر به آسیب می‌شود. انتخاب بهترین ضخامت از بین ضخامت‌های بررسی شده، مشابه هر مسأله

- 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, Dynamic 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 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 penetrating head injuries, in: *IUTAM Symposium on Impact Biomechanics: From Fundamental Insights to*

- (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. Beusenbergh, 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.

$$B = \alpha A = \alpha \frac{P_t + P_c}{2} \quad (\text{الف-۲})$$

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

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

$$p_0 = \frac{P_c - P_t}{2} \quad (\text{الف-۴})$$

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 میسر را در صفحه تنش انحرافی نشان می‌دهد که به شکل یک بیضی در صفحه تنش طولی می‌باشد.

با توجه به شکل فوق، ضریب α به صورت زیر به دست می‌آید:

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

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

$$k_t = \frac{P_t}{P_c} \quad (\text{A-۷})$$

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 $P_c P_t$ است که به دلیل افزایش تراکم و یا کاهش دانسیته ماده

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 است که رشد صفحه تسلیم توسط کرنش پلاستیکی فشرده‌کننده حجمی کنترل می‌شود.

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

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

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

اگر A و B اندازه قطرهای بیضی تسلیم باشند آنگاه:

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

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

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 به دست می‌آید

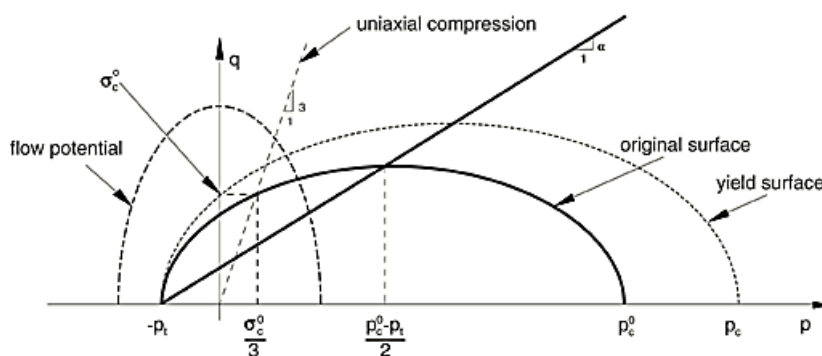


Fig. (A-1). Crushable foam model with volumetric hardening, yield surface [46]

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



