نشریه بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره ۳، جلد ۱۹، پاییز ۱۳۸۷، صفحه ۹۷-۹۱
ویژه‌نامه مهندسی مکانیک

مدلسازی و تحلیل تنش سر انسان در برخورد از مقابل با یک جسم تغییر فرم پذیر به روش المان محدود

سید محمد رجایی، نظامعلی بختیاری و شهاب منصوربقایی

چکیده: آسیب‌های وارده به سر از صدمات شایع و خطرناکی است که با توجه به وجود سیستم کنترل مرکزی در سر همواره مورد توجه بوده است. پدیدهٔ برخورد سر به یک مانع یکی از مسائل جدی در بیومکانیک ضربه بوده خصوصاً اگر مانع صلب باشد. در این مطالعه سر با سرعت ثابت (۶/۵ m/s) به چند مانع از جمله موانع تغییر فرم پذیر برخورد کرده و به کمک LS-DYNA و به روش مقایسه‌ای، تحلیل دینامیکی انجام می‌پذیرد. مواد به کار گرفته جهت مدلسازی مانع، آلومینیوم، آلولایت، آلپوراس، پلیمر ABS و فوم انبساط یافته پلی پروپیلن (EPP31) می‌باشد. این مواد در بدنه اتومبیل و تزئینات درونی آن به کار می‌روند. همچنین مدل المان محدود سر با استفاده از داده‌های آناتومیکی بر اساس شاخص ۵۰ درصدی مردان جامعه در نظر گرفته شده است. روش مقایسه‌ای بر حسب بیشترین تنش وارده به سر، حداکثر کرنش و شتاب کاهشی انجام گرفته تا اثر این موانع بر سر مورد بررسی واقع شود. در تحلیل نشان داده می شود که مقادیر تنش، کرنش و شتاب کاهشی وارده به سر وابستگی مستقیم به دانسیته، تنش تسلیم و الاستیسیته موانع دارد. به طوریکه هر چه مانع دارای تنش تسلیم پایینتر ودانسیته کمتری باشد مقدار تنش و کرنش و شتاب کاهشی وارده به سر کمتر خواهد بود. فوم‌های آلولایت و EPP31 دارای خاصیت جذب انرژی خوبی بوده ضمن اینکه استحکام خوبی نیز دارند اما با توجه به محدودیت حداکثر تنش و شتاب کاهشی وارده بر سر، فوم آلپوراس با کمترین تنش تسلیم، تنشی معادل ۲/۳MPa بر سر وارد کرده که نشان دهنده قابلیت بالای آن در جذب انرژی جنبشی حاصل از برخورد می‌باشد. با استفاده از این فوم نیز می توان شتاب کاهشی کمتر از ۳۰۰g به سر وارد کرد که در محدوده ایمن می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: سر انسان، برخورد از مقابل، تحلیل دینامیکی، مواد تغییر فرم پذیر، مواد جاذب انرژی

۱. مقدمه

آسیب‌های سر و جمجمه در نوع خود بسیار حائز اهمیت است. امروزه عمده‌ترین صدمات سر در حوادث رانندگی رخ می‌دهد که عمدتاً منجر به فوت شده‌است. در بین آسیب دیده‌گان ضایعات مغزی که جان خود را از دست داده‌اند مشاهده شده‌است زخم ناشی از تصادف کوچک بوده و حتی مساحت ناحیه زخمی قابل چشمپوشی می‌باشد. این مساله بیانگر اندازهٔ حرکت بزرگ نیرو در مدت زمان کم (میلی ثانیه) می‌باشد به طوریکه فرد دچار شوک مغزی شدید شده و حتی در بعضی مواقع بدون مشاهده زخم زیادی در سر جان خود را از دست داده است. از آنجا که هدف این مطالعه تحلیل تنش نیروهای وارده بر سر در برخورد با یک جسم تغییر فرم پذیر می‌باشد، سعی شده است که مواد به کار رفته در مانع از اجزای داخلی خودرو الگو گرفته شود. آلومینیوم کارسختی شده فلزی است که در ستونA و B اتومبیل استفاده می‌شود. پلیمر ABS، فوم آلولایت، فوم آلپوراس و فوم پلی پروپیلن انبساط یافته نیز به عنوان

این مقاله در تاریخ ۸۳/۴/۳۰ دریافت و در تاریخ ۸۶/۸/۳۰ به تصویب نهایی رسیده است.

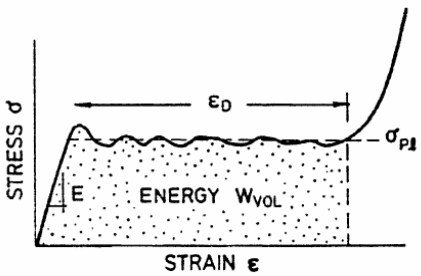
دکتر سیدمحمد رجایی، استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، s_rajaai@iust.ac.ir
نظام علی بختیاری، کارشناس ارشد بیومکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، nezamali_bakhtiary@yahoo.co.uk
شهاب منصور بقائی، دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، shahab_baghaei@iust.ac.ir

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

مواد تغییر فرم‌پذیر جهت جذب انرژی و تزئینات در فضای داخلی اتومبیل به کار برده می‌شوند.

۲. مواد تغییر فرم پذیر

مواد تغییر فرم‌پذیر موادی هستند که صلب نبوده و تحت بارهای وارده تغییر فرم می‌دهند و بخشی از انرژی بار وارده را صرف تغییر شکل می‌کنند. این مواد دارای دانسیته پایین بوده و معمولاً در ساختار آنها حفره‌های میکروسکوپی وجود دارد و با توجه به چنین ساختاری به مواد حفره‌دار یا cellular materials یا فوم‌ها معروفند. مواد تغییر فرم‌پذیر یا جاذب انرژی دارای منحنی تنش-کرنش صاف در دامنه وسیعی از کرنش هستند. نمودار تنش-کرنش چنین موادی در شکل(۱) نشان داده شده است. این مواد در یک تنش ثابت موسوم به σ_{pl} به صورت پلاستیکی گسیخته می‌شوند و انرژی حاصل از بار وارده را در این محدوده بدون اینکه تنش از یک حد معین تجاوز کند جذب می‌کنند. این مواد در حالت کلی به نام مواد الاستیک-پلاستیک کامل نامیده می‌شوند و نمودار تنش-کرنش آنها تا بازهٔ مفیدی از کرنش مثل مواد الاستیک-پلاستیک کامل می‌باشد. امروزه این مواد به صورت گسترده در صنعت به منظور جذب انرژی حاصل از برخورد (انرژی جنبشی) به کار می‌روند. رفتار مطلوب این مواد اینست که بعد از فشرده شدن و جذب انرژی جنبشی جسم برخورد کننده، خاصیت ارتجاعی ندارند. به همین خاطر جسم برخورد کننده(impactor) در جهت عکس شتابی نخواهد داشت. بنابراین استفاده از این مواد در اتومبیل در زمان برخورد باعث می‌شود که اگر سر به آنها برخورد کند پدیده whiplash اتفاق نیفتد لذا آسیب به سر و گردن به حداقل خواهد رسید.



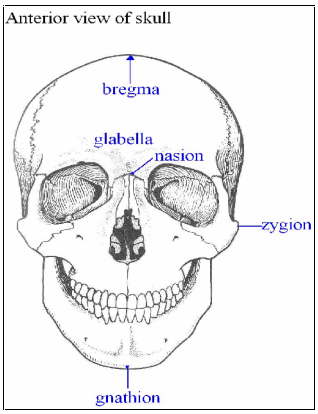
شکل ۱. نمودار تنش-کرنش یک ماده ایده‌آل جاذب انرژی [۱]

۳. مدلسازی

۳-۱. هندسه و شکل سر

در تجزیه و تحلیل‌های دینامیکی ضربات وارد بر سر، داده‌های دریافتی با توجه به شتاب سر، خواص و هندسه آن به دست می‌آید. شتاب ایجاد شده در سر و بعضی از خواص دیگر وابسته به دانسیته آن می‌باشد. برای به دست آوردن مدل المان محدود، اندازه واقعی سر، خواص مکانیکی تک تک اجزا سر و چگونگی اتصال آنها نیز لازم است. دانسیته، خواص و هندسه این اندام وابسته به سن فرد می‌باشد و با توجه به آن، رفتار سر انسان در تحلیل دینامیکی در سن‌های مختلف کاملاً متفاوت است. این تغییرات از دوران کودکی تا بلوغ با افزایش سن سریعتر و آشکارتر است. زیرا با افزایش سن استخوانبندی فرد تکمیل می‌شود به طوریکه رشد استخوانبندی یک کودک با یک نوجوان ویک فرد بالغ کاملاً متفاوت است [۲].

شبیه سازی و مدلسازی سر با خواص منحصر به فرد آن با امکانات موجود در حالت کلی بسیار مشکل و حتی غیرممکن خواهد بود. بنابراین در حالت کلی برای به دست آوردن هندسه سر از دستگاه‌های مختلفی مثل CT-SCAN، MRI و CMM[2]، داده‌های استاندارد و آناتومیکی که معمولاً بر اساس شاخص‌های معین جامعه می‌باشند؛ استفاده شده است یا هندسه سر را به کمک پوسته‌های کروی و بیضوی تخمین می‌زنند. داده‌های آناتومیکی بر اساس شاخصهایی که در سر می‌باشد به دست می‌آید [۳]. این شاخص‌ها در شکل ۲ نشان داده شده‌است. سوین کلوین و همکارانش برای بررسی اثر اندازه سر در میزان شوک وارده بر آن اندازه کلی سر را با توجه به داده‌های استاندارد ارائه داده‌اند که بر اساس شاخصهای معین جامعه می‌باشد [۴].



شکل ۲. شاخص‌های سر جهت تخمین اندازه آن

در مطالعه‌ای دیگر شوئیب و هامودا اندازه‌های استاندارد دیگری از هندسه را در تست کلاه‌های ایمنی مورد مطالعه قرار دادند [۵]. چان در سال ۱۹۷۴ (Chan)، کِنِر و گلد اسمیت در سال ۱۹۷۲ (Kenner and Goldsmith)، خَلیل و هوبارد در سال ۱۹۹۷ (Khalil and Hubbard) برای ارائه هندسه سر از پوسته کروی و بیضوی استفاده کردند.

هاردی و مارکال (Hardy and Marcal) در سال ۱۹۷۳، نیکل و مارکال (Nickell and Marcal) در سال ۱۹۷۴، لیو و هوزی

[1]. دستگاه اندازه‌گیری مختصات (Coordinate Measuring Machine)

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

(Liu and Hosey) در سال ۱۹۸۱ و وارد (Ward) در سال ۱۹۸۲ با استفاده از داده‌های آناتومی برای مدلسازی استفاده کردند [۶]. مارگولی و تایبولت(Margulies and Tthiboult, 2000) در سال ۲۰۰۰ و در سال ۱۹۹۷ مازوچوفسکی و همکاران (Mazuchowski et al, 1997) برای مطالعه بارهای دینامیکی بر سر یک کودک از مدل المان محدود نیم کره بهره جستند [۲]. با توجه به آناتومی سر، استخوان جمجمه شامل سه لایه تخت بیرونی، لایه اسفنجی میانی و لایه تخت درونی است که این سه لایه در دوران کودکی به صورت یکپارچه می‌باشد. ضخامت سه لایه جمجمه در دوران بلوغ تقریباً به صورت یکنواخت می‌باشد. در تحلیل‌ها نیز همواره یک ضخامت ثابت ۷-۳ میلی‌متر برای جمجمه در نظر گرفته شده‌است [۶].

۲-۳. خواص مکانیکی بافت سر انسان

جمجمه و بافت مغزی از مواد بیولوژیکی هستند. خواص مواد و بافتهای بیولوژیکی تابعی از سن، جنسیت، و رفتار بار وارده بر آنها می‌باشند و از روابط ساختاری مواد مهندسی پیروی نمی‌کنند. این مواد اغلب غیرایزوتروپ، ناهمگن، غیرخطی و ویسکوالاستیک هستند. از اینرو تغییرات زیادی بین اجزاء مختلف یک عضو چند جزئی بیولوژیکی وجود دارد. فرق سر تا کرنش ۳۰-۴۰٪ از خود خاصیت الاستیک نشان می‌دهد ولی کرنش بیشتر باعث می‌شود نمودار تنش-تغییر فرم آن به صورت مقعر شود [۶].

در بین سه لایه استخوانی جمجمه نیز مقدار ضریب پوآسون لایه اسفنجی در جهت شعاعی و مماسی با هم متفاوت است ولی لایه تخت بیرونی از خود خاصیت Transversely isotropic نشان می‌دهد. مک الهانی (Mc Elhaney) در سال ۱۹۷۰، وود (Wood) در سال ۱۹۹۷ نشان دادند که استخوان جمجمه به نرخ کرنش حساس است به طوریکه با افزایش نرخ کرنش الاستیسیته نیز افزایش می‌یابد. به روشی مشابه معلوم شد تنش شکست با افزایش نرخ کرنش نیز افزایش می‌یابد در حالیکه کرنش نهایی با نرخ کرنش کاهش می‌یابد. ماده سفید و خاکستری[3] نیز در سیستم اعصاب مرکزی هستند.

ماده سفید خاصیت ایزوتروپیک دارد اما ماده خاکستری در جهات مختلف رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد. مغز با توجه به اینکه دارای ۸۰٪ آب می‌باشد رفتاری مثل سیال غیر قابل تراکم خواهد داشت [۶].

نورالدین و همکارانش در سال ۱۹۹۸ برای مدلسازی سر انسان از ماده‌ای الاستیک به جرم ۴/۵۱ کیلوگرم با ضریب پوآسان ۰/۳ بهره جستند و از المان پوسته برای تحلیل سر استفاده کردند [۷]. در سال ۲۰۰۲، کاتلین دسانتز کلینیک[4] و همکارانش برای تحلیل بارهای دینامیکی بر سر یک کودک شش ماهه؛ خواص مکانیکی جمجمه سر کودک را ماده‌ای الاستیک در نظر گرفتند [۲]. دانیل کاماچو و همکارانش مدل دینامیکی چند جسمی از سر و گردن را برای بررسی نقش اصطکاک بین سطوح برخورد ارائه دادند. خواص سر در این تحلیل طبق جدول ۲ در نظر گرفته شده‌است [۸].

جدول ۱. خواص مکانیکی جمجمه سر به عنوان ماده ویسکوالاستیک [۸]

مدول بالک	مدول برشی کوتاه مدت	مدول برشی بلند مدت	ضخامت	مدول الاستیسیته
K=3.32 GPa	GB_{0B}=8.2 GPa	$GB_{\infty B}$=2.29 GPa	3.3mm	E=5.58 GPa

ثابت زوال (decay) در این مدل β=۱۵۹۱ s^{-1} ارائه شده‌است و رفتار استراحت یا رفتار آزادسازی تنش سر(Relaxation behavior) با رابطه زیر تعریف شده‌است.

$$G(t) = G_\infty + (G_0 - G_\infty)e^{-\beta t} \qquad (۱)$$

کینگ و چو (King و Chou) در سال ۱۹۷۶برای بررسی نقش سرعت برخورد بر میزان تنش وارده به جمجمه در برخورد از مقابل یک مدل سه بعدی از جمجمه را مورد تحلیل قرار دادند. در این مدل سه لایه تشکیل دهنده جمجمه سر؛ لایه بیرونی، میانی ولایه درونی با خواص ایزوتروپیک الاستیک تحلیل شد. برای به دست آوردن مقدار تنش و فشار درون جمجمه؛ یک جسم خارجی در سرعت و وزنهای مختلف به سر برخورد می‌کرد. زاویه برخورد جسم به سر در صفحه Sagittal نسبت به افق با زاویه°۴۵ اتفاق می‌افتاد در این حالت مقدار نیروی تماس و مقدار فشار درونی جمجمه به دست آورده شد [۹].

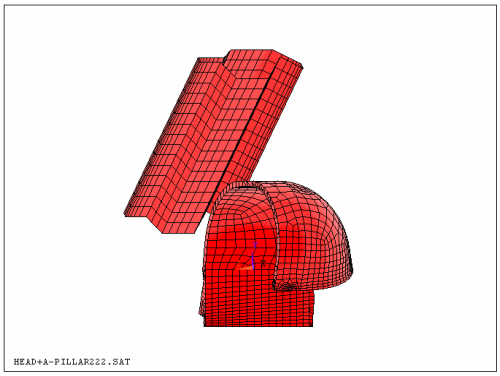
۳-۳. مدل المان محدود سر انسان و مانع

در تحلیل پدیده برخورد از کد LS-DYNA استفاده گردید و سر به عنوان ماده‌ای ویسکوالاستیک با هندسه و خواص مکانیکی طبق مطالعات قبلی مدلسازی شد. زاویه برخورد سر به مانع در صفحه Sagittal و با زاویه°۴۵ نسبت به افق انجام پذیرفت. موانع در نظر گرفته شده با خواص مکانیکی طبق جدول ۲ مدل گردید. چون بررسی از نوع مقایسه‌ای بود شرایط مسأله جز در نوع مواد، یکسان در نظر گرفته شد (جدول ۲). ضخامت مانع نیز برای کلیه مواد ۴ میلی متر فرض شد. سرعت برخورد ۱۵ mph (۶/۵m/s) با توجه به مطالعات قبلی انجام گرفت. این تحلیل شامل ۳۹۱۲ المان و ۳۹۴۵ گره بود. در شکل ۳ مدل المان محدود سر با مانع نشان داده شده است. مدت زمان تحلیل برای هر ماده با استفاده از سیستم Pentium

[3] *White and Gray Matter*
[4] *Klinich K.D*

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

Four-Full Cache 2.8 GHz, Dual Channel حدود ۲۰-۸ ساعت به طول انجامید.



شکل ۳. مدل المان محدود سر و مانع

جدول ۲. موانع در نظر گرفته شده در پدیده برخورد

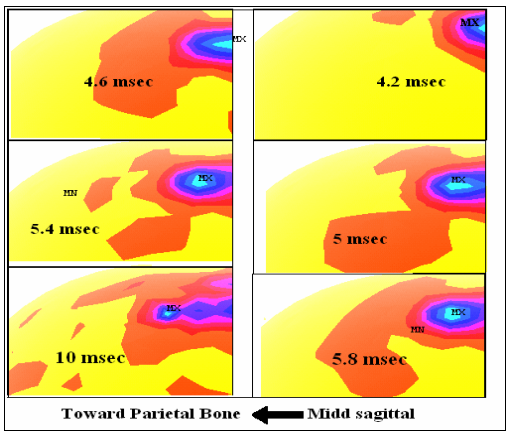
ماده / خاصیت	آلومینیوم 5052 H34	PC/ ABS	فوم آلومینیوم آلپوراس[5]	فوم آلومینیوم آلولایت[6]	فوم پلیمری EPP31[7]
دانسیته (kg/m^3)	۲۷۱۰	۱۰۵۰	۲۵۰-۲۰۰	۱۰۰۰-۳۰۰	۲۹/۷
مدول یانگ (MPa)	۶۹۶۴۰	۲۳۵۰	۱۰۰۰-۴۰۰	۱۲۰۰۰-۱۷۰۰	۱۳۰۰ در °C ۲۰
ضریب پوآسان	۰/۳۳	۰/۳۳	۰/۳۴-۰/۳۱	۰/۳۴-۰/۳۱	۰/۴
تنش تسلیم (MPa)	۱۶۵/۵	۷۰/۳	۱/۸-۱/۶	۲۰-۲	۳۵-۳۰
مدول مماسی (MPa)	۳۸۸/۲				
تسلیم نهایی (MPa)		۷۱			۴۰-۳۰
مدول حجمی (MPa)			۳۵۰-۳۰۰	۵۲۰۰-۶۰۰	
استحکام فشاری (MPa)			۱/۷-۱/۳	۱۴-۱/۹	
استحکام کششی (MPa)			۱/۹-۱/۶	۳۰-۲/۲	
مرجع	[۱۲]	[۱۲]	[۱۱]	[۱۱]	[۱۴]

۳. بحث در نتایج

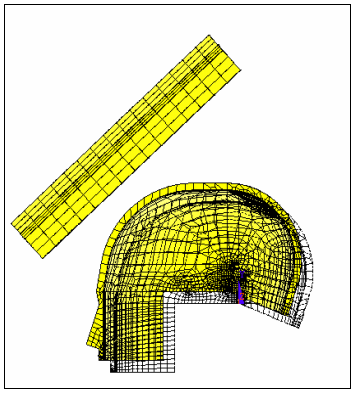
مقادیر ماکزیمم حاصل از تحلیل در جدول ۳ نشان داده شده است. لحظه برخورد در میلی ثانیه چهارم اتفاق می‌افتد. مشاهده شد در برخورد با مانع آلومینیوم و ABS؛ ناحیه برخورد در سر در طول زمان برخورد ثابت بوده و جابجایی ندارد ضمن اینکه در طول زمان برخورد دارای ماکزیمم تنش و ماکزیمم کرنش و حداقل مساحت بود. ولی این ناحیه در برخورد با مانع آلپوراس و آلولایت در طول زمان برخورد مدام تغییر مکان می‌داد و نیز دارای تنش و کرنش کمتری بود. سر هنگام برخورد به مانع آلپوراس هیچگونه حرکتی در جهت عکس نداشت و هرچه بازه زمانی بالا می‌رفت ناحیه تماس بیشتر می‌شد و مقدار تغییر فرم نیز در مانع بیشتر می‌شد. از طرفی ناحیه برخورد در این مانع نسبت به سایر موانع بزرگتر بود و تنش وارده بر سر در این مانع نسبت به تمام موانع کمتر بود. همچنین کرنش وارده بر سر و شتاب کاهشی آن نیز در کمترین مقدار به دست آمد. درشکل(۴) تغییر مکان ناحیه برخورد با فوم آلپوراس نشان داده شده است.

جدول ۳. ماکزیمم مقادیر حاصل در طول برخورد

	آلومینیوم	ABS	EPP31	آلولایت	آلپوراس
ماکزیمم شتاب کاهشی	۵۴۶۶/۷	۲۱۵۲/۱	۹۳۱/۵	۱۲۷۸	**۲۹۹/۸۵**
ماکزیمم تنش (Mpa)	۱۲۰/۶	۳۱/۲	۱۹/۶	۱۴/۹	**۲/۳**
ماکزیمم کرنش	۰/۰۰۸۹	۰/۰۰۲۶	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۱۲	**۰/۰۰۰۱۳۴**



شکل ۴. جابجایی ناحیه ماکزیمم تنش در طول زمان برخورد با مانع آلپوراس و آلولایت



شکل ۵. تغییر فرم سر و مانع بهنگام برخورد به مانع آلومینیومی

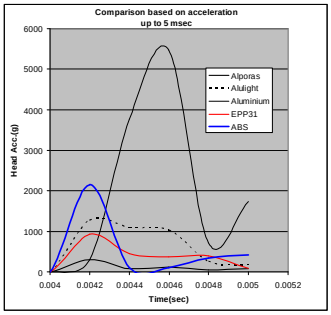
شتاب کاهشی وارده به سر در مدت ۵ میلی ثانیه از برخورد نیز در نمودار شکل(۶) نشان داده شده است. در این نمودار مانع آلومینیومی ماکزیمم شتاب کاهشی و مانع آلپوراس مینیمم شتاب کاهشی را به سر وارد کرده‌است. نمودار نشان می‌دهد که نرخ

[5]. *Alporas Foam*
[6]. *Alulight Foam*
[7]. *Expanded PolyPropylyne (31Kg/m³)*

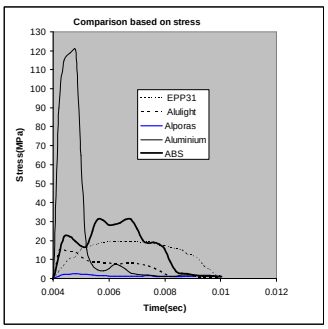
[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

کاهش شتاب سر در برخورد با مانع آلومینیومی بیشتر از سایر موانع می‌باشد ولی موانع آلولایت، آلپوراس و EPP31 نرخ کاهش شتاب ملایمتری نسبت به این مانع را به سر وارد می‌کنند. مقادیر تنش وارده بر سر در ناحیه برخورد در طول زمان برخورد نیز برای موانع مختلف در نمودار شکل(۷) نشان داده شده است. در این نمودار نیز مانع آلومینیومی در یک بازه زمانی بسیار کوتاه بیشترین تنش را به سر وارد می‌کند که به وضوح پدیده ضربه را نشان می‌دهد در این مانع نمودار تنش بر حسب زمان دارای یک جهش بزرگی است که تقریباً ۶۰ برابر تنش ایجاد شده بر اثر مانع آلپوراسی می‌باشد. سایر موانع دیگر نیز دارای منحنی با دامنه یکنواخت تری نسبت به زمان هستند و جهشی در آنها مشاهده نمی‌شود. این خاصیت نشان دهنده رفتار موانع تغییر فرم پذیر می‌باشد.

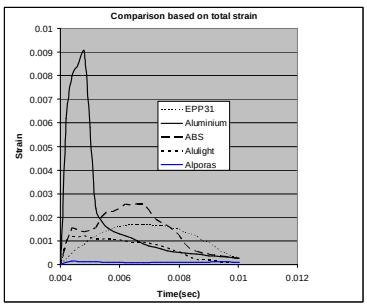
کرنش وارده بر سر نیز در نمودار شکل(۸) نشان داده شده است. این نمودار نیز شبیه نمودار تنش وارده بر سر می‌باشد. در این نمودار نیز مشاهده می‌شود که نرخ کرنش حاصله از مانع آلپوراس کمترین بوده ضمن اینکه مقدار کرنش وارده به سر نیز در برخورد سر به این مانع در مقایسه با سایر موانع کمترین می‌باشد در حالیکه مانع آلومینیومی دارای ماکزیمم جهشی در یک بازه زمانی بسیار کوتاه ۲ میلی ثانیه می‌باشد و نرخ کرنش وارده به سر نیز حداکثر می‌باشد. بنابراین با توجه به اینکه سر یک ماده ویسکوالاستیک می‌باشد نسبت به این نرخ کرنش سریع، حساس بوده و در حالت ترد سریعاً خواهد شکست. همانطور که انتظار می‌رفت مانع آلومینیومی منجر به تنش و کرنش ماکزیمم بر سر شده و همچنین سرعت برگشت سر بعد از برخورد بیشتر از سایر موانع بوده ضمن اینکه مدت زمان برخورد سر با آن حداقل بوده است. اینها همه نشان دهنده خاصیت ارتجاعی و صلبیت آلومینیوم نسبت به سایر موانع می‌باشد. به تعبیری دیگر خاصیت rebound این مانع بیشتر از سایر موانع می‌باشد. نقطه مقابل آن فوم آلپوراس می‌باشد که کمترین تنش و کرنش را بر سر وارد می‌کند ضمن اینکه تغییرات تنش و کرنش و همچنین تغییرات سرعت و شتاب سر در برخورد با این مانع به صورت ملایمتری انجام می‌پذیرد. همانطور که در نمودار تغییر سرعت سر در برخورد با موانع نشان داده شده است این نکته به خوبی قابل بیان است که سر هنگام برخورد به مانع آلپوراس هیچگونه حرکتی در جهت عکس نداشته و سرعت آن با یک شتاب کاهشی تقریباً ثابت به سمت سکون میل می‌کند. نتایج حاصل از این دو مانع به خوبی در رابطه اسنایدر [۱۰] گنجانده شده است.



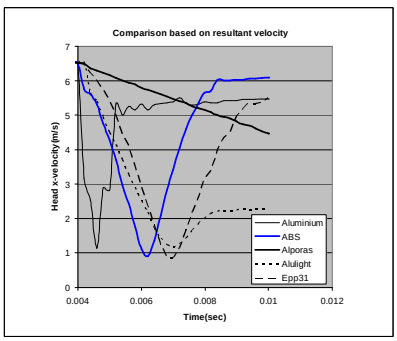
شکل ۶. شتاب کاهشی سر در ۵ میلی ثانیه از برخورد



شکل ۷. تنش وارده بر سر در طول زمان برخورد



شکل ۸. مقایسه موانع مختلف بر اساس میزان کرنش وارده بر سر

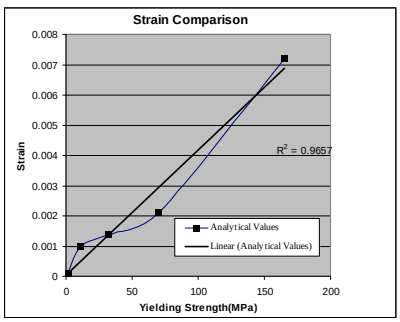


شکل ۹: مقایسه موانع مختلف بر اساس تغییرات سرعت سر در برخورد با آنها

نتایج مندرج در جدول ۲ و سایر نمودارها نشان می‌دهد که فوم آلپوراس قابلیت میزان جذب انرژی بالاتری را نسبت به سایر موانع دارد همچنین با توجه به اینکه ماکزیمم شتاب کاهشی مجاز برای سر ۳۰۰g می‌باشد این ماده نیز کمترین شتاب کاهشی را به سر وارد می‌کند که نهایتاً خطری متوجه سر نمی‌شود. از طرفی با توجه

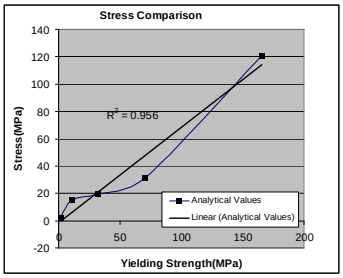
[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

به نمودارهای انتخاب بهترین مواد جهت جذب انرژی که توسط مهندسین کمبریج [۱۱ و ۱] (CES[8]) ارائه شده‌است، این فوم نیز تنشی زیر ۲/۵MPa به سر وارد می‌کند. بنابراین با توجه به میزان تحمل شتاب و تنش وارده بر سر بر اساس محدودیت شتاب کاهشی و تنش وارده؛ این فوم ایمن ترین مانعی می‌باشد که در این تحلیل مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از تحلیل بیانگر پارامترهایی از رفتار ماده می‌باشد که در میزان بار وارده بر سر مؤثر می‌باشند. بنابراین لازم است معین شود که چه پارامترهایی از موانع در میزان جذب انرژی و پایین آوردن مقدار تنش بر سر نقش داشته‌اند. دانسیته، الاستیسیته و استحکام تسلیم موانع سه پارامتری هستند که در این تحلیل مورد ارزیابی واقع شدند و اثر آنها در میزان بار وارده بر سر مورد بررسی واقع شد. نتایج حاصل از تحلیل در نمودارهای ۱۰ تا ۱۲ بر حسب تنش (استحکام) تسلیم مواد آورده شده است. با توجه به نمودار ۱۰ مشاهده می‌شود که کرنش وارده بر سر مستقیماً به تنش تسلیم مانع وابسته است به طوریکه هرچه مانع دارای تنش تسلیم کمتری باشد میزان تنش وارده به سر نیز کمتر است. در نمودارهای ۱۱ و ۱۲ نیز همین قاعده برای میزان تنش وارده بر سر و شتاب کاهشی آن نیز معتبرمی باشد. نتایج حاصل از تحلیل نیز نشان می‌دهد که اثر الاستیسیته و دانسیته مواد نیز مثل اثر استحکام تسلیم بوده و میزان بار وارده بر سر نیز وابستگی مستقیمی به آنها دارد. از طرفی با توجه به نتایج به دست آمده از تحلیل برای فوم آلپوراس و آلولایت و EPP31 این نکته به خوبی نشان داده شد که این مواد رفتار تغییر فرم پذیری مطلوبی را حین برخورد با سر نشان داده و منحنی تنش-کرنش به دست آمده از نتایج نیز مؤید این نکته است که این مواد در دامنه وسیعی از نمودار تنش- کرنش مقدار زیادی از انرژی جنبشی حاصل از برخورد را گرفته در حالیکه تنش ایجاد شده بر سر ثابت مانده است این تنش ثابت، σ_{pl} همان محدوده ایمنی است که در برخورد با فوم آلپوراس به دست آمده است. نمودارهای تنش-کرنش این مواد در برخورد با سر در شکلهای ۱۳ تا ۱۵ نشان داده شده است.

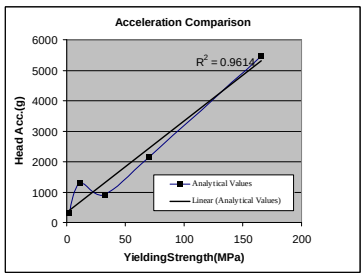


شکل ۱۰. اثر استحکام تسلیم بر میزان کرنش وارده بر سر انسان

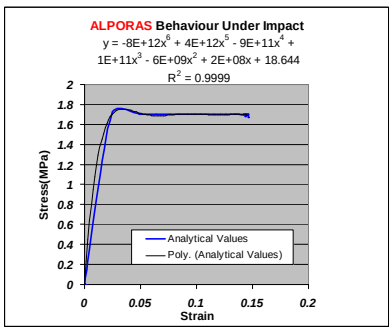
[8] -*Cambridge Engineering Selector*



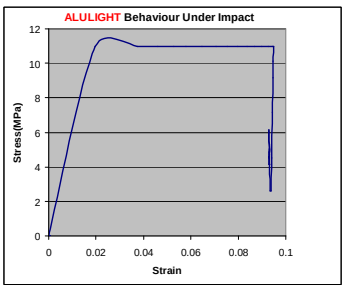
شکل ۱۱. اثر استحکام تسلیم بر میزان تنش وارده بر سر



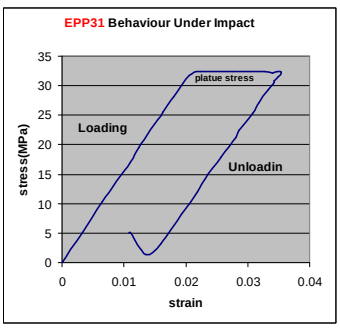
شکل ۱۲. اثر استحکام بر میزان شتاب کاهشی وارده بر سر



شکل ۱۳. رفتار مانع آلپوراس در برخورد



شکل ۱۴. رفتار مانع آلولایت در برخورد



شکل ۱۵. رفتار مانع EPP31 در برخورد

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]

۴. نتیجه گیری

نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد که رفتار فوم آلپوراس، آلولایت و EPP31 در برابر ضربه مؤید آنست که این فومها توانایی جذب انرژی جنبشی حاصل از برخورد را دارند. فوم آلپوراس با داشتن تنش تسلیم پایینتر در طول برخورد ضمن جذب انرژی جنبشی حاصل از برخورد مدام تغییر فرم می‌دهد و تنش وارده بر سر را در حداقل میزان ممکن نگه می‌دارد. نمودار تغییرات سرعت در طول زمان برخورد نیز نشان می‌دهد که سر در برخورد با این مانع هیچ حرکتی در جهت عکس ندارد و بنابراین پدیده Whiplash و Rebound در برخورد با این مانع اتفاق نخواهد افتاد. فوم آلولایت و فوم EPP31 نیز در محدوده‌ای از کرنش انرژی جنبشی حاصل از برخورد را جذب کرده ولی چون انرژی جنبشی سر به حدی نبوده‌است که بر انرژی اصطکاکی بین سطوح برخورد غلبه کند لذا این دو فوم در مدت زمان برخورد قسمتی از انرژی جنبشی را جذب کرده ولی الاستیسیته بالاتر آنها نسبت به فوم آلپوراس باعث شده که در پروسه باربرداری قرار گرفته و منجر به پدیده Rebound سر شوند ولی همانطور که در نمودارها و تحلیل مشاهده شد اثر Rebound بر سر ملایم بود و نرخ تغییرات سرعت نسبت به زمان کندتر بود که این امر باعث شده سر بعد از برخورد به مانع، آرامتر به عقب برگردد. از نتایج تحلیل این نتیجه حاصل شد که فوم آلپوراس با حداقل کردن تنش، کرنش و شتاب کاهشی منتقله به سر بهترین انتخاب در بین موانع به کاررفته می‌باشد و موانع آلولایت و EPP31 در اولویت بعدی قرار خواهند داشت.

مراجع

[1] Maine, E.M.A., Ashby, M.F., *"Applying the Investment Methodology for Materials (IMM) to Aluminum Foams"*, Materials and Design 23, 2002, PP. 307-319.

[2] Klinich, K.D., Hulbert, G.M., Schneider, L.W., *"Estimating Infant Head Injury Criteria and Impact Response Using Crash Reconstruction and Finite Element Modeling*", Stapp Car Crash Journal;Vol. 46 ,November 2002.

[3] Platzer, W., Kahle, W., Leonhardt, H., "*Color Atlas and Textbook of Human Anatomy"*, volume1, Locomotor System", 3P^{rdP} revised edition, 1986.

[4] Kleiven, S., Von Holst, H., "*Consequences of Head Size Following Trauma to the Human Head*", Journal of Biomechanics Engineering, 35, 2002, PP.153-160.

[5] Shoaeib, F.M., Hamouda, A.M.S., Radin Umar, R.S., Hamdan, M.M., Hashmi, M.S.J., "*Motorcycle Helmet Part I, Biomechanicsand Computational Issuees*", Jurnal of Materials Processing Technology 123, 2002, PP. 406-422.

[6] Kleiven, S.; *"Finite Element Modeling of the Human Head"*, Doctoral Thesis, Department of Aeronautics, Royal Institute of Technology. S-100 44 Stockholm, Sweden, ISSN 0280-4646, Report 2002.

[7] Noureddine, A., *"Computer Modeling and Validation of a Hybrid III Dummy.for Crashworthiness Simulation*", FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center, Mathematical and Computer Modelling 35, 2002, PP. 885-893.

[8] Camacho, D.L.A., Nightinable, R.W., Myers, B.S., "*Surface Friction in Near-Vertex Head and Neck Impact Increases Risk of Injury*", Journal of Biomechanics 32, 1999, PP. 293-301.

[9] Al-Basharat A., Zhou C., Yang K.H., Khalil T., King A.I. *"Intra Cranial Pressunre in the Human Head Due to Frontal Impact Based on a Finite Element Model*", Bioengineering Center, Wayne State University, Detroit, Michigan. Proceeding of ASME Summer bioengineering Meeting, 1999.

[10] Cory, C.Z., Jones, M.D., James, D.S., Leadbeatter, S., Nokes, L.D.M., "*The Potential and Limitation of Utilizing Head Impact Injury Models to Assess the Likelihood of Significant Head Injury in Infant after a Fall*", Forensic Science International 123, 2001, PP. 89-106.

[11] Ashby, M.F., Evans, A.G., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W., Wadley, H.N.G., *"Metal Foams: a Design Guide*", Butterwoth Heinemann, 2000.

[12] Balasubramanyam, S., *"Head Impact Characterization of Generic A-Pillar of an Automobile*", MSc. Thesis, College of Engineering and Mineral Resourses, West Virginia University, Morgantown, 1999.

[13] Avalle, M., Belingardi, G., Montanini, R., *"Characterization of Ploymeric Structural Foam under Compressiv Impact Loading Polymers of Energy – Absorption Diagram*", International Journal of Impact Engineering, 25, 2001, PP. 455-472.

[14] Hallquist, J.O., *"LS-DYNA Theoretical Manual*", Livermore Software Technology Corporation, May, 1998.

[15] *"ANSYS\LS-DYNA User's Guide*", Ansys release 6, Ansys Inc 2000.

[Downloaded from ijiepm.iust.ac.ir on 2026-09-14]